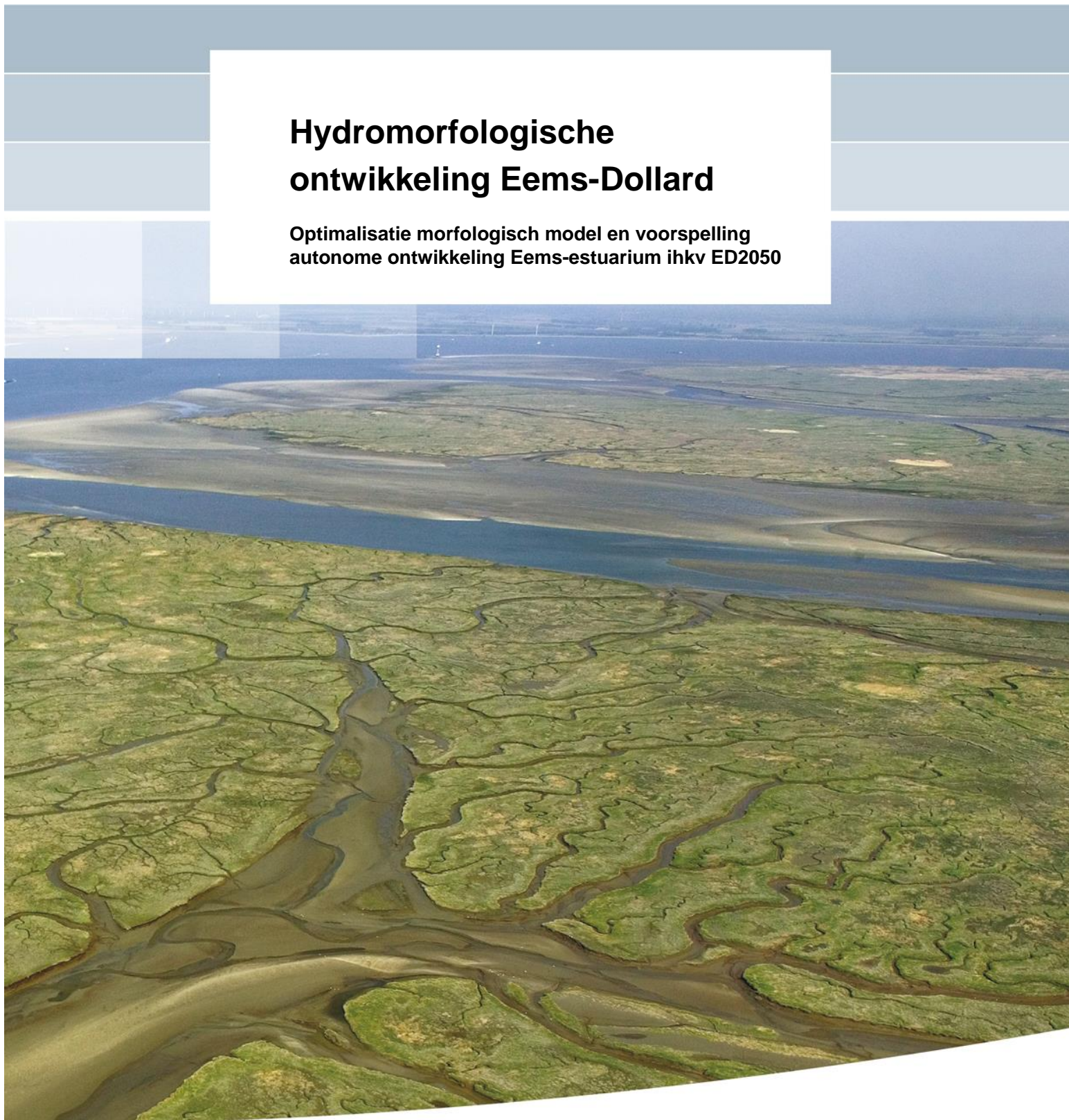


## **Hydromorfologische ontwikkeling Eems-Dollard**

**Optimalisatie morfologisch model en voorspelling  
autonome ontwikkeling Eems-estuarium ihkv ED2050**





# **Hydromorfologische ontwikkeling Eems-Dollard**

**Optimalisatie morfologisch model en voorspelling autonome  
ontwikkeling Eems-estuarium ihkv ED2050**

Bas van Maren  
Reinier Schrijvershof  
Julia Vroom



**Titel**  
Hydromorfologische ontwikkeling Eems-Dollard

<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
11202245-000	11202245-000-ZKS-0011	<b>88</b>

**Trefwoorden**  
Eems-Dollard, morfologisch model, slibmodel, baggeren en storten, zeespiegelstijging

### **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. Voorliggende rapportage beschrijft de verbeteringen in het morfologische model welke in 2018 zijn doorgevoerd, en de resultaten van voorspellingen van de autonome ontwikkeling en het effect van zeespiegelstijging, bodemdaling en baggeren en storten met het morfologische model en het slibmodel.

De belangrijkste bereikte verbeteringen in het morfologisch model zijn

- Door het aanpassen van de modelrandvoorwaarden zijn een meer realistisch aanstroom en uitstroom van het Eems Estuarium verkregen (een meer NW-ZO stroming en minder N-Z stroming zoals in de vorige modelversie), en daardoor minder aanzanding in de Westereems.
- Door een SWAN golfmodel in combinatie met een Mormerge morfologisch model is golf-gedreven zandtransport in het mondingsgebied berekend, en zijn realistischere parameters voor het slibmodel gebruikt.
- Door het implementeren van harde lagen (keileem, potklei, veen) in het model is te diepe insnijding van de getijgeulen in delen van het Eems estuarium voorkomen. Door het simuleren van zeespiegelstijging door middel van bodemdaling is het simuleren van baggeren en storten verbeterd: door de zeespiegelstijging neemt de relatieve waterdiepte toe, waardoor in het model minder wordt gebaggerd.

In het 3D-slibmodel is een aanpassing gedaan in de bodemligging van de Eems-Rivier om de effecten van morfologische veranderingen in de Eems-Rivier te scheiden van de effecten van morfologische veranderingen in het Eems-estuarium. Daarnaast is een eerste lokaal slibmodel opgezet voor de Dollard, gebaseerd op het grote morfologische model, om in meer detail de invloed van de parameterinstellingen op het meegroeien van slibrijke intergetijdengebieden met zeespiegelstijging te evalueren.

Met de verbeterde modellen zijn hindcasts en voorspellingen van de autonome ontwikkeling uitgevoerd. Het doel van de hindcasts is het kalibreren van het morfologische model, maar ook het beter begrijpen van de historische ontwikkeling van het estuarium. De resultaten suggereren dat het invullen van de Dollard een rol heeft gespeeld in het verlanden van de Bocht van Watum. De harde lagen zijn deels sturend geweest in het dominant worden van de Westereems ten opzichte van de Oostereems.

Vervolgens is het model toegepast om inzicht te krijgen in de effecten van zeespiegelstijging en maatregelen op de morfologische ontwikkeling en vertroebeling. De resultaten laten zien dat (1) de berekende import van sediment (zonder zeespiegelstijging) overeenkomt met historische sedimentimport (berekend op basis van volumeveranderingen verkregen uit oude

## Titel

Hydromorfologische ontwikkeling Eems-Dollard

<b>Project</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Pagina's</b>
11202245-000	11202245-000-ZKS-0011	<b>88</b>

kaarten), (2) de zandige delen van het estuarium binnen de beschouwde periode nauwelijks meegroeien met de zeespiegelstijging, omdat onvoldoende zand het estuarium in wordt getransporteerd; (3) de slibrijke gebieden wel meegroeien, omdat aanslibbing vooral gestuurd wordt door accommodatieruimte en aanvoer van slib niet beperkend is; (4) ook de bodemdaling (als gevolg van de gaswinning) nauwelijks gecompenseerd wordt, en (5) slibonttrekking een sterk reducerend effect heeft op de slibconcentratie, maar tot weinig morfologische veranderingen leidt waardoor het effect van onttrekken op de slibconcentratie nauwelijks veranderd in de tijd.

Het ontwikkelde modelinstrumentarium is een aanzienlijke verbetering ten opzichte van de eerdere modelversie (Deltares, 2017a) vanwege een realistischer waterbeweging, golfwerking, opbouw van de bodem, en slibtransportparameters. Het model blijft echter een aantal tekortkomingen houden, gerelateerd aan (1) de onderschatting van de slibconcentraties in de Eems Rivier, (2) te diepe en te rechte geulen, en (3) morfologische instabiliteit bij open randen. Deze tekortkomingen zijn deels het gevolg van de roosterresolutie. Een verfijning van het rekenrooster leidt echter tot zeer lange rekentijden bij het doorrekenen tot 2050 of zelfs 2100.

Potentiële modelverbeteringen zijn vooral gelegen in het verfijnen van het rooster in bv het lokale Dollardmodel of om kortere periodes door te rekenen, en het verbeteren van de interactie tussen de Eems-rivier en het Eems-estuarium n.a.v. de resultaten van de recent uitgevoerde meetcampagnes. Het voorspellen van de effecten van zeespiegelstijging blijft altijd met onzekerheid omgeven. Om de betrouwbaarheid van de in dit rapport gepresenteerde resultaten te vergroten zal in een vervolg onderzoek naar de geomorfologische ontwikkeling en verandering van bodemsamenstelling in de afgelopen decennia uitgevoerd worden

## Referenties

KPP code WR07

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	Februari 2019	Bas van Maren		Zheng Bing Wang		Frank Hoozemans	
2.0	Oktober 2019	Bas van Maren		Zheng Bing Wang		Frank Hoozemans	
3.0	December 2019	Bas van Maren Reinier Schrijvershof Julia Vroom		Zheng Bing Wang		Toon Segeren	

## Status

definitief

## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Projectdoelstelling	1
1.2 Aanpak	3
1.3 Leeswijzer	3
<b>2 Optimalisatie modelopzet</b>	<b>5</b>
2.1 Inleiding	5
2.2 Randvoorwaarden	5
2.2.1 Probleemstelling	5
2.2.2 Verbetering	6
2.2.3 Resultaten	6
2.3 Implementatie erosieresistente lagen	9
2.3.1 Probleemstelling	9
2.3.2 Verbetering	10
2.3.3 Resultaten	12
2.4 Golfmodellering	17
2.4.1 Probleemstelling	17
2.4.2 Verbetering via Mormerge	17
2.5 Slibmodellering LZS	21
2.5.1 Probleemstelling	21
2.5.2 Verbetering	21
2.5.3 Effect van de verbetering	23
2.6 Slibmodellering D3S: uitschuring Eems rivier	27
2.6.1 Probleemstelling	27
2.6.2 Verbetering	27
2.6.3 Effect van de verbetering	28
2.6.4 Conclusie	32
2.7 Dollard model	32
2.7.1 Verbetering	33
2.7.2 Resultaat	35
2.8 Samenvatting morfodynamische modellen	36
<b>3 Modelresultaten: hindcast</b>	<b>41</b>
3.1 Lange termijn	41
3.1.1 Introductie	41
3.1.2 Grootschalig gedrag geulen	41
3.1.3 Geuldimensies en plaatareaal	43
3.2 Middellange termijn validatie	44
3.2.1 Introductie	44
3.2.2 Morfologische ontwikkeling	44
3.3 Conclusies	49
<b>4 Modelresultaten: voorspelling</b>	<b>51</b>
4.1 Introductie	51
4.2 Autonome ontwikkeling	53
4.2.1 Morfologische veranderingen Eems estuarium (LZS model)	53
4.2.2 Veranderingen in slibconcentratie (D3S model)	56

4.3	Effect zeespiegelstijging en bodemdaling	59
4.3.1	Morfologische veranderingen Eems estuarium (LZS model)	59
4.3.2	Morfologische veranderingen Dollard (Dollard model)	62
4.3.3	Veranderingen in slibconcentratie (D3S model)	68
4.4	Effect van baggeren en storten	72
4.4.1	Morfologische veranderingen Eems-estuarium (LZS model)	72
4.4.2	Veranderingen in slibconcentratie (D3S model)	74
4.5	Conclusies	76
<b>5</b>	<b>Model interpretatie</b>	<b>79</b>
5.1	Geschiktheid modelinstrumentarium	79
5.1.1	Modelverbeteringen	79
5.1.2	Transport door de geulen	80
5.1.3	Meegroeien met de zeespiegelstijging	81
5.1.4	Geschiktheid voor doorrekenen van maatregelen	83
5.2	Systeemgedrag	83
<b>6</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>85</b>
<b>7</b>	<b>Referenties</b>	<b>87</b>



# 1 Inleiding

## 1.1 Projectdoelstelling

De ambitie van het Rijk en de Regio is dat de Eems-Dollard in 2050 voldoet aan het ecologische 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 het Meerjarig Adaptief Programma Eems-Dollard 2050 (ED2050). Een onderdeel binnen ED2050 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).

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 2017 is een eerste versie van het LZS model ontwikkeld (Deltares, 2017a), en is een bestaand slibmodel aangepast tot het D3S model (Deltares, 2017b). Met deze instrumenten is het effect van maatregelen doorgerekend (Deltares, 2017c).

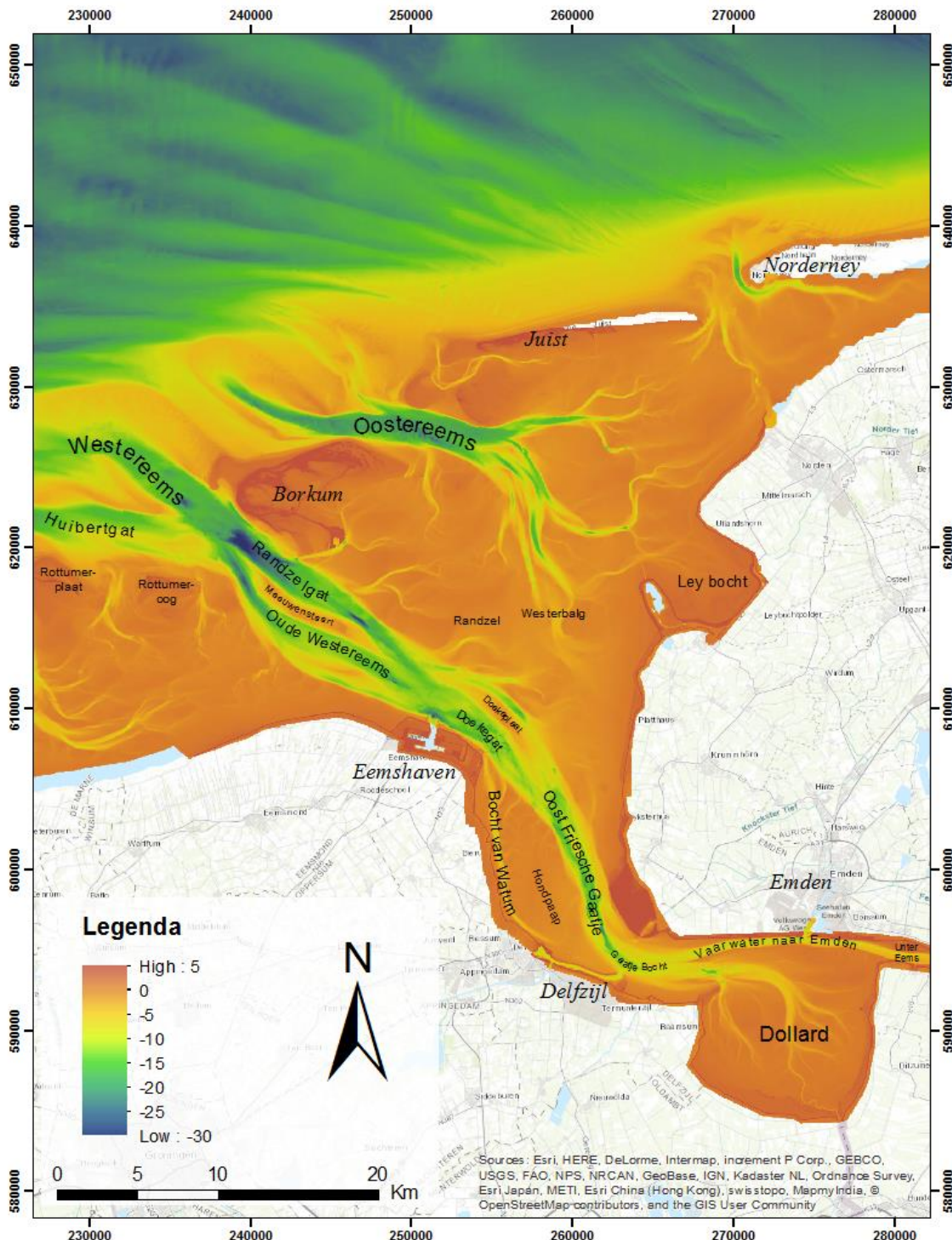
De opgaven voor 2018 zijn als volgt:

- het verbeteren van het LZS-model op basis van aanbevelingen opgenomen in Deltares (2017c)
- het berekenen van de historische ontwikkeling van het Eems estuarium op korte en lange tijdschalen
- het voorspellen van de morfologische ontwikkeling van en vertroebeling in het estuarium als gevolg van de autonome ontwikkeling en de invloed van zeespiegelstijging, bodemdaling, en van baggeren en storten.

De belangrijkste tekortkomingen van het LZS model zoals gerapporteerd in Deltares 2017a en 2017b zijn als volgt

- Het slib is te mobiel, waardoor er te weinig sediment bezinkt in de Dollard, de havens en de bocht van Watum (zie Figuur 1.1 voor naamgeving van de belangrijkste morfologische eenheden in het estuarium). Deze tekortkoming was het gevolg van het niet modelleren van golven: zonder golven kan snel bezinkend slib niet van de Noordzee modelrand richting het estuarium worden getransporteerd. Dit is opgelost door (1) een golf module toe te voegen, en (2) de modelparameters voor slibtransport aan te passen.
- De geulen snijden te diep in. Dit is aangepast door een harde lagen kaart, ontwikkeld door Pierik et al. (2018), in te bouwen.
- De mondingsgeulen (Westereems, Huibertgat) verzanden. De hypothese was dat dit het gevolg was van een fout in de fase tussen het horizontale en verticale getij, waardoor de aanstroomrichting tijdens het vullen en ledigen van het Eems estuarium niet juist was. Om dit op te lossen zijn nieuwe randvoorwaarden afgeleid.

- Baggeren en storten vond plaats ten opzichte van een vast referentievlak, waardoor het niet beïnvloed werd door de zeespiegelstijging. Dit is opgelost door zeespiegelstijging te modelleren als bodemdaling.



Figuur 1.1 Bodemligging van het Eems estuarium in 2005 met de naamgeving van de belangrijkste platen en geulen.

## 1.2 Aanpak

De verschillende modellen zijn zoveel mogelijk in chronologische volgorde ontwikkeld (eerst lange termijn hindcast, gevolgd door middellange termijn hindcast, daarna de voorspelling, en pas daarna D3S slibmodellering). Vanuit praktisch oogpunt is de modelontwikkeling echter deels een iteratief proces gebleken, waarbij ervaringen opgedaan tijdens de voorspelling en D3S modellering weerslag hadden op de hindcast ontwikkeling.

De modelontwikkeling en duiding zijn tot stand gekomen in overleg binnen de expertgroep HV. Binnen deze groep wordt het hier ontwikkelde model gezien als het meest realistisch binnen de huidige modelmatige mogelijkheden. Deze expertgroep komt elke 2 tot 3 maanden bij elkaar om de voortgang te bespreken, en bestaat uit de volgende personen:

Rijkswaterstaat	Wouter Iedema, Charlotte Schmidt, Herman Mulder, Almer de Swaaf
Universiteit Utrecht	Maarten Kleinhans, Harm-Jan Pierik
RHDHV	Petra Dankers
Deltares	Reinier Schrijvershof, Julia Vroom, Bas van Maren

## 1.3 Leeswijzer

Deze rapportage bestaat uit vier hoofdonderdelen: modelverbetering, kalibratie morfologie, voorspelling en interpretatie.

De modelverbeteringen worden puntsgewijs besproken in Hoofdstuk 2. Met het verbeterde modelinstrumentarium is vervolgens een hindcast uitgevoerd (Hoofdstuk 3). Deze hindcast heeft twee doelen: allereerst dient het als een modelkalibratie (waarbij parameters worden gewijzigd totdat de berekende bodemliggingsveranderingen zo goed mogelijk overeenkomen met gemeten bodemliggingsveranderingen). De berekende bodemliggingsveranderingen geven ook veel nuttige inzichten in de historische ontwikkeling van het gebied. Binnen deze studie zijn hindcasts uitgevoerd op twee tijdschalen: over een lange termijn (eeuwen) en over een middellange termijn (decades). De lange termijn hindcast is uitgevoerd in een geïdealiseerde omgeving; de middellange termijn hindcast in een realistische omgeving (een gemeten historische bodem).

Het model zoals gebruikt voor de middellange termijn hindcast wordt vervolgens gebruikt om de morfologische autonome ontwikkeling te voorspellen voor 2050 (Hoofdstuk 4). Het jaar 2050 is gekozen als voorspellingstermijn omdat het morfologisch gedrag tot aan deze periode met voldoende nauwkeurigheid kan worden voorspeld. Voor deze autonome ontwikkeling wordt een zeespiegelstijgingsscenario van 28 cm tot aan 2050 en huidig bagger en stortbeleid aangehouden. Bovendien wordt ook een aantal alternatieve ontwikkelingen doorgerekend en besproken, gerelateerd aan zeespiegelstijging en baggeren en storten. Vervolgens worden de berekende bodems en bagger en stortstrategieën gebruikt in het D3S-slibmodel, om een voorspelling te doen van veranderingen in vertroebeling in 2050. In dit hoofdstuk worden modeluitkomsten besproken, maar nog niet geïnterpreteerd en beoordeeld. De interpretatie volgt in hoofdstuk 5, waarin ook wordt ingegaan op de betrouwbaarheid van de ontwikkelde modellen en systeemkennis die de modellen opleveren. Conclusies en aanbevelingen worden gegeven in Hoofdstuk 6.



## 2 Optimalisatie modelopzet

### 2.1 Inleiding

In deze studie zijn drie modellen aangepast (lange termijn hindcast LZS, forecast LZS, en D3S), en zijn 2 modellen ontwikkeld (Middellange termijn hindcast LZS- en het Dollard-model). Deze aanpassingen en ontwikkelingen worden in de hiervolgende paragrafen besproken.

De meeste verbeteringen in de morfologiesche modellering (randvoorwaarden, harde lagen, golfforcering, en slibinstellingen) zijn in alle versies van het LZS-model toegepast. De berekeningen over een periode van 800 jaar bleek echter niet stabiel in combinatie met Mormerge en aangepaste slibinstellingen (zoals toegepast voor de middellange termijn en de forecast). Daarom zijn de lange termijn LZS-berekeningen uitgevoerd met de modelinstellingen voor golven en het sedimenttransport uit Deltares (2017a). Bij de interpretatie van de modelresultaten moet met deze verschillen rekening gehouden worden: dit leidt vooral tot verschillen in de ontwikkeling van de buitendelta (effect golven belangrijk) en de Dollard (effect slibeigenschappen).

### 2.2 Randvoorwaarden

#### 2.2.1 Probleemstelling

De randvoorwaarden van het morfologische model (LZS) dat in 2017 is opgezet, bestaan uit een harmonisch signaal dat is opgebouwd uit de combinatie van enkele astronomische componenten. Deze configuratie levert een hydrodynamische forcering die representatief is voor de condities op de lange termijn. Hierdoor is deze manier van forceren goed te combineren met een morfologische acceleratiefactor voor langjarige morfologische berekeningen. Het signaal is op de kustdwarse randen opgelegd als een Neumann signaal; een type randvoorwaarde dat het waterstandsverhang voorschrijft dat ontstaat door de voortplanting van de getijgolf. Op de kustparallelle rand wordt een waterstand voorgeschreven. De combinatie van deze typen randvoorwaarden geven een stabiele forcering bij morfologische berekeningen omdat de waterstand (voor de kustdwarse randen) en de stroomsnelheid (alle randen) vrij te bepalen zijn door het model. Een probleem is echter dat het lastig is om randvoorwaarden te genereren welke goed werken voor een morfologisch model (Neumann astronomisch) maar ook de waterbeweging voldoende nauwkeurig representeren (waarvoor tijdseries veel nauwkeuriger zijn). In deze sectie worden de harmonische Neumann randvoorwaarden verbeterd aan de hand van tijdserie randvoorwaarden.

De waarden van de astronomische componenten (amplitude en fase) zijn bepaald vanuit de berekeningen van een hydrodynamisch model dat de Nederlandse kustzone simuleert (Kuststrook Fijn<sup>1</sup>). Als forcering is een combinatie van de  $M_2$ ,  $S_2$  en  $M_4$  componenten gebruikt. Een uitgebreidere beschrijving en de waarden van de componenten staat weergegeven in Deltares (2017a).

Tijdens de morfologische hindcast van het Eems estuarium en haar monding (Deltares, 2017a) is gebleken dat het gesimuleerde geulenpatroon een verschil laat zien in de oriëntatie van de geulen in vergelijking met de werkelijkheid. De geulen Oostereems en Westereems zijn overheersend NW-ZO georiënteerd (Figuur 1.1) maar worden door het model in een sterk N-Z

<sup>1</sup> <https://www.helpdeskwater.nl/publish/pages/131723/kuststrook-fijn-1999-v4.pdf>

gerichte oriëntatie gesimuleerd. De oorzaak van dit verschil wordt toegeschreven aan een afwijking in de gemodelleerde stroming op de Noordzee ten opzichte van het werkelijke overheersende kustparallele stromingspatroon. De afwijking betreft een faseverschil in de stroming.

### 2.2.2 Verbetering

De randvoorwaarden voor het morfologische model zijn opnieuw afgeleid om de fase van de stroming op de Noordzee te verbeteren. De randvoorwaarden zijn dit maal afgeleid vanuit het DCsMv6ZUNOV4 model (Zijl et al., 2013; Zijl et al., 2015). Dit model simuleert de waterbeweging, geforceerd door het getij en meteorologische invloed, voor het gehele noordwestelijke deel van het Europese continentaal plat. Door middel van een door Deltares ontwikkelde nesting-tool kan de informatie vanuit de resultaten van het DCsMv6ZUNOV4 model rechtstreeks naar de randen van het LZS domein geïnterpoleerd worden. Op deze manier zijn er configuraties van verschillende typen randvoorwaarden afgeleid voor het LZS model waarbij de configuratie met Neumann forcering op de kustdwarse randen en een waterstand op de kustparallele rand het beste resultaat (stromingspatroon) gaf. De configuratie van randvoorwaarden is daarmee gelijk aan voorheen met als belangrijk verschil dat de waarden van de astronomische componenten dit maal niet uniform over de randen zijn opgelegd en er dus wel variatie in amplitude en fase langs de randen is. Daarnaast zijn de astronomische componenten die worden opgelegd uitgebreid met de  $MS_4$  component zodat de juiste ondiepwatercomponenten ( $M_4$  en  $MS_4$ ) horende bij de hoofdcomponenten van het getij ( $M_2$  en  $S_2$ ) worden gesimuleerd.

Het effect van de aangepaste randvoorwaarden wordt in dit hoofdstuk beschreven. In Tabel 2.1 zijn de naamgeving en details van vier configuraties van randvoorwaarden weergegeven voor het LZS model als mede het DCsMv6ZUNOV4 model. De figuren in dit hoofdstuk maken gebruik van de naamgeving in de tabel.

Tabel 2.1 Configuraties van randvoorwaarden voor het LZS model.

Naam	Type randvoorwaarde	Origineel model
ZUNO	NVT (geen nesting)	NVT (geen nesting)
ZT (2017)	Waterstand Tijdserie	Kuststrook fijn
NA (2017)	Neumann Astronomische componenten ( $M_2S_2M_4$ )	Kuststrook fijn
NT (2018)	Neumann Tijdserie	DCsMv6ZUNOV4
NA (2018)	Neumann Astronomische componenten ( $M_2S_2M_4MS_4$ )	DCsMv6ZUNOV4

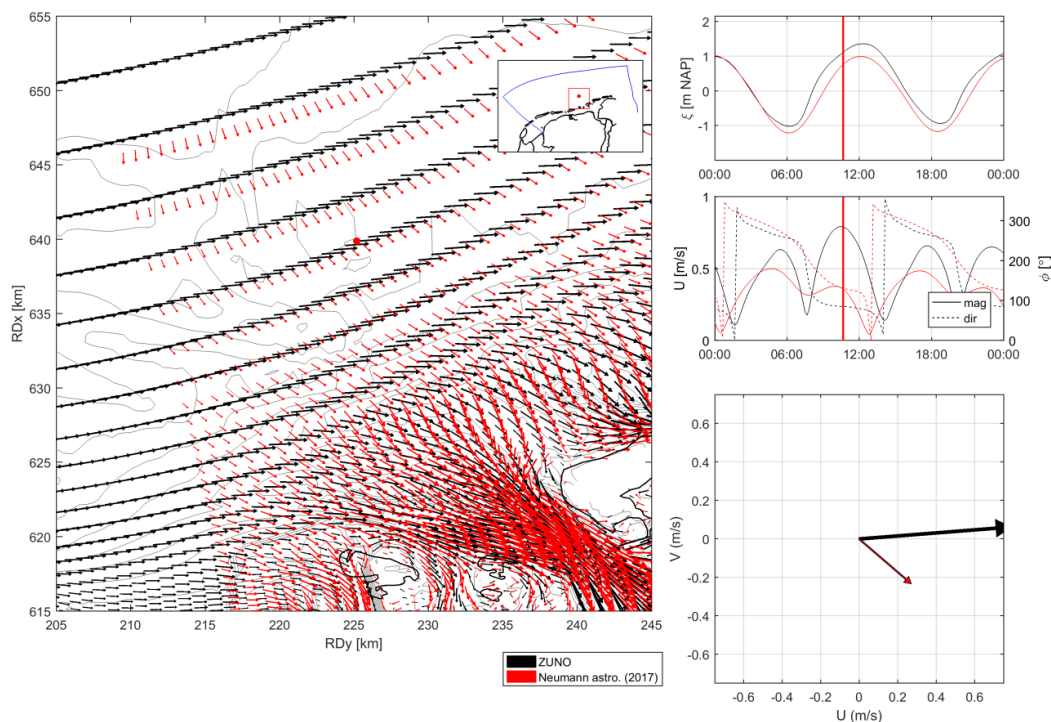
### 2.2.3 Resultaten

De snelheidsvectoren op een moment van maximale vloedstroming zijn in Figuur 2.1 weergegeven voor het ZUNO model (zwart) en het LZS model met de NA (2017) randvoorwaarden (rood). Uit de figuur wordt duidelijk dat de stroming gemodelleerd door het LZS model sterk afwijkt van het ZUNO model. De richting van de vectoren is op het moment van maximale vloedstroom zuidelijk gericht en het moment van maximale stroming en kentering komt niet overeen met het ZUNO model. In Figuur 2.2 is eenzelfde figuur weergegeven waarbij de rode vectoren en curven het LZS model voorstellen met de NA (2018) randvoorwaarden. De snelheidsvectoren op de Noordzee komen hier wel goed overeen met het ZUNO model. Echter, in het panel rechtsboven blijkt dat de waterstand en de stromingsmagnitude ook met deze randvoorwaarden nog iets afwijken van het ZUNO model. Dit is te verklaren door

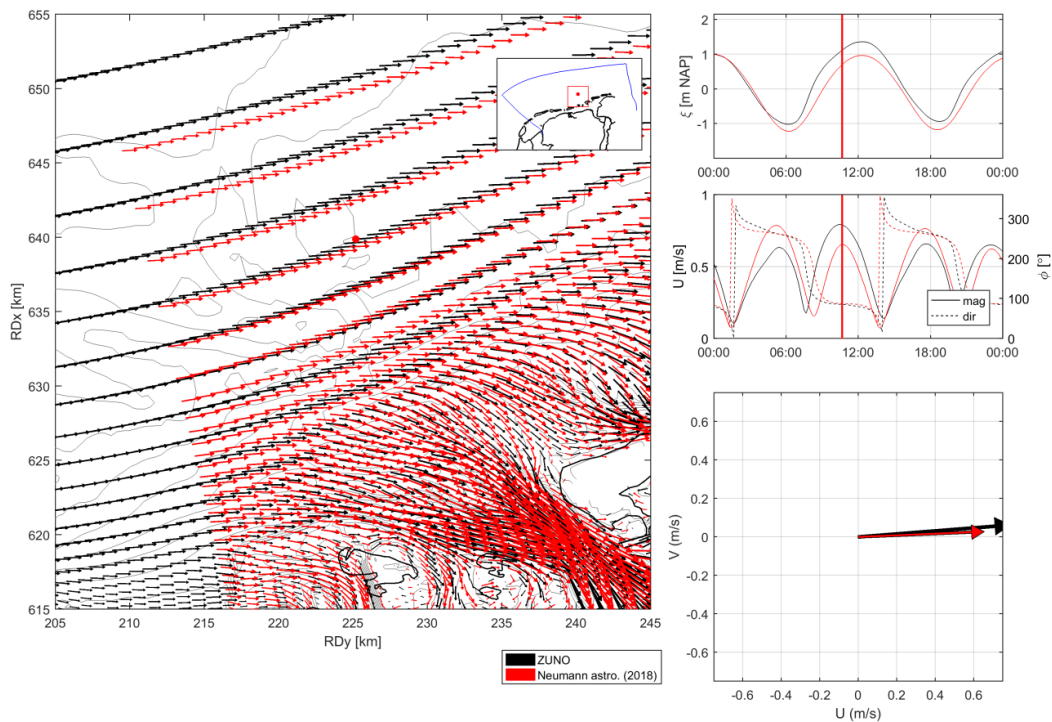
1. De waterstand en stroming gesimuleerd door het ZUNO model is gedreven door het getij en meteorologische condities (b.v. stormopzet), het LZS model rekent alleen met een getijforcering.

2. De opgelegde ruwheid (en ruwheidsimplementatie) verschilt tussen de twee modellen.
3. De locatie (en daarmee de waterdiepte) van de waterstand- en stromingsinformatie in het LZS model is niet exact dezelfde als in het ZUNO model doordat een ander rekenrooster wordt gebruikt.

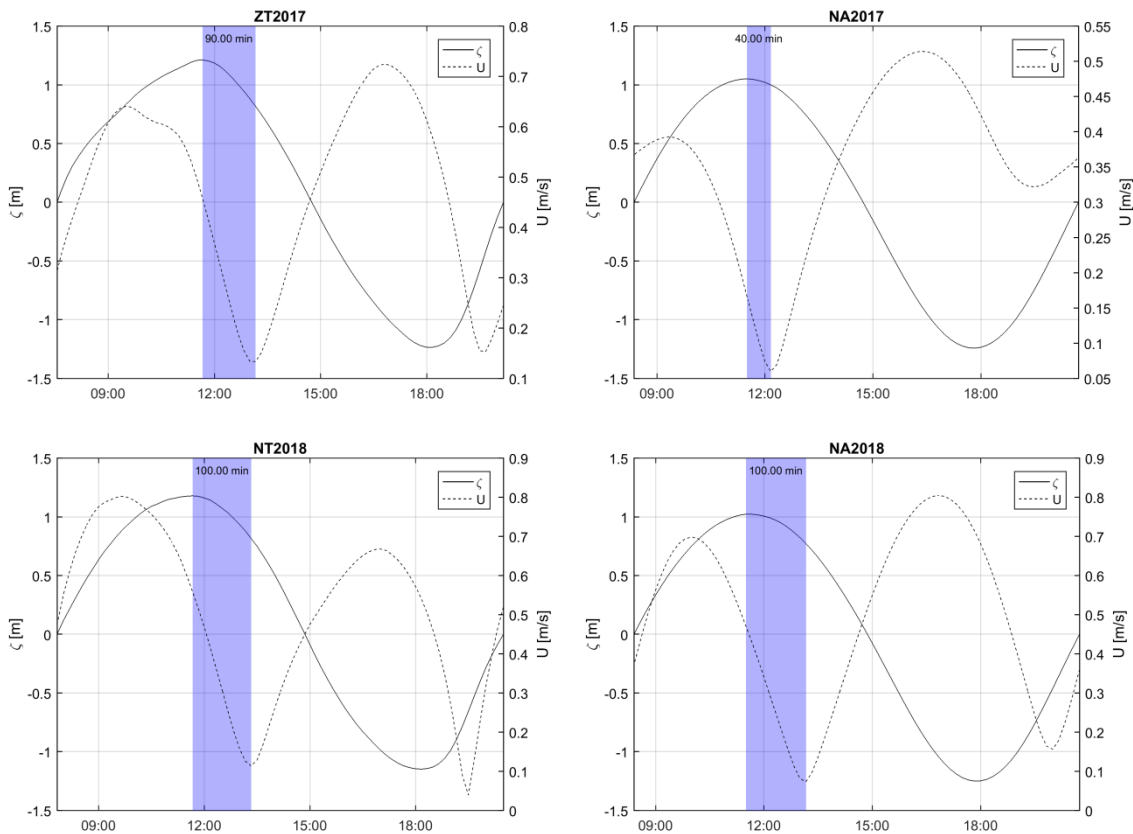
De verbetering van het model wordt verder verduidelijkt aan de hand van de fasering van de stroming op de Noordzee (Figuur 2.3). De LZS modellen met de ZT (2017) en NT (2018) randvoorwaardeconfiguraties simuleren de waterbeweging geforceerd door het getij en meteorologische invloed. Het resultaat van deze modellen komt daardoor het best overeen met die van het ZUNO model. In het model met de NA (2017) randvoorwaarden is het faseverschil tussen het moment van maximale waterstand en kentering (geen stroming) kleiner dan in de andere modellen; het getij krijgt hier meer het karakter van een staande golf. In het model met de NA (2018) randvoorwaarden is het faseverschil nagenoeg gelijk aan de modellen waarbij de volledige forcering is gebruikt (ZT (2017) en NT (2018)). Omdat de ZT (2017) en NT (2018) randvoorwaarden als het meest nauwkeurig worden beschouwd, wordt geconcludeerd dat NA (2018) een betere astronomische randvoorwaarde is dan NA (2017).



Figuur 2.1 Het ZuNo model (zwart) en het NA (2017) LZS model (rood) tijdens maximale vloedstroming.



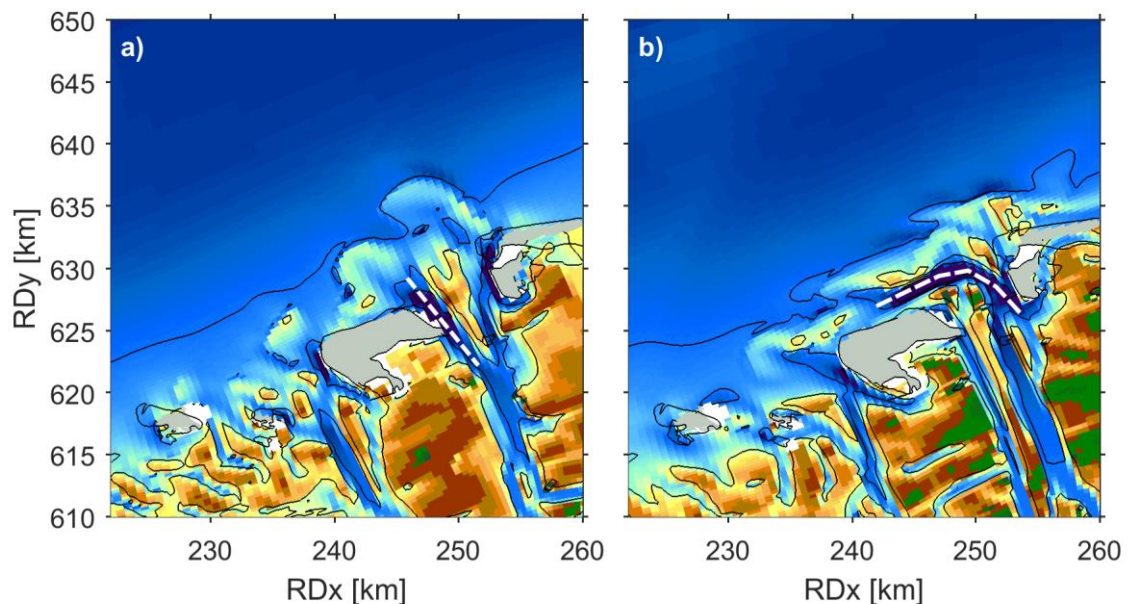
Figuur 2.2 Het ZuNo model (zwart) en het NA (2018) LZS model (rood) tijdens maximale vloedstroming.



Figuur 2.3 Waterstand en magnitude van de stroming op de Noordzee voor de vier typen randvoorwaarden. Het tijdsverschil tussen het moment van hoogwater en kentering is weergegeven met de blauwe arcering.



Het resultaat van de aangepaste en verbeterde hydrodynamische forcering op de morfologische ontwikkeling is weergegeven aan de hand van de gesimuleerde bodemligging van het mondingsgebied. De morfologie van het mondingsgebied dat door het LZS model met de NA (2017) randvoorwaarden wordt gesimuleerd is weergegeven in Figuur 2.4a en het resultaat met de NA (2018) configuratie in Figuur 2.4b. De Westereems is in deze simulaties nog niet volledig ontwikkeld en de Oostereems is nog de dominante geul. Hoewel de oriëntatie van de Oostereems vergelijkbaar is in beide configuraties, toont de oriëntatie van de geulen in de buitendelta een duidelijke verbetering (i.e. NO-ZW oriëntatie) in het model met de NA (2018) configuratie (aangegeven door middel van de witte stippellijnen). Daarnaast is de vorm van de buitendelta's met de nieuwe randvoorwaarden (Figuur 2.4a) meer kustlangs georiënteerd. Deze vorm komt beter overeen met de werkelijkheid (Figuur 1.1) dan de vorm van de buitendelta's zoals deze met de oude randvoorwaarden werd voorspeld. Wel blijft de oriëntatie van de geulen sterk gestuurd door de oriëntatie van het rekenrooster (de geulen hebben de neiging zicht te ontwikkelen in de lengterichting van het rekenrooster).



Figuur 2.4 Bodemligging van de monding na 800 jaar morfologisch simuleren voor (a) de simulatie met de 2017 Neumann randvoorwaarden en (b) de Neumann randvoorwaarden die in 2018 zijn afgeleid aan de hand van het ZUNO model.

## 2.3 Implementatie erosieresistente lagen

### 2.3.1 Probleemstelling

Numerieke modellen, zoals Delft3D, hebben de neiging de dimensies van geulen in morfologische berekeningen niet goed te simuleren doordat het bodemtransport loodrecht op de stroomrichting wordt onder- of overschat (Baar et al., 2018). In de morfologische lange termijn hindcast modellering (vanaf 1985) van het Eems estuarium uit zich dit in een onrealistisch diepe insnijding van de geulen. Een kalibratie-exercitie aan de hand van de gradiëntfactor voor het dwarsshelling transport ( $\alpha_{Bn}$ ), het simuleren van meerdere (grovere) sedimentfracties en het implementeren van een variabele ruwheid kan echter niet voorkomen dat de geulen alsnog tot een diepte van ongeveer NAP -25 m insnijden, ongeveer 10 m dieper dan in werkelijkheid wordt waargenomen.

Op basis van deze simulaties en de kennis van de ondergrond van Noord-Nederland (Vos en Knol, 2015) is het vermoeden ontstaan dat de ontwikkeling van de geulen in het Eems estuarium in werkelijkheid gelimiteerd wordt door de aanwezigheid van erosieresistente afzettingen in de ondergrond. Dit betreft zeer erosieresistente (glaciale) afzettingen van pleistocene ouderdom (keileem en potklei) en minder erosieresistente afzettingen van holocene ouderdom (veenafzettingen en klei). Tijdens de vorige fase van de morfologische modellering was er nagenoeg geen kennis aanwezig over de verbreiding van deze lagen en de diepte van voorkomen. Om de insnijding van de geulen in het model te verbeteren is er toen een pragmatische aanpak gehanteerd door een erosieresistente laag te definiëren op NAP -15 m binnen het estuarium (landwaarts van Eemshaven). Het niveau NAP -15 m is gekozen op basis van de aanwezigheid van kleilagen in een dwarsdoorsnede door het estuarium (van Delfzijl tot Rysumer Nacken; zie Figuur 3.5 in Deltares, 2017a). Deze dwarsdoorsnede van de ondergrond is afkomstig vanuit het GeoTOP v1.3 model<sup>2</sup>. Het implementeren van een sterk versimpelde schematisatie van erosieresistente lagen in het estuarium op dit niveau leidt tot een redelijke reproductie van de geuldimensies maar nog wel tot een overschatting van de diepte van de geulen binnen het estuarium (voornamelijk in de Dollard).

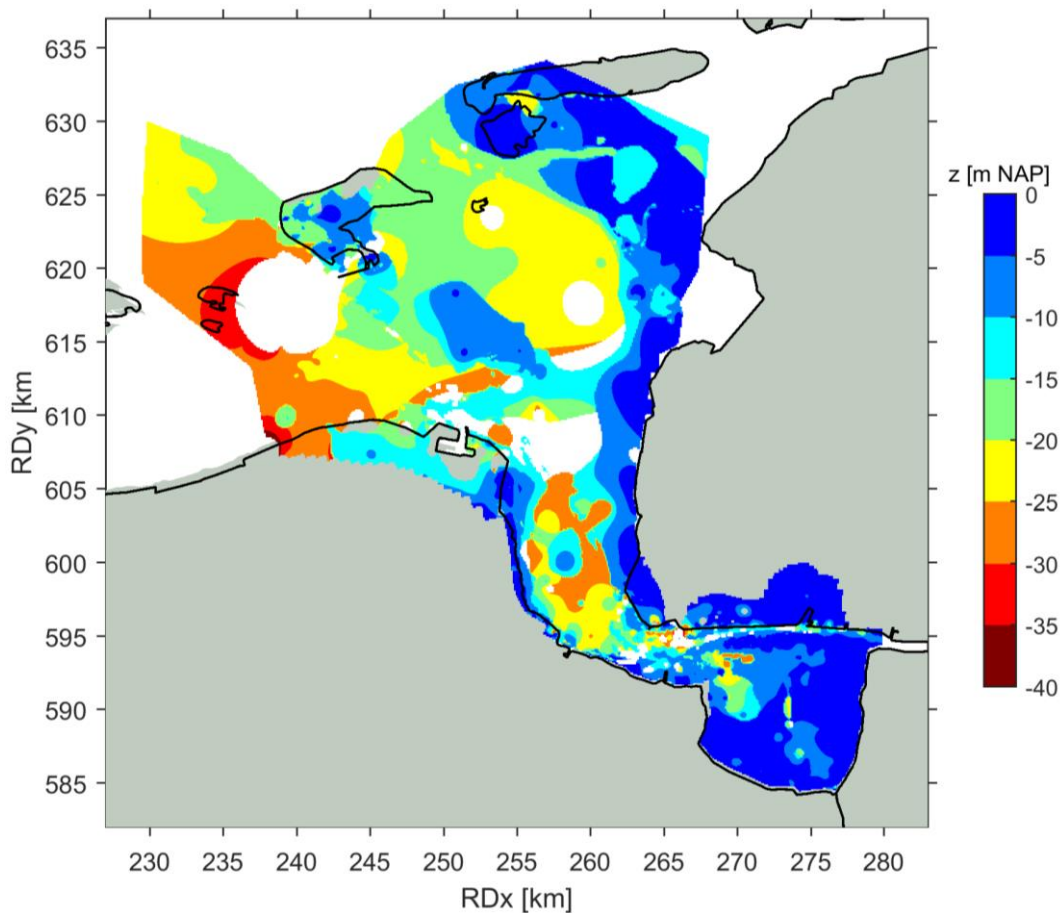
### 2.3.2 Verbetering

Binnen het spoor HV is door Universiteit Utrecht onderzoek verricht naar de aanwezigheid en verspreiding van erosieresistente afzettingen in het Eems estuarium en haar monding. Dit heeft geleid tot gedetailleerde, op boringen gebaseerde, kaarten van de ligging van erosieresistente lagen van zowel pleistocene als holocene ouderdom. De kartering en de verspreiding van de lagen staat beschreven in Pierik et al. (2018). In dit hoofdstuk wordt verder niet op de methode en de resultaten van de kartering ingegaan maar wordt alleen de implementatie van de erosieresistente lagen in het LZS model beschreven en het effect van de verbeterde schematisatie op de modellering getoond. De verspreiding van de ondiepst voorkomende erosieresistente laag is geïmplementeerd in het LZS model, dit is weergegeven in Figuur 2.5.

In het LZS Delft3D model wordt een erosieresistente laag geïmplementeerd door de dikte van het sedimentpakket te definiëren dat beschikbaar is voor erosie. Deze dikte is naast de voorkomensdiepte van erosieresistente lagen (gedefinieerd als diepte beneden NAP) ook afhankelijk van de initiële bodemligging van het model (ook in diepte beneden NAP). Als gevolg is de dikte van het erodeerbare pakket verschillend voor de drie modelschematisaties van het LZS model (lange termijn hindcast, middellange termijn hindcast en de voorspelling) omdat deze verschillende modellen starten met een andere initiële bodemligging. In dit hoofdstuk wordt het effect van de implementatie van de gekarteerde erosieresistente lagen geïllustreerd aan de hand van de resultaten van de lange termijn hindcast.

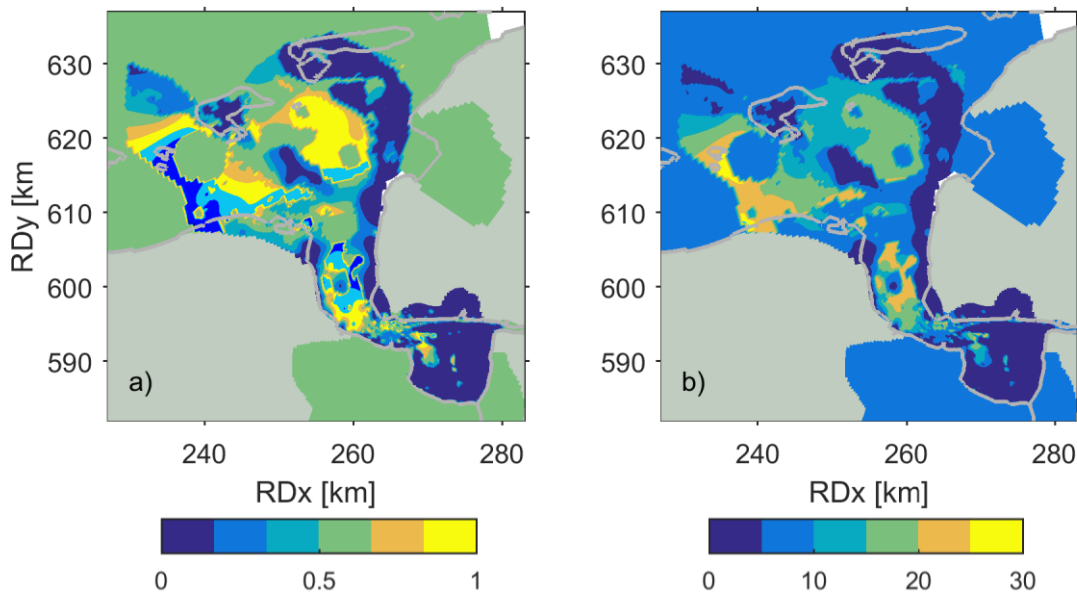
---

<sup>2</sup> [www.dinoloket.nl](http://www.dinoloket.nl)



Figuur 2.5 Ruimtelijke verspreiding van het ondiepste voorkomen van erosieresistente lagen aan het begin van de simulatie. Warmere kleuren geven een grotere diepte aan, een witte kleur geeft aan dat er geen erosieresistente laag wordt opgelegd (niet gevonden in boringen of geen boringen aanwezig).

De dikte van het erodeerbare pakket zoals geïmplementeerd in het lange termijn hindcast model is weergegeven in Figuur 2.6. Op de locaties waar geen informatie bekend is (wit in Figuur 2.6) is een dikte van 10 m aangehouden. Het sediment bestaat uit verticaal uniform verdeeld zand en slib dooruit te gaan van een ruimtelijk uniform volumepercentage (van 5% slib en 95% zand). Dit is een representatieve waarde voor het buitengebied maar erg laag voor het binnengebied (met name de Dollard). Echter, bij een voldoende goed gekalibreerd model zal een belangrijk deel van de aanslibbing in de Dollard door het model getransporteerd worden vanaf de zeewaartse randen, en niet zozeer bepaald door initiële bodemcondities. In Figuur 2.6 is goed te zien dat er in de Dollard, ten oosten van de Oostereems en rondom Borkum weinig sediment beschikbaar is voor erosie. Het is dus te verwachten dat de morfologische ontwikkeling voorspeld door het model juist op deze locaties sterk gestuurd zal worden door de (implementatie van de gekarteerde) harde lagen.



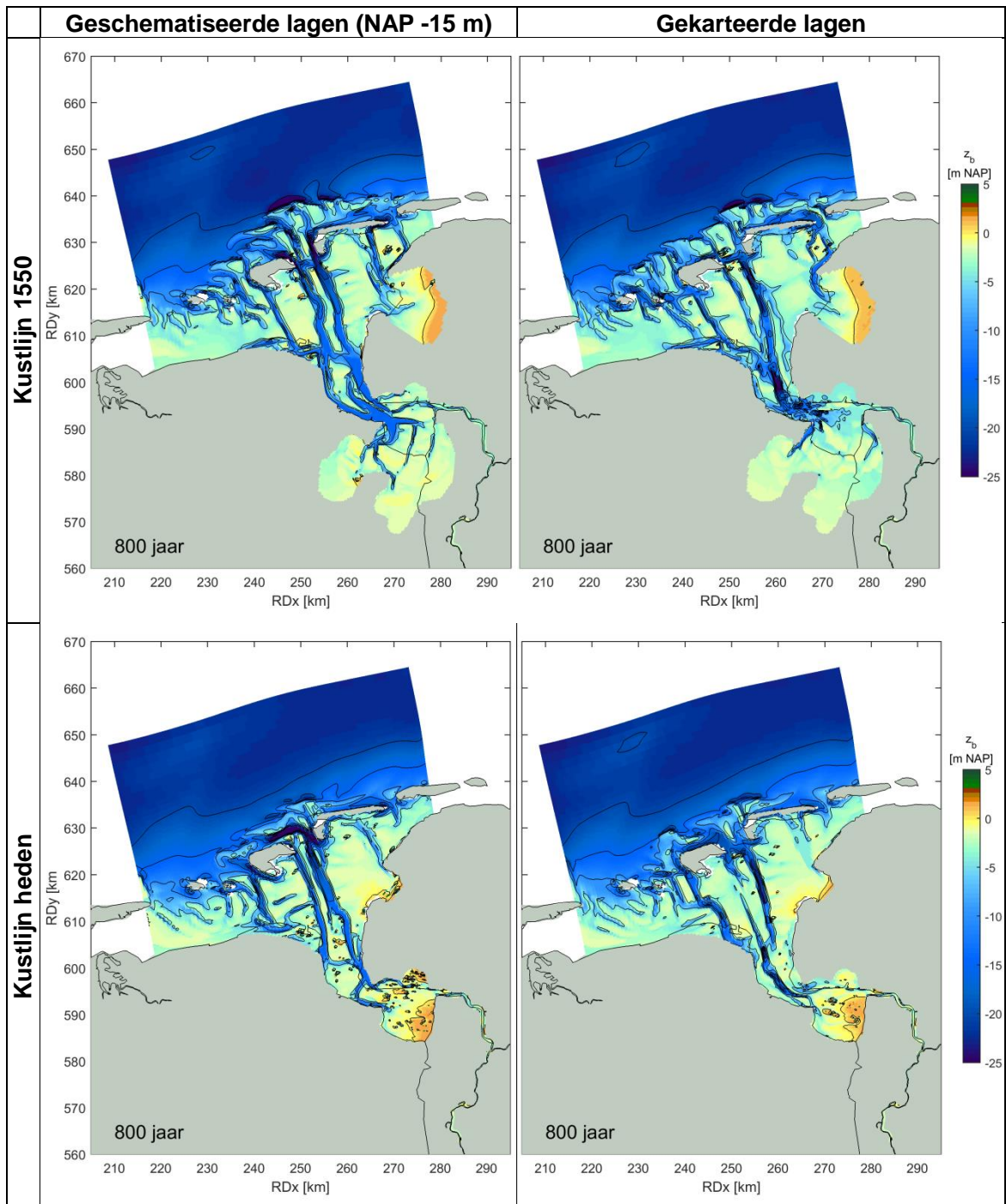
Figuur 2.6 Initiële hoeveelheid slib (a) en zand (b), in meter

### 2.3.3 Resultaten

De bodemligging zoals gesimuleerd door het lange termijn hindcast model (met de nieuwe configuratie van randvoorwaarden, zie §2.1) na 800 jaar morfologisch simuleren is weergegeven in Figuur 2.7. De figuur toont de resultaten voor een simulatie met de schematische harde laag op NAP -15 m (links, zoals in Deltares (2017a)) en de gekarteerde harde lagen (rechts). Daarnaast zijn ook de resultaten getoond van de simulaties met de kustlijn geschematiseerd naar de situatie in 1500 (maximale uitbreiding Dollard en Ley Bocht) en de kustlijn zonder Ley Bocht en uitgebreide Dollard (zie ook Figuur 3.7 in Deltares, 2017a). Het effect van de uitbreiding van het Eemshavengebied is hierin niet meegenomen omdat deze morfologische wijziging recenter is, en daarom geen invloed heeft gehad op de langjarige morfologische ontwikkeling.

De belangrijkste verschillen tussen de simulaties met en zonder de gekarteerde lagen zijn waar te nemen in het centrale gedeelte van het estuarium (tussen Delfzijl en Eemshaven) en in het mondingsgebied rond de eilanden. In het centrale gedeelte van het estuarium zijn geulen met de gekarteerde harde lagen juist dieper ingesneden dan met de schematische harde laag. De harde lagen liggen hier op enkele locaties op een diepte van NAP -25 m (Figuur 2.5) en het model simuleert een insnijding tot aan deze voorkomensdiepte. In het mondingsgebied (ten oosten van Borkum) wordt de insnijding juist gelimiteerd tot ongeveer NAP -20 m door de gekarteerde lagen.

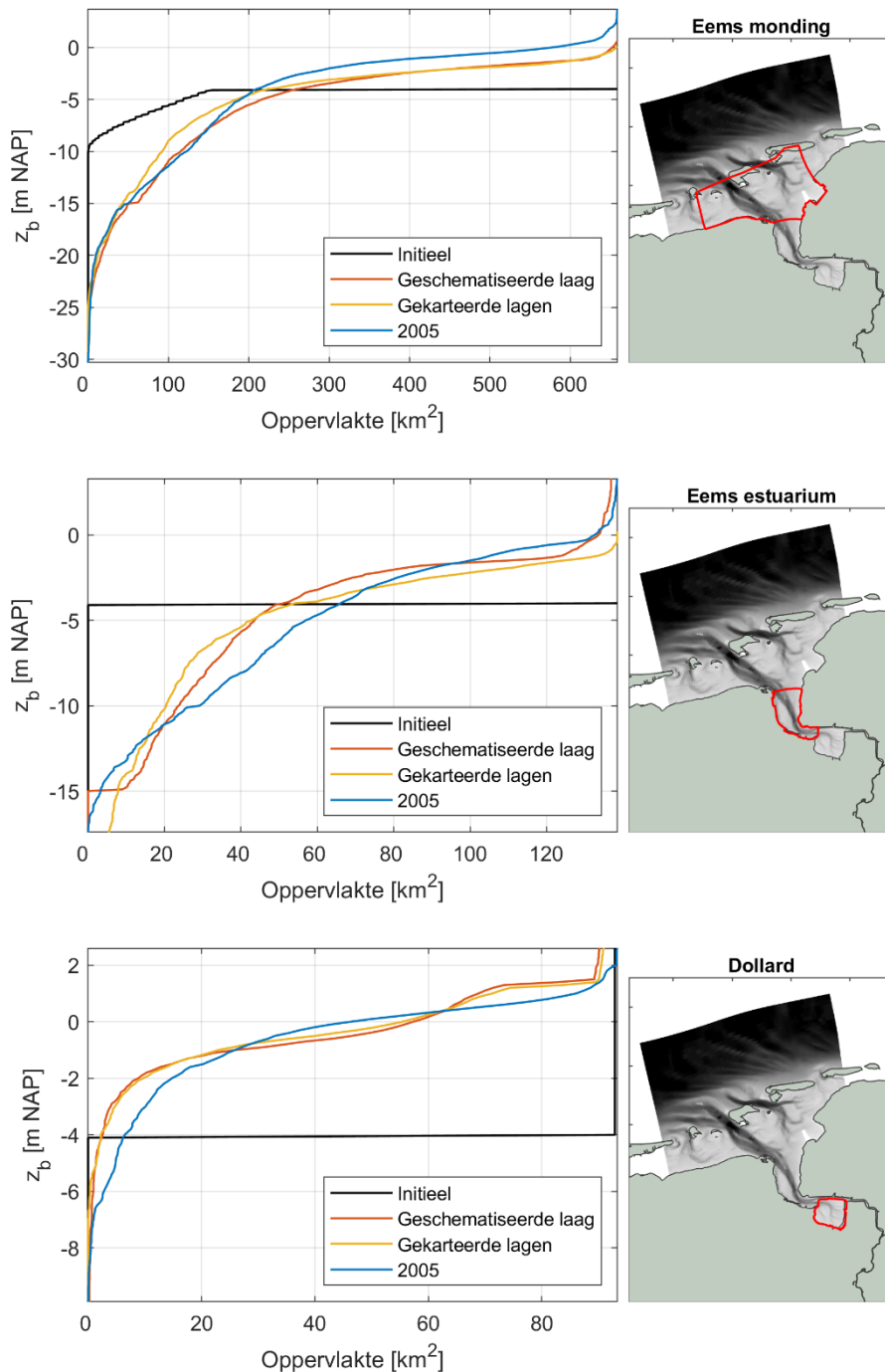
Aan de hand van Figuur 2.7 is verder op te merken dat het relatieve belang van de Westereems ten opzichte van de Oostereems groter is in de simulaties met de gekarteerde harde lagen. Dit is vooral duidelijk te zien in de simulaties met de huidige kustlijn (onderste figuren in Figuur 2.7). Dit wordt in meer detail besproken in Hoofdstuk 3.



Figuur 2.7 Bodemligging na 800 jaar morfologisch simuleren zonder (links) en met (rechts) de gekarteerde harde lagen en met de kustlijn met open (boven) en gesloten (onder) Dollard en Ley Bocht.

De harde lagen leiden niet tot een substantiële verandering in de berekende hypsometrie (Figuur 2.8). Deze hypsometrische curven zijn gemaakt aan de hand van de simulaties met huidige kustlijn. Deze figuur illustreert het uitschuren van diepe gebieden en sedimentatie op platen. In het buitengebied wordt sedimentatie op de platen onderschat. Het lijkt erop dat transportmechanismen richting de platen hier onvoldoende sterk zijn ontwikkeld. Dit is mogelijk het gevolg van de simplificaties in het golfklimaat in combinatie met de slibtransport

parameters: hierdoor wordt aanslibbing op de platen onderschat. Het is niet duidelijk of dit ook betekent dat het zandtransport richting de platen wordt onderschat.

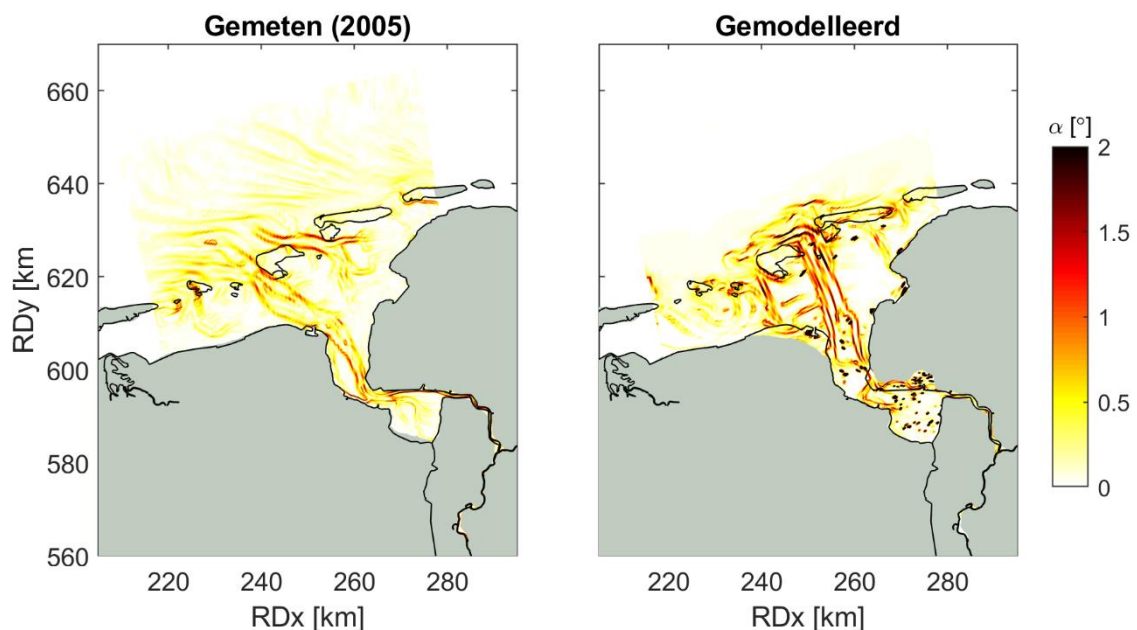


Figuur 2.8 Hypsometrische curven van de gesimuleerde bodemligging met en zonder de gekarteerde lagen.

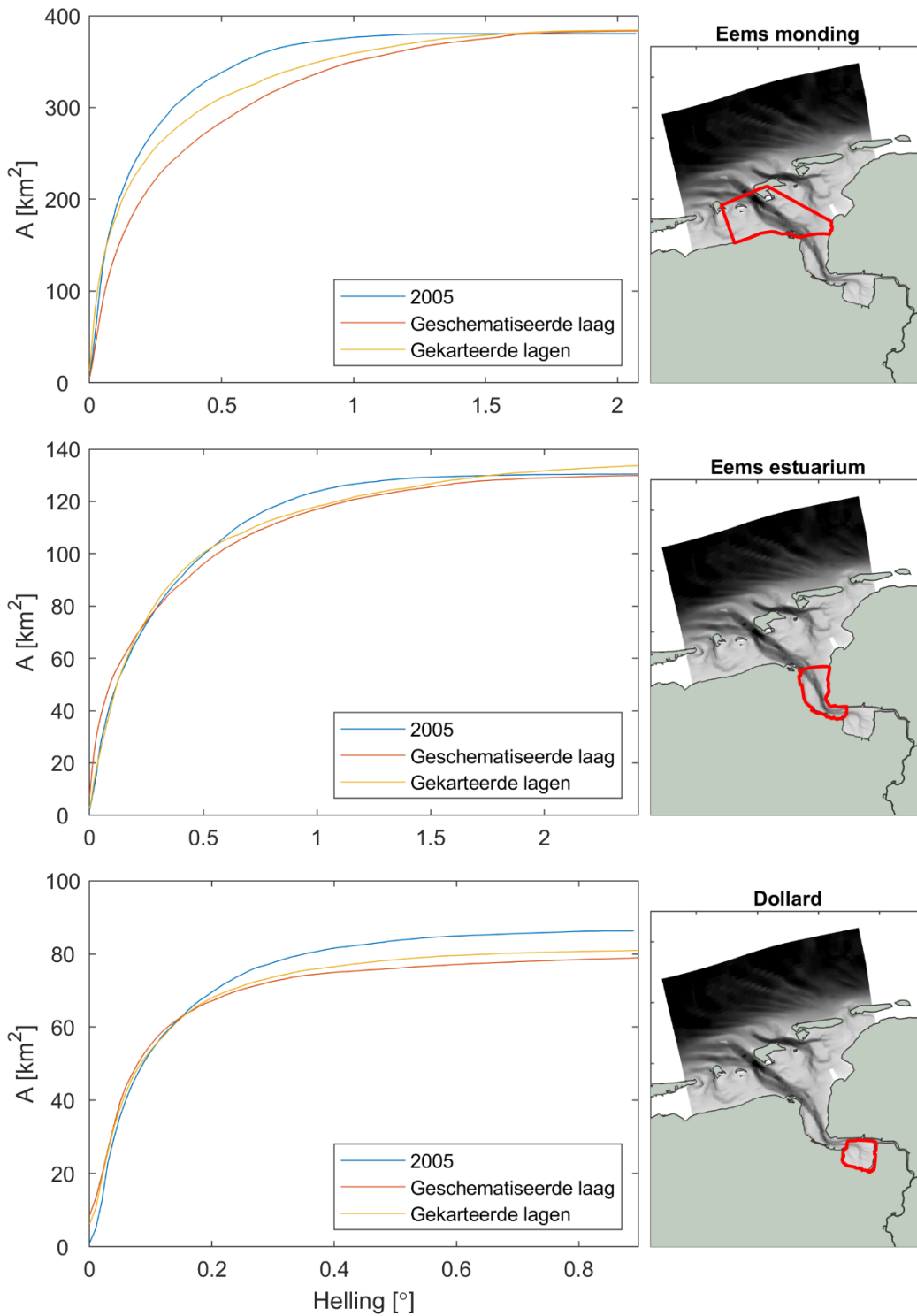
Het meest prominente effect van de gekarteerde lagen is dat het areaal geulen met een diepte tussen de -5 en -15 meter afneemt. Ook in het middengebied neemt het areaal geulen tussen -5 en -15 meter af. Dit draagt mogelijk ook bij aan de afname van sedimentatie boven de -5 meter in het middengebied. Zeker met gekarteerde lagen wordt er te weinig sediment op het intergetijdengebied afgezet. In de Dollard hebben gekarteerde lagen weinig effect ten opzichte

van de geschematiseerde laag. Het areaal geulen wordt onderschat, er is relatief veel laag (tussen -1.5 tot -0.5 m NAP) en hoog (rond de +1 m NAP), maar minder tussenliggend intergetijdengebied. Dit geldt voor zowel de gekarteerde als de geschematiseerde harde lagen. Waarschijnlijk is dit het gevolg van golfwerking in combinatie met de slibinstellingen: in ondiep water genereert het versimpelde golfklimaat relatief hoge golven, terwijl het slib als makkelijk erodeerbaar wordt gemodelleerd.

De geuldimensies zijn in Deltares (2017a) beschreven aan de hand van de hypsometrische curven, zoals ook hier boven weergegeven. Een andere manier om de geuldimensies te analyseren is door de breedte-diepte verhoudingen van de geulen van het estuarium te beschouwen in relatie tot de werkelijkheid. Deze verhoudingen worden geanalyseerd door de helling (steilheid) van de geulwanden te berekenen. Een brede geul heeft hierbij een lage steilheid, een diepe geul een hoge steilheid. In Figuur 2.9 is dit weergegeven voor een modelbathymetrie gebaseerd op de vaklodingen uit 2005 (Figuur 2.9, links) en zoals gesimuleerd door het lange termijn hindcast model (Figuur 2.9, rechts). Omdat de geulen niet op exact dezelfde locatie gelegen zijn is het lastig dergelijke overzichtsfiguren te vergelijken met elkaar. Een cumulatief histogram (vergelijkbaar met de hypsometrische curve) van een gedefinieerd subgebied kan opgesteld worden om het model en de data goed te vergelijken. Deze vergelijking is weergegeven in Figuur 2.10 en toont voor drie subgebieden de cumulatieve steilheidshistogram zoals deze in werkelijkheid voorkomt (2005) en de modelsimulatie met de versimpelde (geschematiseerde) uniforme harde laag en de gekarteerde harde lagen. Uit de figuur is op te maken dat een simulatie met de gekarteerde harde lagen in de Eems monding tot een verbetering leidt, maar dat het effect van de simulatie met harde lagen niet groot is in de Dollard en het centrale gedeelte van het estuarium. Dit suggereert dat harde lagen een beperkter effect hebben in de Dollard dan in de Eems monding.



Figuur 2.9 Steilste helling (in graden) van de gemeten (links) en gemodelleerde (rechts) bathymetrie na 800 jaar rekenen.



Figuur 2.10 Cumulatieve histogrammen van de steilheid van de gesimuleerde bodemligging met en zonder de gekarteerde lagen.



## 2.4 Golfmodellering

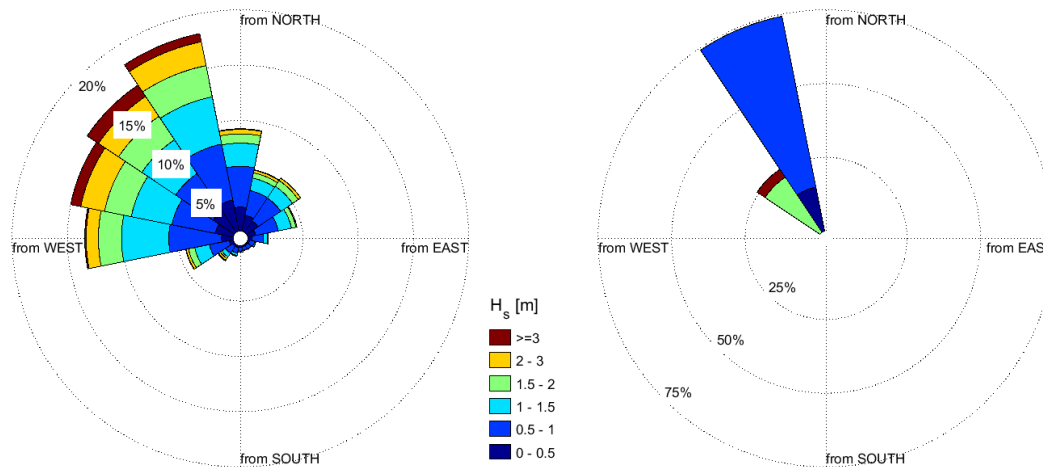
### 2.4.1 Probleemstelling

In de vorige versies van de morfologische modellen zijn golven enkel ruimtelijk uniform of helemaal niet meegenomen. Hierdoor wordt de resuspensie van slib enkel of voornamelijk bepaald door stroming (gedreven door het getij en de wind). Dit terwijl de implementatie van een realistisch golfklimaat resulteert in ruimtelijk variërende verschillen in golfgedreven resuspensie, met sterkere resuspensie aan de Noordzeekusten en minder resuspensie in luwere gebieden achterin het estuarium en in de havens. Door de implementatie van een realistischer golfklimaat veranderen de bodemschuifspanningen en moeten ook de slibeigenschappen worden aangepast. Bij het verbeteren van de morfologische respons van het model gaan daarom de golfmodellering en de slibmodellering hand in hand.

De golfverbeteringen worden besproken in deze paragraaf. De resultaten van deze aanpassing worden besproken in §2.5 (verbeteren slibmodellering).

### 2.4.2 Verbetering via Mormerge

Om binnen acceptabele rekentijden een langjarige morfologische hindcast of voorspelling te kunnen doen, waarbij het effect van golven wordt meegenomen, is gekozen voor de Mormerge aanpak. Hierbij wordt het langjarige golfklimaat (in dit geval zoals gemeten bij boei Schiermonnikoog Noord op de Noordzee) geschematiseerd in een aantal representatieve klassen. Vanwege de rekencapaciteit is gekozen voor 4 golfhoogteklassen. De klassen zijn ingedeeld op basis van golfhoogte, en hebben een bijbehorende golfrichting en –periode en een kans van voorkomen. De golfhoogteklassen zijn gekozen op basis van expert judgement voor het gewenste doel van de golfforcering (opwoeling van slib op de Noordzee en bijv. niet zozeer zandtransport in verschillende richtingen), waarbij de golven zijn ingedeeld op golfhoogte met de volgende klassen: lage forcering ( $H_s$  0-0.5m), gemiddelde forcering die vaak optreedt ( $H_s$  0.5-1.5m) en twee extreme condities ( $H_s$  1.5-3m en  $H_s >3$  m). Voor elke golfmeting is ook een meting van de windsnelheid en -richting beschikbaar bij station Nieuw Beerta (zoals gebruikt voor de stroming). De windsnelheden en –richtingen, behorende bij de golven in elke klasse, worden ook gemiddeld, zodat 4 windklassen worden verkregen. De windrichtingen wijken voor lage windsnelheden en golfhoogtes af van de golfklassen doordat deze lage forcering ook wordt beïnvloed door deininggolven ('swell') die niet gekoppeld is aan lokale windforcering. Daarnaast zijn de golfrichtingen beïnvloed door de geografische ligging van het station, waarbij golven vooral vanuit het noordwestelijke kwadrant komen door refractie en luwte voor golven uit het zuidelijke kwadrant. Dat er voor de wind een meer gespreid klimaat wordt opgelegd, is van belang voor de golven die in het model in het estuarium worden opgewekt. Voor elk van de 4 onderscheiden golfhoogteklassen worden golven aan de modelrand opgelegd, en wordt golfopwekking binnen het model uitgerekend op basis van de bijbehorende windsnelheid en richting. Hierbij zijn 2x2 klassen van de windroos in Figuur 2.11 samengevoegd.



Figuur 2.11 Golfroos in 6 klassen voor Schiermonnikoog Noord waarbij alle metingen tussen 1979 en 2017 zijn meegenomen (links) en schematisatie in 4 golfklassen zoals gebruikt in de Mormerge simulaties (rechts), waarbij 2x2 klassen zijn samengevoegd.).

Tabel 2.2 Golfklassen in Mormerge simulaties

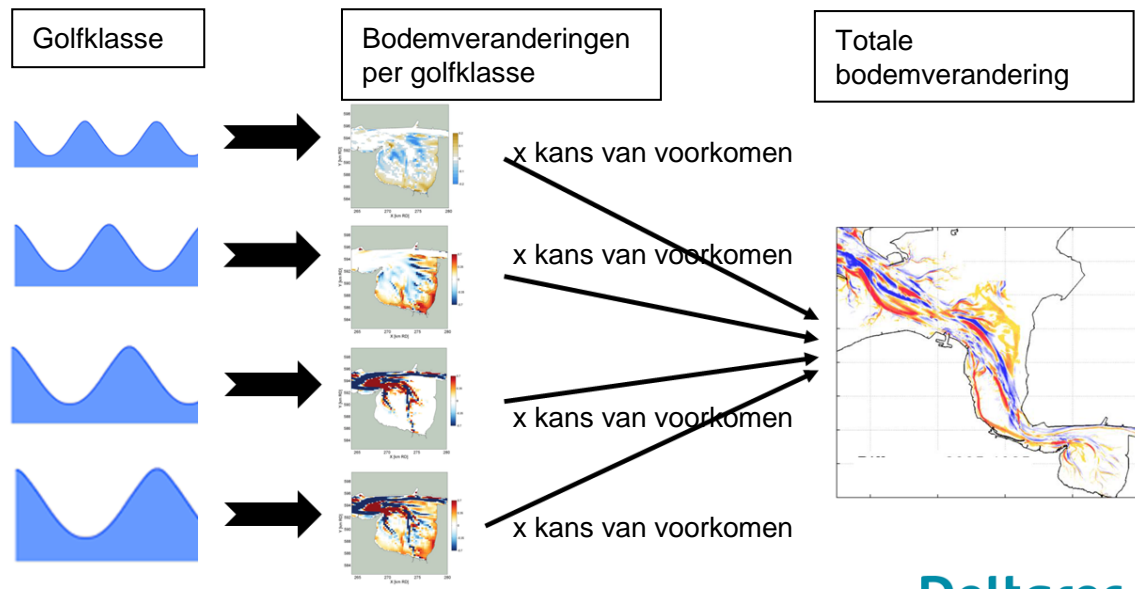
Klasse	Golfhoogte Hs [m]	Richting [graden]	Golfperiode Tm02 [s]	% voorkomen	wind snelheid [m/s]	wind richting [graden]
1	0,36	344	3.8	13	1,64	153
2	0,94	330	4.3	62	1,97	200
3	1,99	316	5.2	22	4,68	278
4	3,83	311	6.8	3	10,68	297

Mormerge is een methodiek binnen Delf3D waarbij per golfklasse parallel een morfologische verandering wordt uitgerekend. Deze bodemveranderingen wordt vervolgens op elke rekentijdstap, op basis van de kans van voorkomen, geïntegreerd tot een totale morfologische verandering (Figuur 2.12). Figuur 2.13 geeft een voorbeeld van de ruimtelijk variërende golfhoogte tijdens de simulatie, met daarin duidelijk hogere golven op de Noordzee en lagere golven in het estuarium.

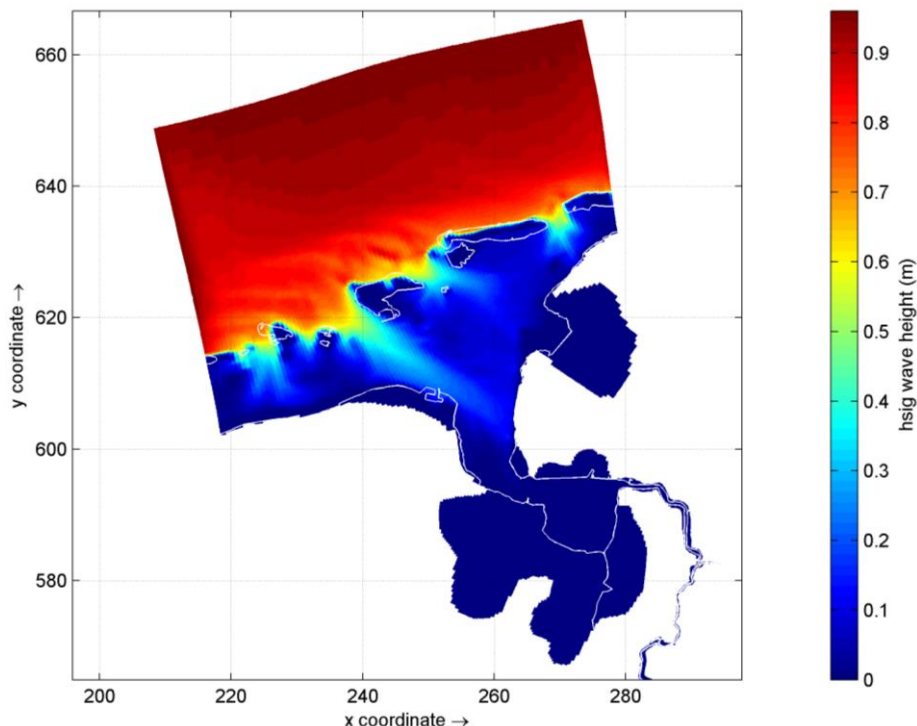
De voordelen van deze Mormerge-aanpak ten opzichte van een aanpak waarin een golftijdserie of golfklimaat serieel wordt doorgerekend zijn:

- minder rekentijd (want efficiënt parallel te berekenen en via Morfac te versnellen)
- morfologisch stabiel resultaat (bij seriële sommen kunnen bepaalde extreme bodemveranderingen lang op een beperkt gebied plaatsvinden, wat tot morfologische instabiliteit kan leiden – bij Morfac worden de bodemveranderingen op elke rekentijdstap gewogen over alle klassen). Deze stabiliteit is verder verhoogd door de 4 parallelle simulaties in een verschillende getijfase te laten rekenen (onderling 3 uur verschoven).
- geen afhankelijkheid van wanneer een bepaald stormevent optreedt (bijvoorbeeld aan het begin of einde van de simulatie)

Daarnaast is het mogelijk per golfconditie ook andere parameters te variëren. Zo is de slibconcentratie (SSC) op de modelranden variabel per golfconditie. Bij stormen is er immers meer sediment in suspensie dan tijdens rustige condities.



Figuur 2.12 Schematische weergave van de mormerge aanpak

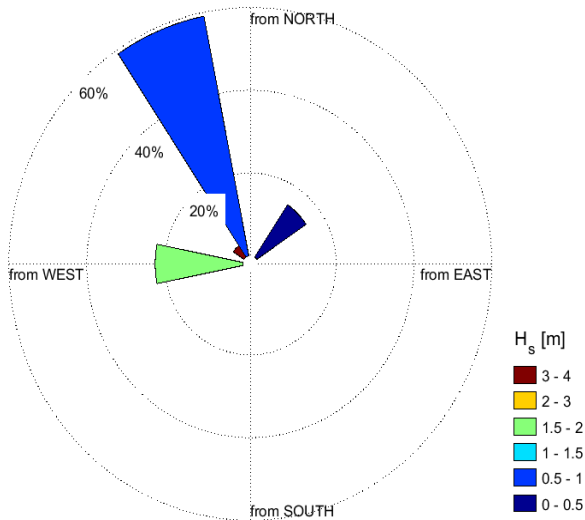


Figuur 2.13 Voorbeeld van ruimtelijk variërende golfhoogte voor golfklasse 2, met de hoogste golven op de Noordzee en lagere golven in het estuarium.

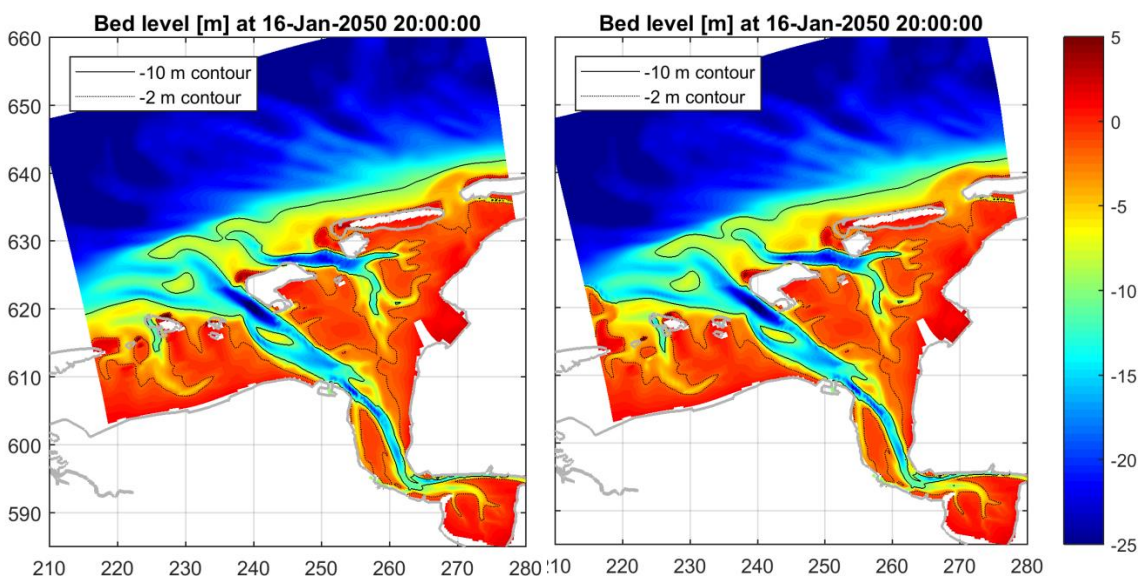
#### Spreiding in het golfklimaat

Het geclassificeerde golfklimaat zoals weergegeven in Figuur 2.11 (rechts) laat zien dat de verdeling van de golfrichtingen erg unidirectioneel is: de golven komen uit ongeveer dezelfde richting. Als een indeling in meer klassen zou worden gemaakt, dan zou een meer gespreid klimaat ontstaan (vergelijk bijvoorbeeld de originele golfroos met de geclassificeerde). Om er achter te komen wat het effect is van de spreiding in het golfklimaat, is een

gevoeligheidssimulatie gedaan, waarbij de golfrichting van 2 bestaande klassen artificieel is verschoven (Figuur 2.14). Op deze manier (ten opzichte van bijvoorbeeld een nieuwe classificatie op basis van golfrichting die andere golfhoogtes zal geven dan de huidige classificatie) blijft de hydrodynamische energie, en daarmee de resuspensie, vergelijkbaar en wordt enkel het effect van de golfrichting inzichtelijk gemaakt.



Figuur 2.14 Artificieel gespreid golfklimaat: 1<sup>e</sup> ( $H_s < 0.5$  m) en 3<sup>e</sup> klasse ( $1.5 < H_s < 2$  m) zijn veranderd van richting.



Figuur 2.15 Links: Bodemligging in 2050 voor simulatie met golfklimaat uit het huidige golfmodel (Figuur 2.11 rechts). Rechts: Bodemligging in 2050 voor simulatie met meer gespreid golfklimaat (Figuur 2.14).

Figuur 2.15 toont de bodemliggingen in 2050 berekend met het geclassificeerde golfklimaat uit de referentie en het meer gespreide golfklimaat uit de gevoeligheidssimulatie. Hieruit blijkt dat de verschillen zeer klein zijn. De bodemveranderingen worden dus gedomineerd door de andere (2) golfklasse(s). Het grootste effect van de spreiding in het golfklimaat treedt op aan de Noordzee-zijde van de Waddeneilanden. Uit recente studies (o.a. het Kustgenese 2.0 project) blijkt dat het nodig is meer golfklassen mee te nemen om de bodemveranderingen op de buitendelta's accuraat te kunnen modelleren (bijvoorbeeld Benedet et al., 2016). Vanwege

de rekeninspanning is het echter niet mogelijk om voor dit project met nog meer klassen te rekenen. Daarnaast behoort de morfologische ontwikkeling van de buitenzijde van de eilanden niet tot de belangrijkste processen binnen dit project. Het is daarom acceptabel om de studie voort te zetten met het geclassificeerde golfklimaat uit Figuur 2.11.

## 2.5 Slibmodellering LZS

### 2.5.1 Probleemstelling

Door afwezigheid van een realistisch golfklimaat in de vorige versies van de modellen, waren de slibeigenschappen zo gekozen dat er niet teveel slib zou bezinken in de Noordzee (lage valsnelheid, makkelijk erodeerbaar). Het slib was hierdoor erg mobiel. Dit leidde tot drie modeltekortkomingen:

1. Het netto transport van hoog-energetische condities naar laag-energetische condities wordt niet door het model gereproduceerd. Dit leidt tot een onderschatting van slibtransport van de Noordzee en Waddenzee richting het Eems estuarium.
2. Het gedrag van de slibgedomineerde intergetijdegebieden wordt niet goed gerepresenteerd.
3. Aanslibbing in havens en vaarwegen, en daarmee ook de hoeveelheid gebaggerd en gestort materiaal, wordt onderschat.

### 2.5.2 Verbetering

Door het modelleren van meer realistische golfcondities worden de bodemschuifspanningen verhoogd, met name op de Noordzee en in het buitendeel van het Eems estuarium. Hier horen andere slibparameterinstellingen bij. Bij de kalibratie van het slibmodel is daarom de kritische schuifspanning voor erosie, de erosie-coëfficiënt, en de valsnelheid aangepast (zie Tabel 2.3).

Door de valsnelheid en de erosie-coëfficiënt te vergroten, wordt het slib dynamischer: het bezinkt sneller maar er wordt ook meer geërodeerd. De kritische schuifspanning voor erosie is ook hoger, maar omdat door golven ook de optredende schuifspanningen zijn toegenomen, is het afhankelijk van de precieze locatie of er bij dezelfde getijstrooming wel of geen erosie plaatsvindt. Het belangrijkste effect hiervan is dat er relatief minder slib afgezet wordt in de Noordzee en het deel van het estuarium wat aan golfwerking is blootgesteld, terwijl slib juist makkelijker wordt afgezet in luwe gebieden zoals de Dollard. Ook slibben geulen sterker aan doordat golven hier maar beperkt bijdragen aan de bodemschuifspanning. Bij de kalibratie is daarom steeds gekeken naar het effect op de modelresultaten (aanslibbing, slibpercentage in de bodem, bodemveranderingen).

Doordat de toevoeging van golven tot dynamischer condities leiden, zijn twee aanvullende parameters aangepast om numerieke stabiliteit te garanderen: de minimale diepte voor zandtransportberekeningen (verhoogd van 0.1 naar 0.2 meter, zodat er geen grote bodemveranderingen plaatsvinden op hele ondiepe cellen, zie Tabel 2.3) en de horizontale diffusie coëfficiënt (vergroot van 1 naar 20).

Ook na implementatie van de harde lagen bleek dat de geulen nog steeds uitschuurden in een deel van het estuarium (op plekken waar geen harde lagen voorkomen). Verdieping van de geulen beïnvloedt de getijslag en het getijprisma, en daarmee de sedimenttransporten en gesuspenderde slibconcentraties zoals die worden berekend met het D3S-model. Het insnijden van geulen is een bekend probleem in Delft3D, omdat de numerieke diffusie relatief laag is en er wordt gerekend met een beperkt aantal sedimentfracties. Een parameter waarmee dit kan worden verminderd, is de gradiëntfactor voor het dwarshelling transport ( $\alpha_{Bn}$ ). Deze is in de hindcast gekalibreerd op basis van het ontstaan van geulpatronen, waarbij is gekeken

naar het aantal en de dimensies van de geulen. Deze dwarshellingsfactor is vervolgens niet meer aangepast.

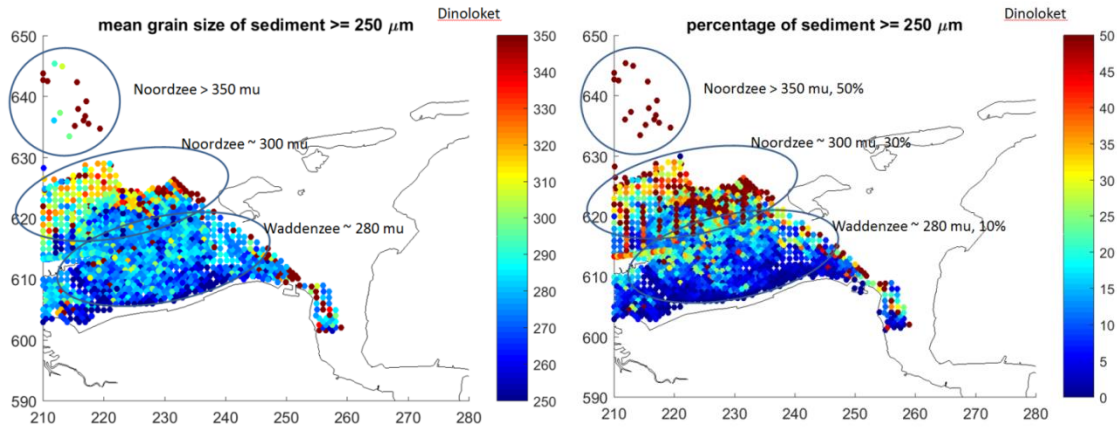
Een andere optie om het uitschuren te voorkomen is het toevoegen van sedimentfracties met grotere korreldiameter. Door grote stroomsnelheden in de getijgeulen en door golfwerking op de buitendelta's worden fijne fracties uitgewassen en blijven grovere zandfracties liggen. Hierdoor kan de bodem zich stabiliseren. Het model is verbeterd door 1 grovere zandfractie van 400  $\mu\text{m}$  toe te voegen (zie onderstaande tabel).

Tabel 2.3 Belangrijkste instellingen LZS-model. Veranderingen in 2018 t.o.v. 2017 zijn vetgedrukt. Zie Figuur 2.17 voor de ruimtelijke verdeling van de zandklassen

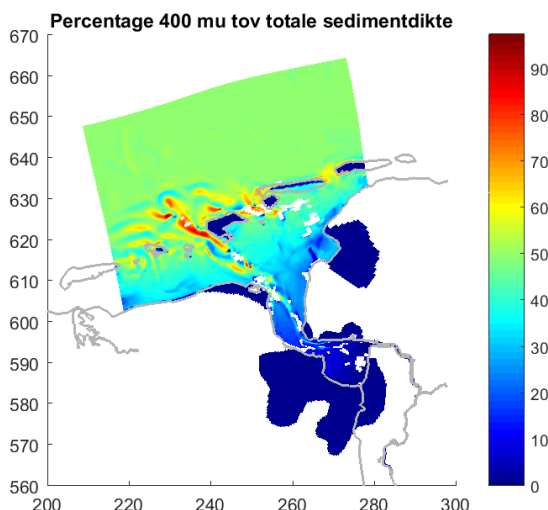
Domein	Grootheid	Waarde 2017	Waarde 2018	Eenheid
Waterbeweging	Tijdstap	30	30	s
	Ruwheidsformulering Manning (uniform)	0,022	0,022	s/m <sup>1/3</sup>
	Horizontale turbulente viscositeit	1	1	m <sup>2</sup> /s
	Horizontale turbulente diffusie	1	<b>20</b>	m <sup>2</sup> /s
Zandtransport	Korrelgrootte	200	<b>200 en 400</b>	$\mu\text{m}$
	Dichtheid sediment	2650	2650	kg/m <sup>3</sup>
	Dichtheid water	1023	1023	kg/m <sup>3</sup>
	Referentiedichtheid hindered settling	1600	1600	kg/m <sup>3</sup>
	Droge dichtheid	1600	1600	kg/m <sup>3</sup>
	Criterium voor natte en droge cellen	0,1	0,1	m
	Minimale diepte zandtransportberekeningen	0,1	<b>0,2</b>	m
Slibtransport	$\alpha_{Bn}$	25	25	-
	Valsnelheid	0,1	<b>1</b>	mm/s
	Droge dichtheid	500	500	kg/m <sup>3</sup>
	Kritische schuifspanning voor erosie	0.1	<b>0.25</b>	Pa
Erosie coëfficiënt	1 10 <sup>-4</sup>	<b>2 10<sup>-3</sup></b>	kg/m <sup>2</sup> /s	

Figuur 2.16 toont de beschikbare gemeten korrelgrootteverdelingen in het Eems estuarium en nabijgelegen deel van de Noordzee, die worden gebruikt om een korrelgrootte en percentage van voorkomen te selecteren. Uit de linker subfiguur blijkt dat er offshore in de Noordzee en in de hoofdgeul van het estuarium relatief grof materiaal aanwezig is: de gemiddelde korrelgrootte van het deel > 250  $\mu\text{m}$  van de bodemonsters is groter dan 350  $\mu\text{m}$ . Niet alleen de korrelgrootte van de fractie > 250  $\mu\text{m}$  is van belang, ook het percentage dat deze grove fractie inneemt in de totale korrelgrootteverdeling telt. Uit de rechter figuur blijkt dat offshore in de Noordzee meer dan 50% van het materiaal een korrelgrootte groter dan 250  $\mu\text{m}$  heeft. Nabij de Noordzeekust is dit gemiddeld ongeveer 30% en in de Waddenzee neemt het af tot ca. 10%. Daarom wordt een extra sedimentfractie met een korrelgrootte van 400  $\mu\text{m}$  aan het model toegevoegd. Deze waarde is iets hoger dan waargenomen korrelgrootteverdelingen om de erosie van geulen te onderdrukken, maar sluit aan bij eerdere morfologische modelstudies. Zo worden in Dastgheib (2012) zes fracties gebruikt voor de Waddenzee, variërend van 75  $\mu\text{m}$  tot 2,36 mm. In Kustgenese 2.0 worden ook meerdere fracties gebruikt, waarvan de grootste 800  $\mu\text{m}$  bedraagt. Op de zeewaartse rand bestaat 50% van al het zand uit deze grove fractie, maar

neemt af tot 0% bij het Eems sperwerk. Na inspelen (Figuur 2.17) neemt de fractie van 400  $\mu\text{m}$  toe in delen van de geulen en de buitendelta's.



Figuur 2.16 Links: mediane korrelgrootte voor het deel van de sedimentfracties die groter of gelijk zijn aan 250  $\mu\text{m}$ . Rechts: percentage van de totale korrelgrootteverdeling dat groter of gelijk is aan 250  $\mu\text{m}$ .



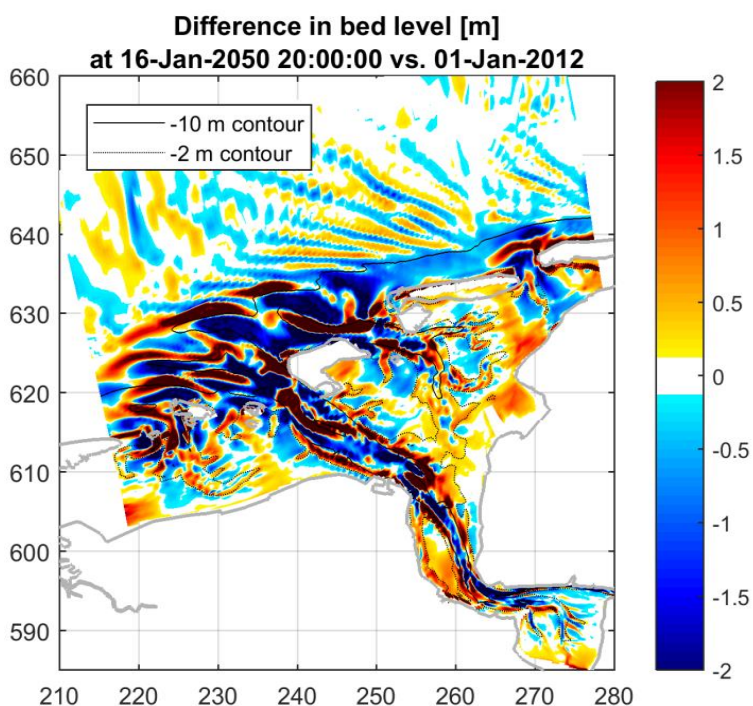
Figuur 2.17 Het percentage van de 400  $\mu\text{m}$  fractie als aandeel van het totale sedimentpakket (incl. slib), na inspelen. Witte vlekken geven lokaties met harde lagen aan het oppervlak aan.

Met behulp van het Dollard model (sectie 2.7) worden variaties in modelinstellingen in meer detail toegelicht.

### 2.5.3 Effect van de verbetering

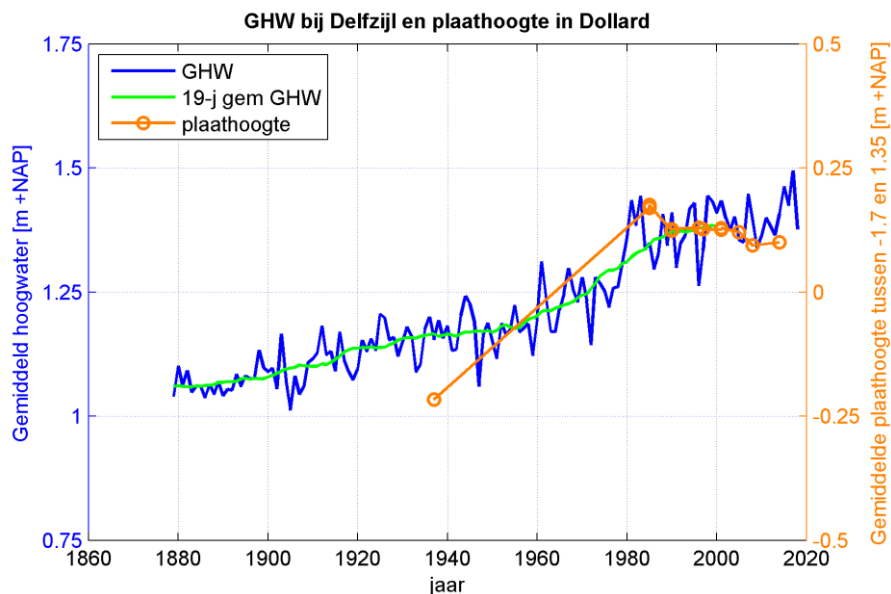
De aangepaste slibparameters in combinatie met golfforcering en het toevoegen van een grovere zandfractie hebben een positief effect op de voorspelkracht van het model met betrekking tot trends (zoals het aanslibben van de Bocht van Watum en toename van het slibgehalte in de Dollard), baggervolumes en slibverdeling in de bodem. Het effect van de verbeteringen op de genoemde punten wordt in deze paragraaf kort toegelicht aan de hand van de simulatie van de huidige situatie (zonder zeespiegelstijging en bodemdaling en zonder verdiepte vaarweg Eemshaven-Noordzee). Het effect op de autonome ontwikkeling (toekomstvoorspelling) wordt toegelicht in paragraaf 4.2.1.

Figuur 2.18 toont de bodemveranderingen tussen 2012 en 2050 berekend met de hierboven beschreven modelaanpassingen. De verschillen met de eerdere simulaties zijn dusdanig groot dat een verschilkaart tussen oorspronkelijke voorspelling en nieuwe voorspelling niet inzichtelijk is. Daarom wordt hieronder vooral de resultaten van de verbeterde modelvoorspelling besproken. Zoals reeds aangegeven in paragraaf 0 treedt erosie op aan de buitenzijde van de Waddeneilanden, wat waarschijnlijk het gevolg is van de simplificatie van het golfklimaat, de beperkte rekenresolutie en het beperkte aantal sedimentfracties. Ook migreert en verdiept het Oost Friesche Gaatje en de Westereems. Deze verdieping lijkt onrealistisch (het is niet te verwachten dat significante verdieping optreedt tussen 2012 en 2050) en wordt onvoldoende geremd door de harde lagen (harde lagen liggen dieper dan de bodem zelf) en het toevoegen van de 400  $\mu\text{m}$  zandfractie. In de intergetijdengebieden zijn de veranderingen kleiner. Er treedt aanslibbing op in de Bocht van Watum, in overeenstemming met het werkelijke, huidige gedrag. Ook zien we een vrij constante bodemligging in de Dollard, conform waarnemingen: over lange tijdschalen (jaren tot 10-tallen jaren) fluctueert de bodemligging in de Dollard met het gemiddelde hoogwaterniveau (zie Figuur 2.19). Het is wenselijk om de daadwerkelijke verandering in bodemhoogte en samenstelling van de Dollard beter in kaart te brengen via een analyse van bestaande bodemkaarten. Dit wordt momenteel opgepakt binnen het KPP Eems Dollard.



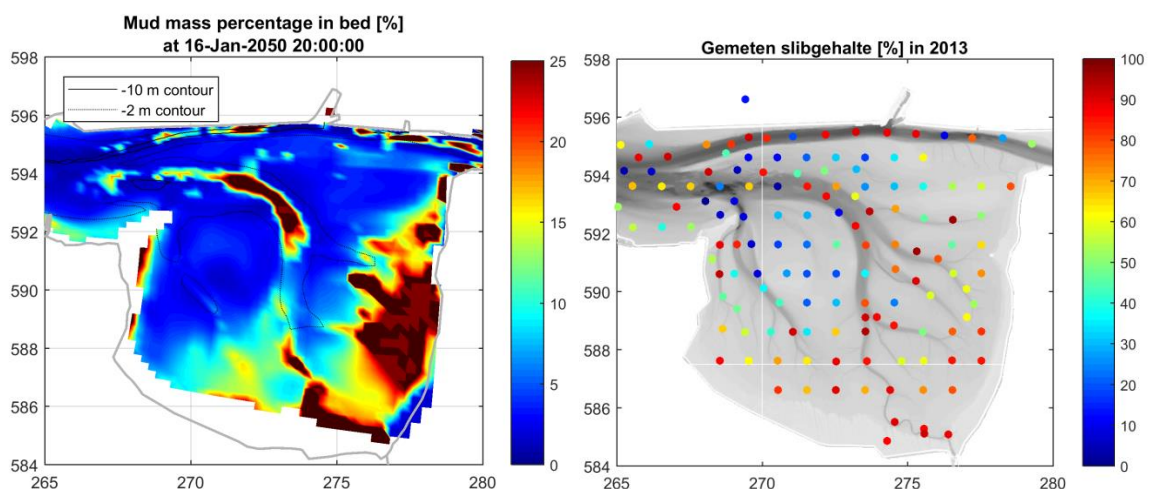
Figuur 2.18 Bodemveranderingen tussen 2012 en 2050 voor de kalibratie run (zonder zeespiegelstijging, bodemdaling en verdiepte vaarweg Eemshaven-Noordzee).





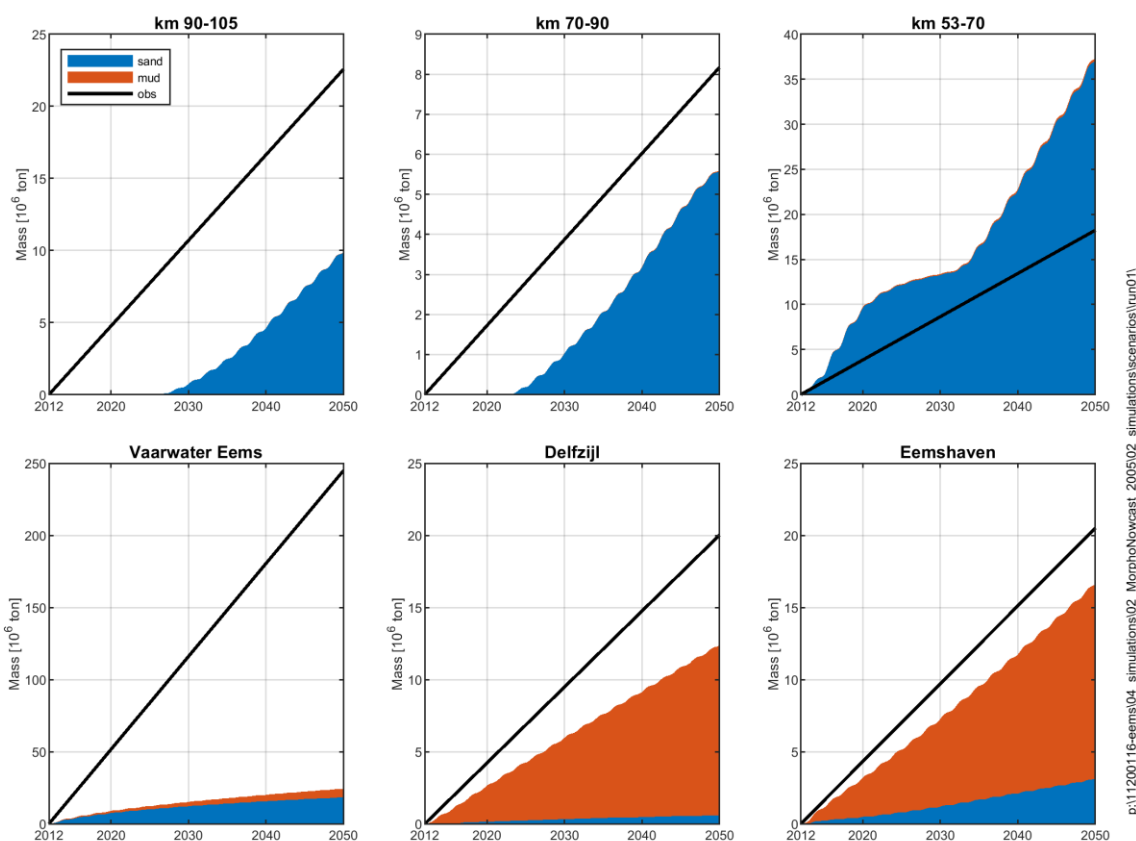
Figuur 2.19 Gemeten gemiddeld hoogwater bij Delfzijl in m t.o.v. NAP (blauw) en gemiddelde plaathoogte in de Dollard op basis van vaklodingen en 1937 bathymetry van Harbasin (oranje met ronde marker). Voor het gemiddeld hoogwater is per jaar het gemiddelde genomen van alle hoogwaters zoals die gemeten zijn bij Delfzijl (blauwe lijn). Vervolgens is er een lopend gemiddelde met een window lengte van 19 jaar op toegepast (groene lijn). De plaathoogte is berekend voor alle punten die in elk beschikbare jaar data hebben (zodat precies dezelfde gebieden met elkaar vergeleken worden) én die een hoogteligging hebben tussen -1.7m NAP en 1.35m NAP.

Het slibgehalte in de bodem laat in het model qua patronen goede overeenkomsten zien met observaties (meetcampagne 2013) – zie Figuur 2.20. De absolute percentages zijn nog wel verschillend, maar dit is het gevolg van de initiële bodemdikte en de initiële zand/slibverhouding in het model en de bemonsteringsdiepte. Patronen die overeen komen zijn: slibrijk gebied in de geul Grote Gat, slibrijke zuidelijke en oostelijke randen van de baai, slibrijk gebiedje ten zuiden van de punt van Reide, meer zandige gebieden op de Heringplaat en het Hoogzand (ten zuiden van de Geisedam). In de zuidwestelijke punt van de Dollard ligt iets te weinig slib.



Figuur 2.20 In het LZS model berekende slibgehalte [%] in de bodem en gemeten slibgehalte in de bodem [%] bij de meetcampagne in 2013. Merk op dat de kleurenbalken een verschillende schaal hebben.

In het LZS model worden ook baggervolumes berekend. De baggervolumes worden niet hard aan het model opgelegd, maar berekend op basis van een interventiediepte. Daarmee kunnen de voorspelde baggervolumes ook dienen als modelvalidatie. Als met het LZS model realistische ruimtelijke patronen qua slibverdeling en morfologische veranderingen kunnen worden voorspeld, zouden ook de baggervolumes en de samenstelling van het gebaggerde materiaal (zand of slib) in lijn moeten zijn met werkelijk opgetreden baggerinspanningen. De hoeveelheden gebaggerd sediment laten een redelijk goede overeenkomst met de data zien (Figuur 2.21). De data is een lineaire zwarte lijn, waarvan de richtingscoëfficiënt het baggervolume per jaar is. Dit betreft een gemiddelde op basis van de beschikbare data. Als het model de baggervolumes perfect zou voorspellen, zouden de gekleurde vlakken aan de bovenzijde precies begrensd worden door de zwarte lijn. Baggerspecie is zandig in de hoofdgeul van het estuarium, en slibrijk in de havens. Op het traject km 70-105 wordt het baggerbezwaar onderschat als gevolg van te veel uitdiepen van de geulen, op het traject 53-70 wordt deze overschat.



*Figuur 2.21 Baggermassa's (cumulatief) zoals berekend door het model voor de huidige situatie. blauwe (zand) en rode vlakken (slib) geven de toename in baggermassa over tijd aan, de zwarte lijn geeft de gemeten recente baggermassa's (NB. zonder verdiepte vaarweg Eemshaven-Noordzee). De ligging van de baggervakken is aangegeven in Figuur 4.3.*

De berekende aanslibbing in de havens toont goede overeenkomst met de gemeten aanslibbing. Alleen het Vaarwater naar Emden laat een sterke onderschatting van het baggervolume zien. Dit komt enerzijds omdat de processen die daar de aanslibbing veroorzaken nog niet goed begrepen zijn (vandaar dat binnen het overkoepelende project ook een grote meetcampagne is geïnitieerd) en anderzijds waarschijnlijk doordat de Eemsrivier en het vaarwater naar Emden met onvoldoende resolutie in het modelrooster is opgenomen

(vanwege de rekentijd). Als gevolg van de beperkte resolutie in deze geulen (typisch 5 cellen over de breedte) hebben deze geulen de neiging teveel in te snijden. Omdat de geul hierdoor dieper is dan de interventiediepte voor baggeren, wordt het baggerbezwaar onderschat.

## 2.6 Slibmodellering D3S: uitschuring Eems rivier

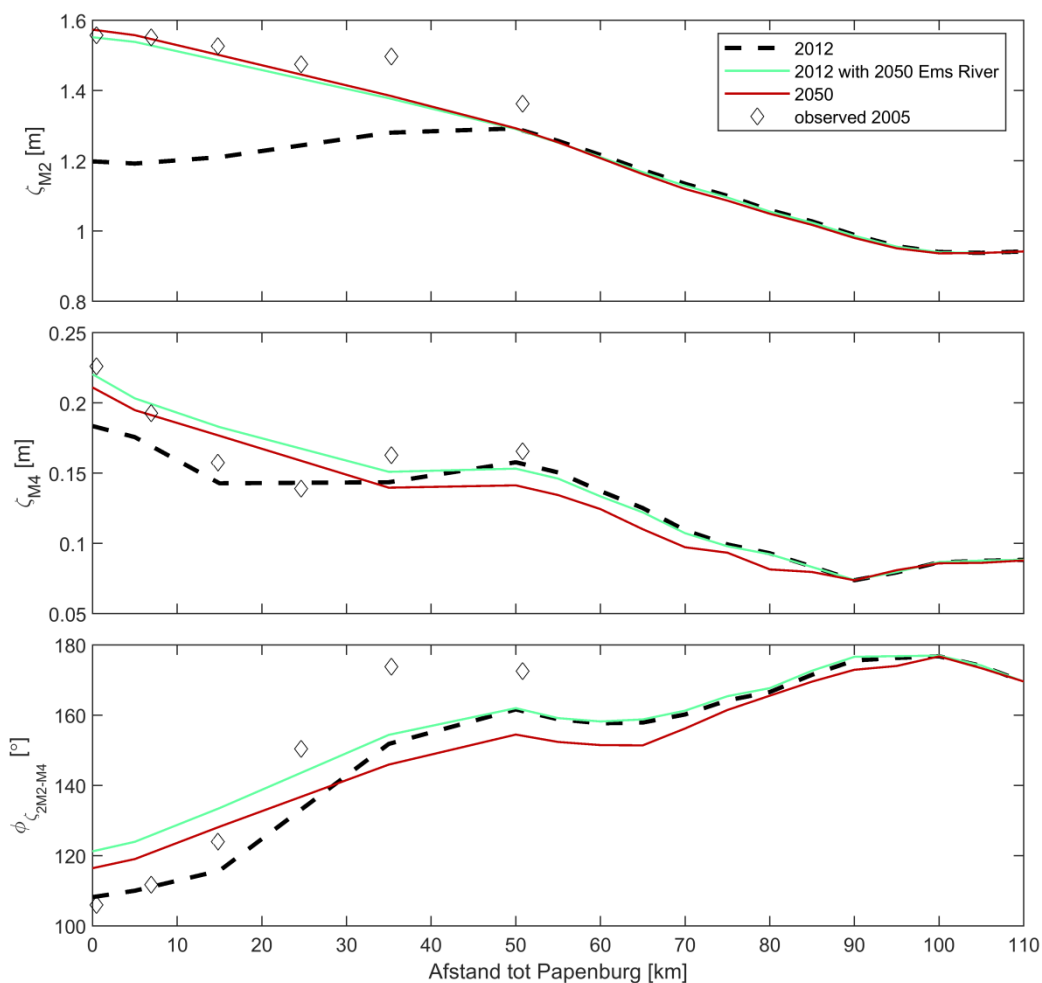
### 2.6.1 Probleemstelling

Tijdens de forecast berekeningen (2012 – 2050) verandert niet alleen de bodem van het Eems-estuarium, maar ook van de Eems-rivier (zie §4.2). De geul migreert en verdiept, wat resulteert in een toename van de getijamplitude in de Eems-Rivier (Figuur 2.22). Zonder uitschuring onderschat het model de getijamplitude. Dit is het gevolg van interpolatie van bodemgegevens in combinatie met de relatief grove modelresolutie: hierdoor is op een aantal plekken de stroomvoerende dwarsdoorsnede in de Eems Rivier te klein. Door een morfodynamische simulatie wordt deze doorsnedes lokaal vergroot tot een beter evenwicht met de rest van de geul bereikt is.

Een gevolg van deze verdieping is dat slib sterker richting de Eems-Rivier wordt getransporteerd wat waarschijnlijk leidt tot een toename in de slibconcentraties in de Eems-Rivier (zie Deltares, 2015c). Deze toename heeft mogelijk ook weer een effect op de slibconcentratie in het estuarium. De veranderingen in slibconcentratie in het Eems-Estuarium, berekend met het D3S-model, zullen daarom het gevolg zijn van (1) morfologische veranderingen in het Eems-estuarium en (2) uitschuring van de Eems-rivier. Het doel van deze modelstudie is vooral gericht op het kwantificeren van effecten van de morfologische veranderingen in het Eems-estuarium. In deze paragraaf wordt een methode beschreven om te compenseren voor effecten van uitschuring van de Eems Rivier.

### 2.6.2 Verbetering

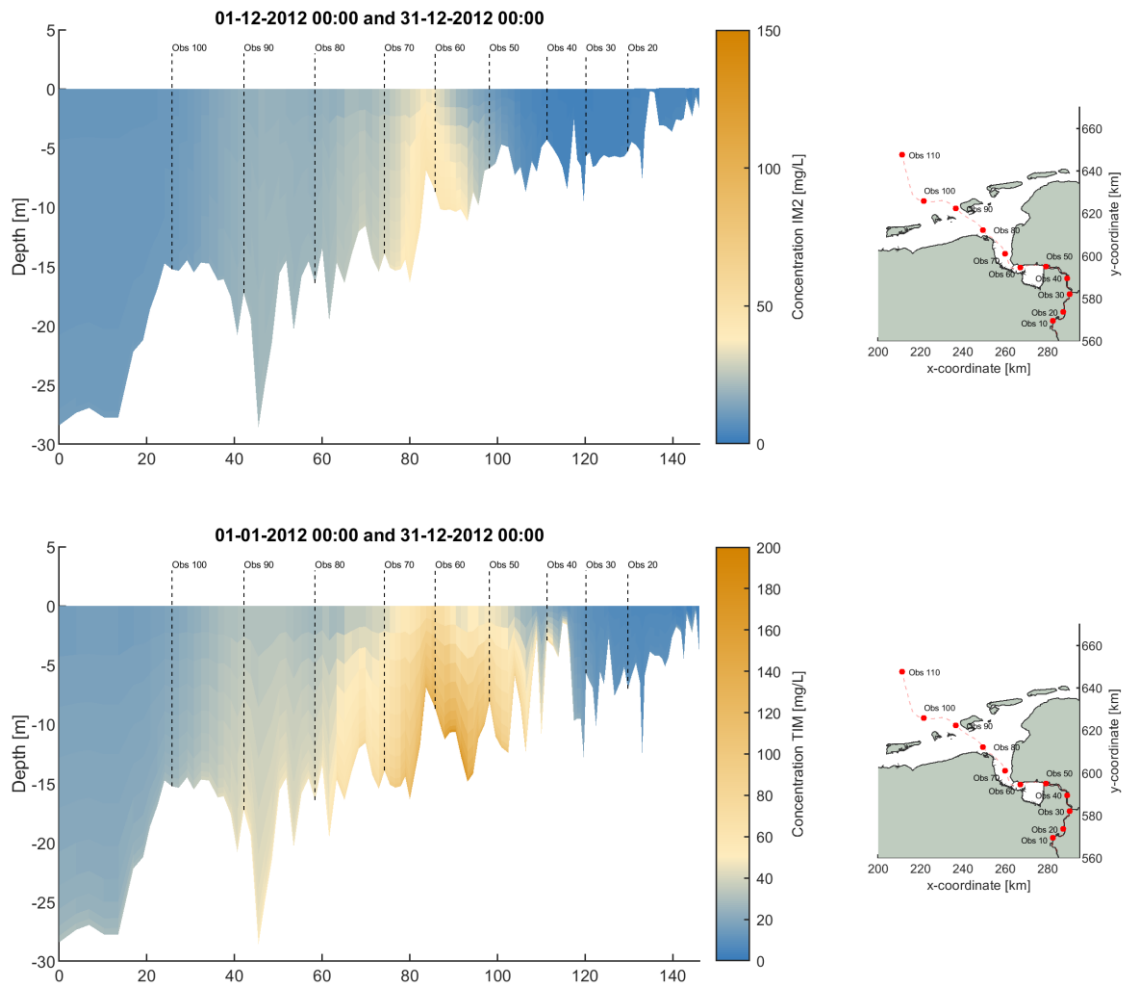
Een oplossing is het gebruik van een gecombineerde bodem, waarbij de bodem in het Eems Estuarium op basis van metingen wordt gecombineerd met een berekende bodem in 2050 voor het vaarwater naar Emden en in de Eems Rivier. De getijamplitude berekend met deze gecombineerde bodem komt veel beter overeen met metingen (Figuur 2.22). Door deze meer realistische getijslag nemen de slibconcentraties in de Eems Rivier toe, vooral door een stroomopwaartse verschuiving van het troebelheidsmaximum (Figuur 2.23). Zonder uitschuring stopt het troebelheidsmaximum bij Obs 50 (Pogum) – sediment dringt dus niet de Eems rivier binnen. Met uitschuring dringt het troebelheidsmaximum binnen tot aan Obs 40 (voorbij Terborg). Hoewel dit nog steeds een onderschatting is van de werkelijke slibconcentratie in de Eems Rivier is (waar concentraties tot vele g/l voorkomen), is het wel een verbetering voor de slibdynamiek in de Eems Rivier.



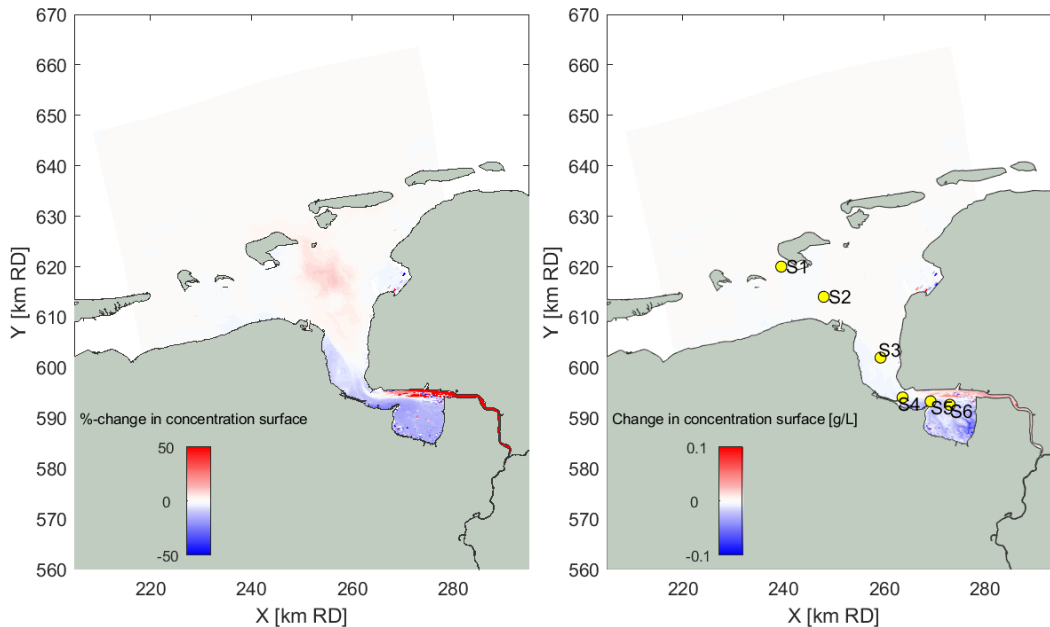
Figuur 2.22 Amplitude van het M2 getij (boven), het M4 getij (midden) en het faseverschil tussen M2 en M4 (beneden), voor berekeningen met gemeten bodemligging (2012), de berekende bodem in 2050, en een gecombineerde bodem waarbij de gemeten bodem in de Eems Rivier wordt vervangen door de berekende bodem in de Eems Rivier in 2050. De gemeten getij karakteristieken zijn uit 2005 (Deltares, 2015b).

### 2.6.3 Effect van de verbetering

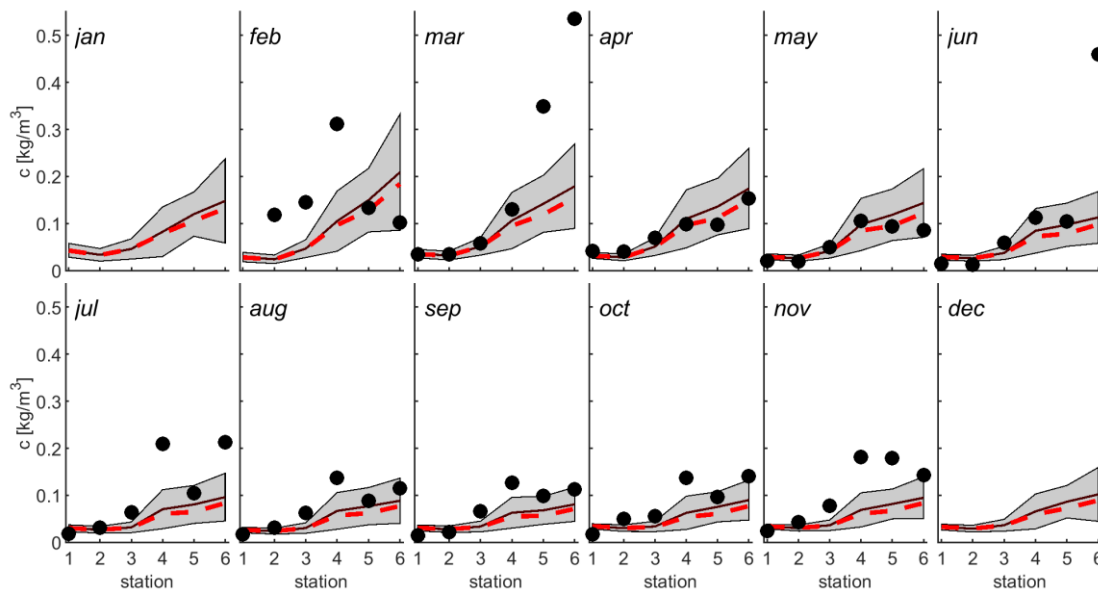
Het verdiepen van deze geul leidt niet alleen tot een toename in de slibconcentratie in de Eems Rivier, maar ook tot een verandering in het Eems estuarium (Figuur 2.24): in de Dollard neemt de berekende slibconcentratie af, maar in de rest van het estuarium neemt de slibconcentratie toe. Mogelijk betekent dit dat bij een uitgesuurde Eems Rivier meer sediment van de Dollard richting Eems Rivier wordt getransporteerd – dit zou echter in meer detail onderzocht moeten worden. In relatieve zin (Figuur 2.24 links) neemt de concentratie in het estuarium toe maar omdat de afname vooral plaats vindt in gebieden met hoge concentraties (de Dollard) is de verandering in het gehele estuarium in absolute zin beperkt (Figuur 2.24). Met de beschikbare metingen van de sedimentconcentratie (vooral de Imares metingen uit het jaar 2012, zie locaties in Figuur 2.24) kan niet vastgesteld worden of dit een significante verbetering of een verslechtering is (Figuur 2.25), hoewel de oorspronkelijke modelberekeningen iets dichter bij metingen liggen.



Figuur 2.23 Jaargemiddelde slibconcentratie berekend met originele bodem in de Eems Rivier (boven) en met uitgesuurde Eems rivier (beneden) in de thalweg van het Eems estuarium



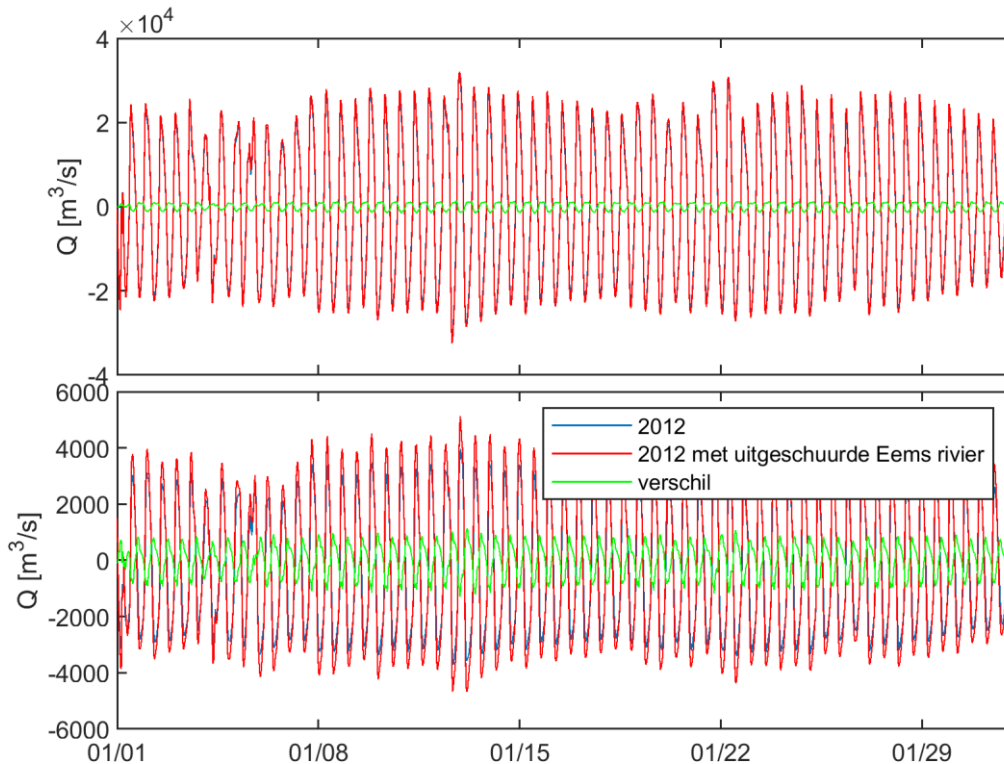
Figuur 2.24 Toename in slibconcentratie bij een uitgeschuorde Eems Rivier ten opzichte van de oorspronkelijke bodemligging in de Eems Rivier (in 2012): procentuele verandering (links) en absolute verandering (in g/l, rechts). De locaties stations S1-S6 (rechterfiguur) zijn Imares meetstations (zie Figuur 2.25).



Figuur 2.25 Slibconcentratie in de waterfase op de Imares meetstations 1 – 6 (zie Deltares, 2015a voor details). De zwarte bollen geven de maandelijks gemiddelde metingen weer. De zwarte lijn is de gemiddelde concentratie berekend met het oorspronkelijke D3S model en de grijze band is de bijbehorende standaard deviatie. De rode stippellijn is de gemiddelde slibconcentratie berekend met verdiepte Eems Rivier

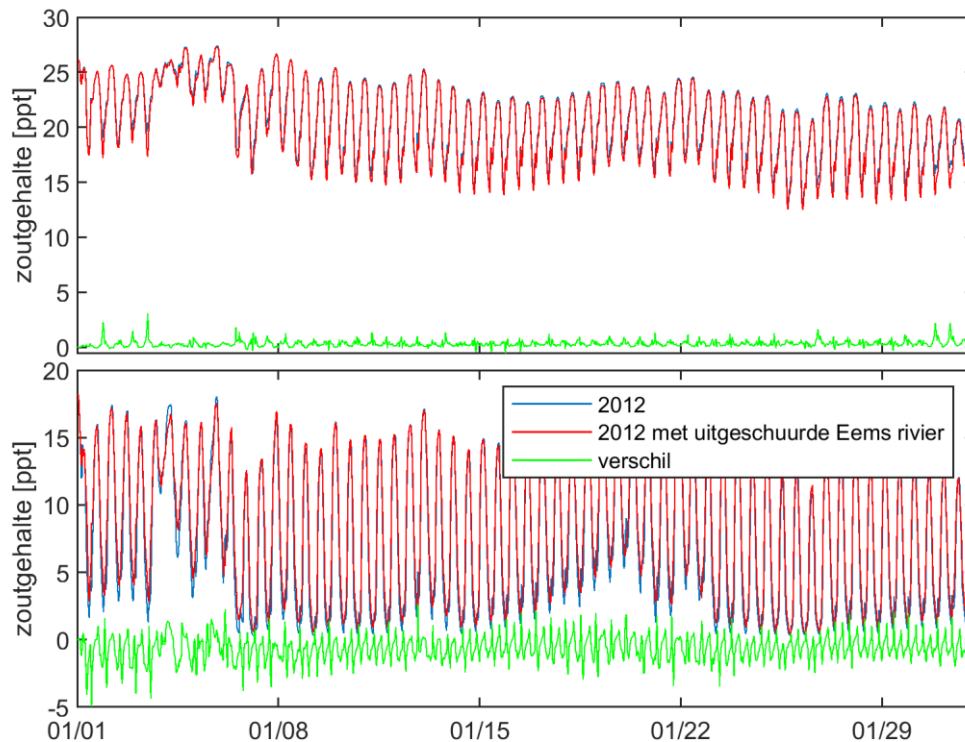
De toename van de slibconcentratie in de Eems Rivier (door uitschuring) kan het gevolg zijn van de eerder besproken toename in het getijdenbiet, maar ook van een toename in zoutgedreven stroming. Aan de ingang van de Eems Rivier (Pogum) neemt het getijdenbiet 30% toe (Figuur 2.26), en daarmee de sedimentflux. Daarnaast neemt het zoutgehalte aan de bodem

bij Emden (vlak voor de ingang van de Eems Rivier) aan het einde van de vloedperiode toe met 2 ppt (Figuur 2.27). Deze toename betekent dat de zoutgradiënt tussen het vaarwater naar Emden en de Eems Rivier groter wordt, wat leidt tot een toename in zout-gedreven sedimenttransport.



Figuur 2.26 Getijdebiet (2012 bodem, 2012 met uitgeschuurde bodem, en verschil) door het Eems Estuarium ter hoogte van Delfzijl (boven) en Pogum (beneden), in januari 2012

De veranderingen in het Eems estuarium zijn lastiger te verklaren. Nabij Delfzijl is de verandering in het getijdebiet rond de 4% (de toename in debiet blijft rond de 1000 m<sup>3</sup>/s, maar het totale debiet hier is 25000 m<sup>3</sup>/s). Er is geen structurele verandering in het zoutgehalte: het verschil in zoutgehalte varieert binnen het getij tussen de +1 en -1 ppt – veranderingen in zout-gedreven stroming lijken hierdoor geen effect te hebben. Een derde mogelijkheid is het uitstralende effect van de toegenomen slibconcentraties: door horizontale menging van een hogere concentratiegradiënt neemt het diffusieve transport van hoge naar lage slibconcentraties toe. Om definitief vast te stellen welke processen verantwoordelijk zijn voor de beperkte toename in de slibconcentratie in het Eems estuarium dienen aanvullende exploratieve modelberekeningen uitgevoerd te worden. Hiervoor is echter een revisie van het slibtransport model nodig, gebruik makend van de resultaten van de meetcampagnes in en rond het Emders vaarwater in 2018 en 2019.



Figuur 2.27 Zoutgehalte nabij de bodem (2012 bodem, 2012 met uitgeschuurde bodem, en verschil) in de vaargeul ter hoogte van Delfzijl (boven) en Emden (beneden), in januari 2012

#### 2.6.4 Conclusie

Het D3S-model voor het Eems-estuarium is verbeterd door een uitgeschuurde bodem in de Eems-rivier voor te schrijven. Het gebruik van een (door het morfologisch model) uitgeschuurde bodem in de Eems-Rivier in de D3S-berekeningen leidt tot

- Een verbetering van de modelresultaten. De berekende getijvoortplanting en slibconcentratie in de Eems-Rivier komen beter overeen met metingen. In het oude model lag het troebelheidsmaximum bij Knock; met uitgeschuurde Eems Rivier dringt het troebelheidsmaximum ook de Eems Rivier binnen. Rond Pogum (begin van de Eems Rivier) is de concentratie toegenomen van enkele 10-tallen mg/l (zonder uitschuring) naar enkele 100 mg/l (met uitschuring), wat nog steeds veel lager is dan metingen laten zien (enkele g/l).
- Realistischer scenariostudies. In scenariostudies waarbij het effect van bodemveranderingen in het Eems estuarium belangrijk zijn voor veranderingen in de slibconcentratie, worden nu niet negatief beïnvloed door uitschuring van de Eems-rivier.

#### 2.7 Dollard model

Een belangrijke motivatie voor de opzet van het LZS-model is om uitspraken te doen over de effecten van zeespiegelstijging. Het LZS-model is in staat om door te rekenen wat het effect van zeespiegelstijging is op het meegroeien van het estuarium door aanzanding en aanslibbing. Echter, het LZS-model heeft ook een aantal nadelen:

- Het model is erg rekenintensief. Het is daarom niet mogelijk om een groot aantal gevoeligheden door te rekenen (randvoorwaarden, parameter instellingen)



- Een aantal parameters zijn onderling afhankelijk. De valsnelheid en de erosieparameters bijvoorbeeld beïnvloeden de slibconcentratie (en daarmee het slibaanbod richting de platen). Het is daarom niet mogelijk het effect van alleen de valsnelheid te kwantificeren, omdat dit ook betekent dat de slibconcentratie wijzigt. Het is daarom niet mogelijk om uitspraken te doen of berekende veranderingen het gevolg zijn van de valsnelheid (of erosie parameters) of van veranderend slibaanbod. Bij een relatief klein model wordt het slibaanbod sterk door de modelrand beïnvloed, en is er dus minder onderlinge afhankelijkheid.
- Het LZS-model is op basis van Mormerge, waarbij meerdere golfscenario's parallel worden doorerekend. Het is daarom niet mogelijk om een berekende slibconcentratie te vergelijken met metingen.

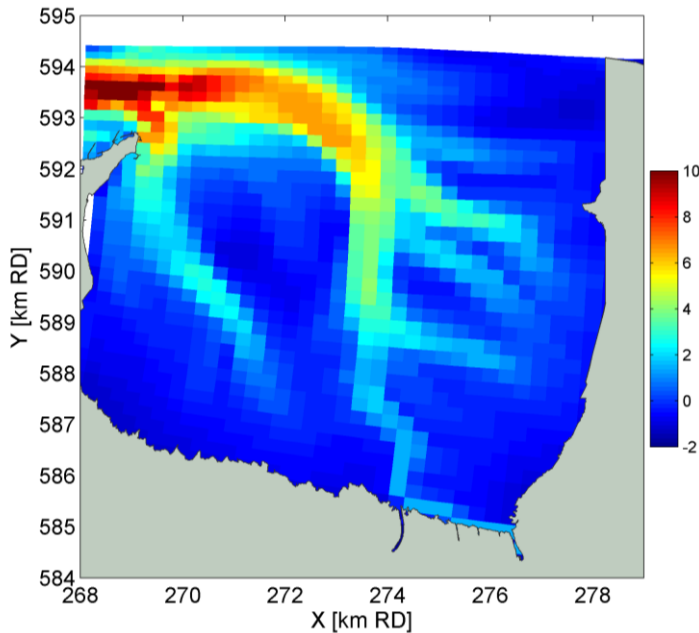
Om deze redenen wordt een lokaal LZS-model voor de Dollard opgezet. Dit model heeft veel kortere rekentijden waardoor geen gebruik hoeft te worden gemaakt van Mormerge. Het model genereert een tijdserie van slibconcentraties die met metingen kan worden vergeleken (dit in tegenstelling tot Mormerge sommen).

#### 2.7.1 Verbetering

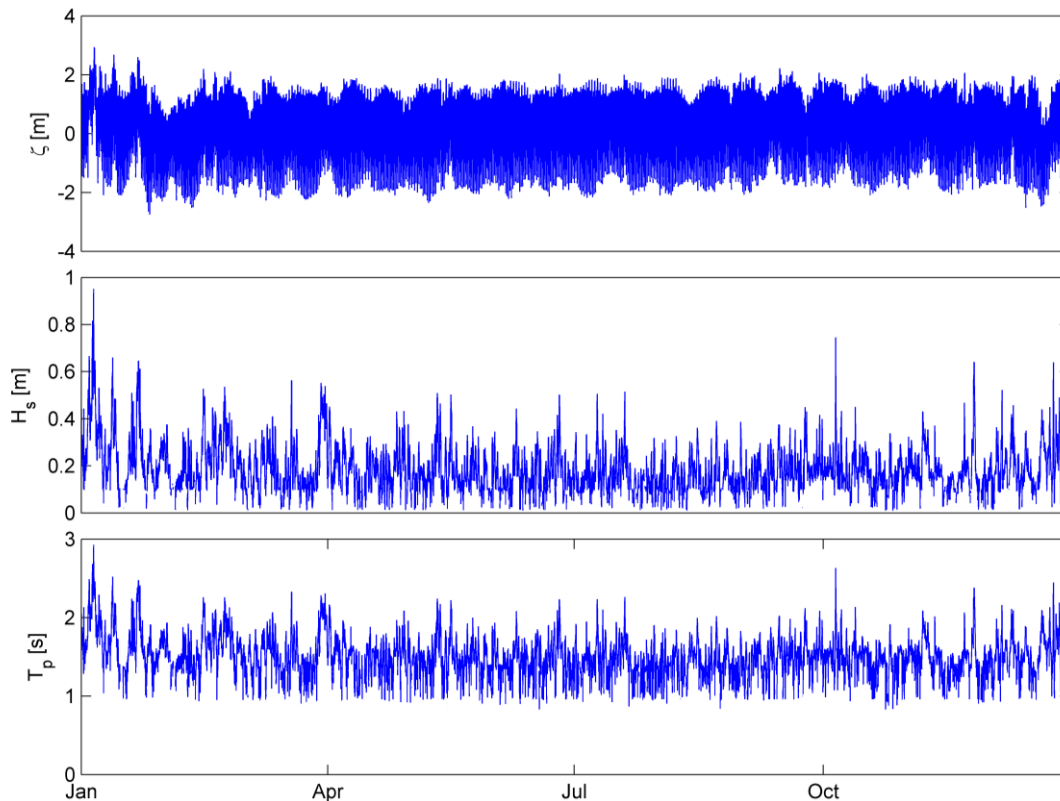
Het Dollard model (Figuur 2.28) maakt gebruik van hetzelfde rekenrooster als het LZS / D3S model, maar wordt begrensd door de Mond van de Dollard en de Geisedam. Eventuele transporten van sediment vanuit de Dollard richting de Eems Rivier (over / door de Geisedam, waarvan het belang niet bekend is) worden daarom niet door het model meegenomen. De modelopzet is als volgt:

- Een waterbeweging met een tijdsforcering voor 2012 zoals gebruikt in het D3S model (zie Deltares, 2017b), maar dan dieptegemiddeld (zoals het LZS model). De randvoorwaarden aan de Mond van de Dollard (getij, stormopzet) van dit lokale model worden gegenereerd door het D3S waterbewegingsmodel. Bij Nieuw Statenzijl wordt hetzelfde debiet opgelegd als in het D3S model.
- Een SWAN golfmodel voor het jaar 2012 waarvan de randvoorwaarden worden berekend door het D3S golfmodel.
- De sedimentklassen en parameterinstellingen worden overgenomen uit het LZS model. (zie Tabel 2.3)
- De berekening wordt versneld d.m.v. de Morfac techniek (50, net als in het LZS model). Hierdoor komt een hydrodynamische berekening van 2 jaar overeen met 100 jaar morfologische veranderingen.
- Voor de slibconcentratie op de modelrand in de mond van de Dollard wordt een waarde genomen die representatief is voor het Groote Gat (100 mg/l).
- Het aanwezige zand in het model is niet transporteerbaar. Zand beïnvloedt wel de erodeerbaarheid van het slib (de erosieflux van slib neemt lineair af met toenemend zandgehalte). Eerdere simulaties met dynamisch zand lieten zien dat het gedrag te sterk bepaald werd door onzekerheden in de voor te schrijven zandconcentratie (en werd daardoor instabiel)
- Voor zeespiegelstijging wordt het KNMI 2014 W scenario (zie Deltares, 2017a) aangehouden. Dit komt neer op een gemiddelde zeespiegelstijging van 0.67 cm/jaar tot aan 2050, gevolgd door gemiddeld 1.2 cm/jaar tussen 2050 en 2100. In navolging van het LZS model is zeespiegelstijging als bodemdaling geïmplementeerd (m.a.w. wanneer de bodemligging gelijk blijft, houdt aanslibbing/aanzanding de zeespiegelstijging bij).
- In het Dollard model is geen ruimtelijk variërende harde lagen geïmplementeerd omdat de ruimtelijke variatie hier beperkt is, en het effect gering (zie sectie 2.3).

Vanwege het afscherpende effect van het Eems estuarium zijn de golven relatief laag; De significante golfhoogte  $H_s$  is typisch tussen de 0.2 en 0.4 meter maar tot 0.6-0.8 meter tijdens stormen (Figuur 2.29).



Figuur 2.28 Bodemligging in het Dollard model

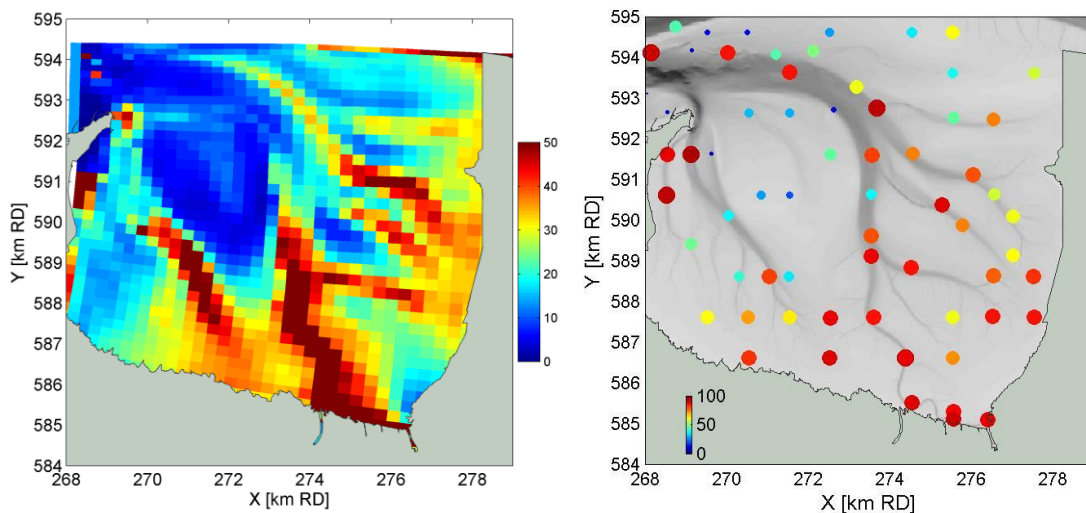


Figuur 2.29 Waterstand  $\zeta$ , significante golfhoogte  $H_s$  en golfperiode  $T_p$  aan de mond van de Dollard (uitvoer uit het D3S model).

Het model wordt geïnitieerd met een ruimtelijk uniforme verdeling van de drie sedimentfracties in de bovenste 1.5 meter van de bodem (evenredig gemengd per fractie). De sedimentverdeling wordt morfodynamisch (dus met veranderende bodem door erosie / sedimentatie van slib) ingespeeld gedurende een periode van 100 jaar.

### 2.7.2 Resultaat

Na inspelen ontstaat een ruimtelijke verdeling van de slibfractie in de bodem die vergeleken kan worden met gemeten slibgehalten (Figuur 2.30). Deze verdeling komt ruimtelijk goed overeen met gemeten slibgehalten: slib wordt vooral afgezet in de zuidoostelijke hoek van de Dollard en in geulen. Ook slibafzetting ten zuiden van de Punt van Reide worden door het model berekend. Het berekende slibgehalte is het laagst op de Heringsplaat, ook overeenkomend met observaties.

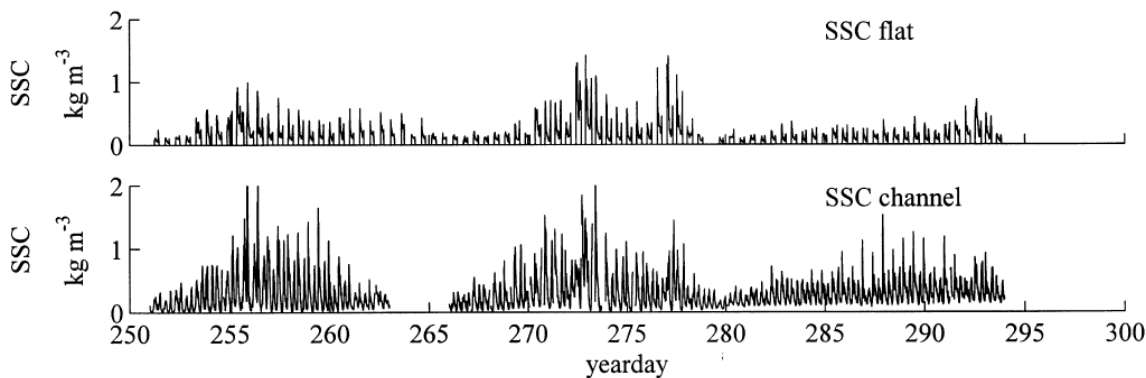


Figuur 2.30 Initiële slibgehalte (in%) in het Dollardmodel (links) en gemeten tijdens de meetcampagne in 2013 (rechts; slibgehalte weergegeven als kleur en grootte, zie Deltares, 2015c). In de metingen is het gemiddelde slibgehalte bepaald in de bovenste 10 cm. In het model is gemiddelde slibgehalte over de gehele bodem genomen – daarom wijken de percentages in absolute zin onderling af.

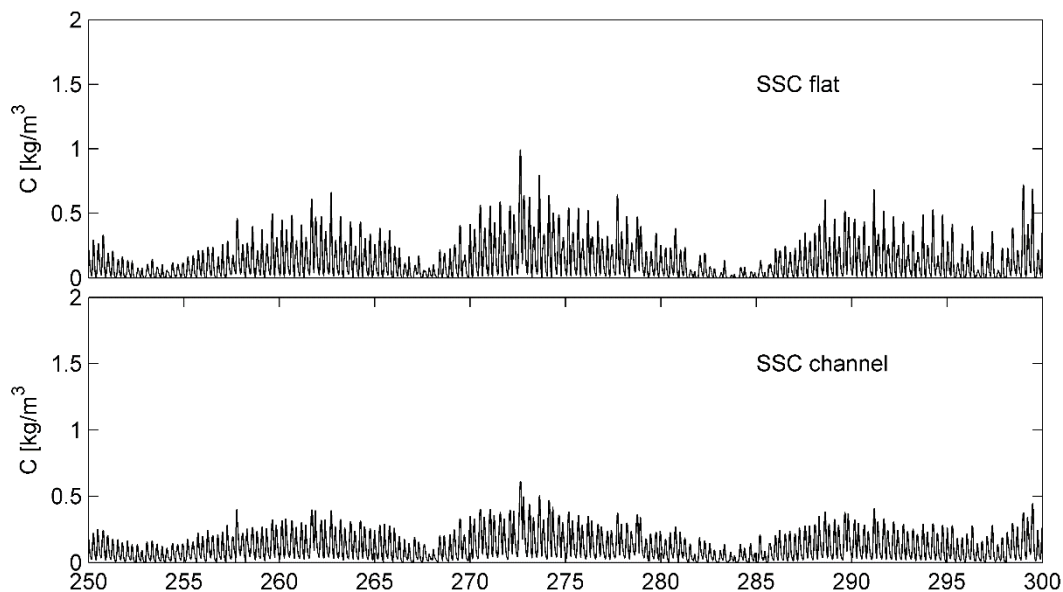
In tegenstelling tot het LZS model (welke geforceerd wordt met een golfklimaat) wordt het Dollard model geforceerd met tijds-variërende golfcondities (Figuur 2.29). Daarom kunnen de berekende slibconcentraties vergeleken worden met metingen. Een relevante sedimentconcentratie dataset hierbij zijn de metingen uit 1996 gerapporteerd in Ridderinkhof et al. (2000) (zie Figuur 2.31). Het Dollard model is geforceerd met de waterbeweging uit 2012, en daarom kunnen de berekende slibconcentraties (Figuur 2.32) niet één op één worden vergeleken met metingen uit 1996. Een kwalitatieve vergelijking laat echter het volgende zien:

- Zowel de metingen als het model kennen een sterke springtij-doodtij variatie, waarbij slibconcentraties tijdens springtij een orde groter zijn dan tijdens doortij.
- De slibconcentratie boven de plaat en in de geul verschillen niet tussen het model en de metingen. Het model berekent iets hogere slibconcentraties boven de plaat dan in de geul, terwijl de gemeten concentraties juist iets hoger zijn in de geul.

Hierbij moet opgemerkt worden dat de slibconcentraties die op de rand worden opgelegd ( $0.1 \text{ kg/m}^3$ ) veel lager zijn dan de bereikte piekconcentraties binnen het Dollard domein ( $1-2 \text{ kg/m}^3$ ). Dit betekent dat de overeenkomst tussen meetdata en model het gevolg is van een realistische modellering van fysische processen, en niet enkel wordt gestuurd door de concentraties op de randen van het model.



Figuur 2.31 Gemeten suspensieve slibconcentraties boven de Heringsplaat ('SSC flat') en Grote Gat ('SSC channel') in 1996 (Ridderinkhof et al., 2000).



Figuur 2.32 Gemodelleerde dieptegemiddelde slibconcentraties boven de Heringsplaat ('SSC flat') en Grote Gat ('SSC channel') in 2012

Op basis van de overeenkomst tussen gemeten en berekende slibgehalte in de bodem (Figuur 2.30) en in suspensie (Figuur 2.31 en Figuur 2.32) wordt geconcludeerd dat het Dollard-model een goede inschatting geeft van de heersende slibdynamiek, en gebruikt kan worden om effecten van zeespiegelstijging op de bodemligging en de slibconcentraties te voorspellen (§4.3.2).

## 2.8 Samenvatting morfodynamische modellen

Tijdens deze studie zijn een groot aantal modellen opgezet met verschillende doeleinden en daardoor verschillende modelconfiguraties. Deze configuraties worden in deze paragraaf kort samengevat.

Het LZS model is opgezet in drie configuraties (zie Tabel 2.4) die gebruikt worden voor drie doeleinden: de lange termijn hindcast, de middellange termijn hindcast en de voorspelling. De lange termijn hindcast is uitgevoerd om het grootschalig modelgedrag (ligging en gedrag hoofdgeulen) te optimaliseren. Dit model is daarmee ook een instrument om systeemkennis

over de historische morfologische ontwikkeling van het estuarium op te doen (zie Deltares, 2017a). Deze configuratie van het LZS model is echter niet geschikt om de morfologische ontwikkeling op een kleiner ruimtelijk niveau (niveau van individuele platen en geulen) op kortere termijn te simuleren. Hiervoor is het voorspellingsmodel opgezet. Het belangrijkste verschil in de configuratie van het voorspellingsmodel en het lange termijn hindcastmodel is (naast de bodemligging) de golfmodellering (§2.4) en daaraan gekoppelde slibinstellingen (§2.5). Het Dollard model is opgezet om een voorspelling te doen voor het meegroeien van de Dollard met zeespiegelstijging, en het bepalen van onzekerheden hierin (§2.7). Het D3S model is aangepast om de waterbeweging en slibdynamiek in de Eems rivier te verbeteren, en om de toekomstvoorspellingen ongevoelig te maken voor morfologische ontwikkelingen in de Eems-rivier (§2.6).

Een overzicht van de modelvarianten en de daar bij behorende instellingen is weergegeven in Tabel 2.4.



Tabel 2.4 Overzichtstabel van configuraties van het Eems Lange termijn Zand-Slib (LZS) model.

Modelvariant	Doel modellering	Periode	Bathymetrie	Randvoorwaarden		Sediment-fracties	Golf-modellering
				Hydro-dynamisch	Slib (mg/l)		
Lange termijn hindcast LZS	Kalibratie grootschalige morfologie	800 jaar	Uniform (NAP -4 m)	Neumann (genest)	10 (Noordzee) 100 (Waddenzee)	Slib: $w_s = 0.1$ mm/s Zand (200 $\mu$ m)	Constant ( $H_s = 0.2$ m, $T_p = 2.5$ s)
Middellange termijn hindcast LZS	Validatie morfologie	1985 – 2005	1985		Golfklasse 1: 10 Golfklasse 2: 40 Golfklasse 3: 90 Golfklasse 4: 180	Slib: $w_s = 1$ mm/s Zand (200 $\mu$ m) Zand (400 $\mu$ m)	SWAN (Mormerge)
Voorspelling LZS	Kalibratie (morfologie, slibgehalte, baggervolume) en scenario's (maatregelen)	2005 – 2050	2005				
D3S	Berekenen slibconcentratie	1 jaar	verschillende varianten	waterstanden	10 (Noordzee) 100 (Waddenzee)	Slib: $w_s = 1.2$ en 0.25 mm/s	SWAN (tijdsvariabel)
Dollard	Meegroeien slibrijke gebieden met zeespiegelstijging	2012 - 2112	2005	waterstanden	100 (mond Dollard)	Slib: $w_s = 1$ mm/s Zand (200 $\mu$ m) Zand (400 $\mu$ m)	SWAN (tijdsvariabel)





### 3 Modelresultaten: hindcast

#### 3.1 Lange termijn

##### 3.1.1 Introductie

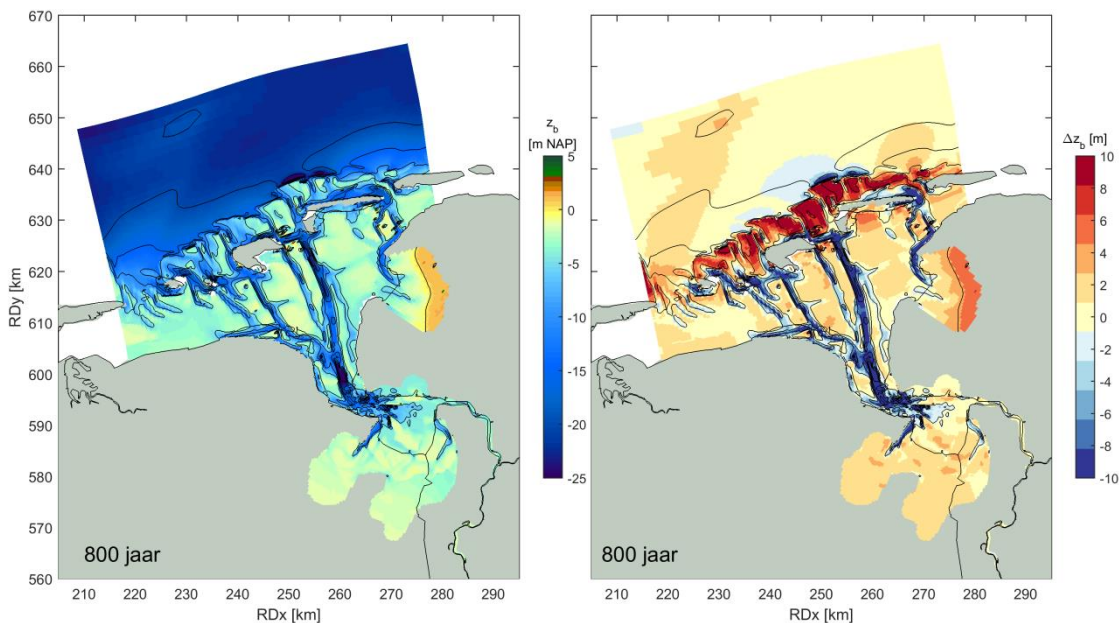
De lange termijn hindcast is uitgevoerd om randvoorwaarden en modelinstellingen te verkrijgen die (1) het historische grootschalige patroon van de geulen reproduceren en (2) tot realistische geuldimensies leiden. De kalibratie (Deltares, 2017a) heeft geleid tot een model dat in staat is deze kenmerken op hoofdlijnen te reproduceren maar gaf ook inzicht in enkele tekortkomingen. De modelaanpassingen beschreven in §2.1 (randvoorwaarden) en §2.2 (gekarteerde harde lagen) zijn doorgevoerd in het lange termijn hindcast model en hebben geleid tot een verbetering. Vergelijkbaar met Deltares (2017a) wordt in de volgende paragrafen beschreven in hoeverre het aangepaste model met de verbeterde instellingen kan voldoen aan kenmerken (1) en (2).

##### 3.1.2 Grootschalig gedrag geulen

In Figuur 3.1 is het resultaat weergegeven van 800 jaar morfologisch simuleren met een historische kustlijnschematisatie (maximale uitbreiding Dollard en Ley Bocht). Vergelijkbaar met het resultaat beschreven in Deltares (2017a) ontstaat er een estuarium met een tweegeulensysteem in de monding. De geul aan de westelijke zijde in de monding (Westereems) en de geulen nabij de eilanden hebben een oriëntatie in NW-ZO richting. De richting van deze geulen was een belangrijke motivatie om de randvoorwaarden te optimaliseren en heeft tot een duidelijke verbetering geleid. In het centrale gedeelte van het estuarium zijn ook twee geulen gevormd, welke gescheiden worden door een plaat (vergelijkbaar met de plaat Hond-paap). In overeenstemming met de huidige situatie is de geul aan de oostkant (vergelijkbaar met het Oost Friesche Gaatje) de dominante geul. Deze geul snijdt wel lokaal in tot een diepte van ongeveer NAP -25 m. De lokale insnijding is dieper dan in de vorige versie van het model (Deltares, 2017a) omdat de insnijding op deze locatie gelimiteerd was op het niveau NAP -15 m. De verspreiding van de gekarteerde harde lagen (Figuur 2.5) staat het model toe om lokaal te eroderen tot een dergelijke diepte, deze diepte komt echter niet goed overeen met de werkelijkheid (Figuur 1.1). Het gedrag van het LZS hindcast model is op deze locatie dus niet in lijn met de werkelijkheid. In het LZS model gebruikt voor de middellange termijn hindcast en voor de voorspelling is deze insnijding beperkt door met een aanvullende grovere sedimentfractie te rekenen (§2.4).

De luwe gebieden van het estuarium (zoals de Dollard en de Ley Bocht) sedimenteren gedurende de simulatie. Ook de platen omsloten door geulen hogen zich op (met 2 tot 4 m) waardoor intergetijdengebieden ontstaat. Deze ontwikkelingen komen goed overeen met de natuurlijke aanslibbing en ophoging. Een opmerkelijke ontwikkeling die te zien is in Figuur 3.1 en niet in overeenstemming is met de werkelijkheid is de sedimentatie aan de westelijke rand van het domein (boven de oostelijke punt van Schiermonnikoog). De sedimentatie aan de modelrand zorgt voor een drempel in kust-dwarse richting en heeft invloed op de bodemligging op de Noordzee. De drempel aan deze rand ontstaat als gevolg van de combinatie van de gebruikte randvoorwaarden en de versimpelde bodemschematisatie. Ten opzichte van de vorige modelopzet (Deltares, 2017a) komen de randvoorwaarden nu beter overeen met de werkelijkheid (§2.1). Echter, deze randvoorwaarden zijn in evenwicht met de huidige bodemligging van de Dollard. Dit werkt goed voor de huidige situatie (en voorspelling) maar is niet optimaal voor de lange termijn hindcast (omdat hier een schematische bodemligging wordt opgelegd, en niet de huidige bodemligging). Dit leidt lokaal tot onrealistische sedimentatie aan

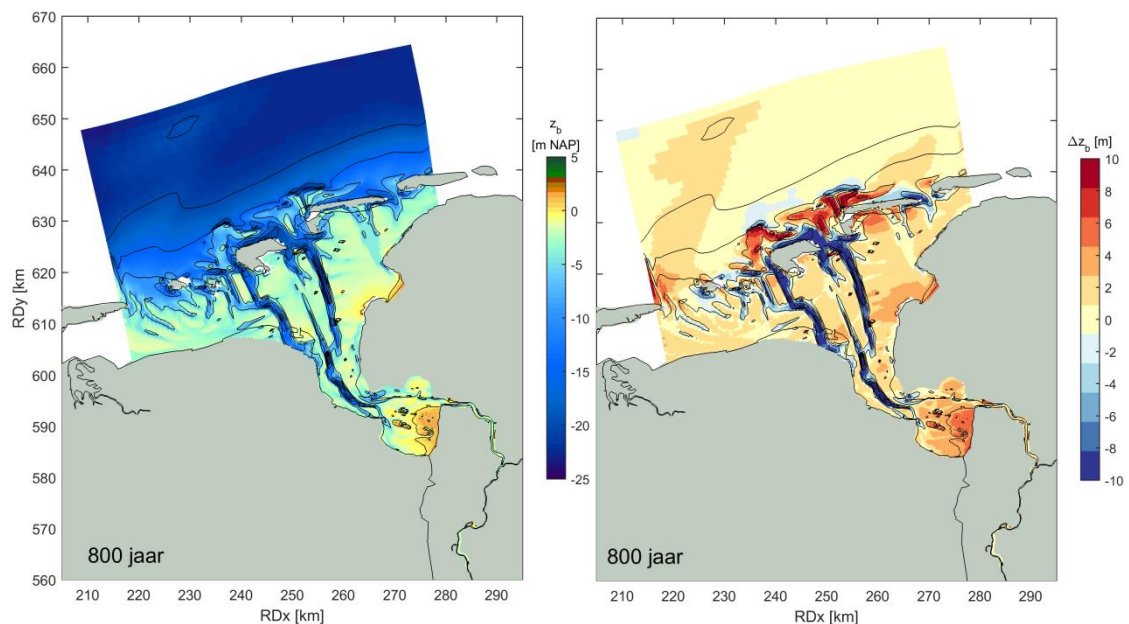
de rand. Hoewel dit ‘randeffect’ een aanzienlijke invloed heeft op de Noordzee lijkt het effect op de morfologische ontwikkeling van het estuarium beperkt. De reden hiervoor is dat de geulpatronen vooral ontstaan aan het begin van de simulatie, en de randverstoring pas later optreedt. Vanwege het belang van deze initiële geulvorming is er geen simulatie uitgevoerd met de uitbreiding van Eemshaven of de Rysumer Nacken (beide jaren '70) – deze zouden een onrealistisch groot effect op de evenwichtsgeulpatronen hebben, waarbij mogelijk de Westereems niet zou ontstaan.



Figuur 3.1 Resulterende bodemligging (links, in meter t.o.v. NAP) en bodemverandering (rechts, in meter; rood is sedimentatie) van de lange termijn hindcastsimulatie met historische kustlijn na 800 jaar simuleren.

In Figuur 3.2 wordt de simulatie getoond waarbij een kustlijn wordt voorgeschreven vergelijkbaar met de huidige situatie (Dollard en Ley Bocht afgesloten). Deze simulatie illustreert het belang van de Dollard op de dynamiek van de geulen. De twee belangrijkste morfologische effecten van het verkleinen van de Ley Bocht en de Dollard zijn de volgende:

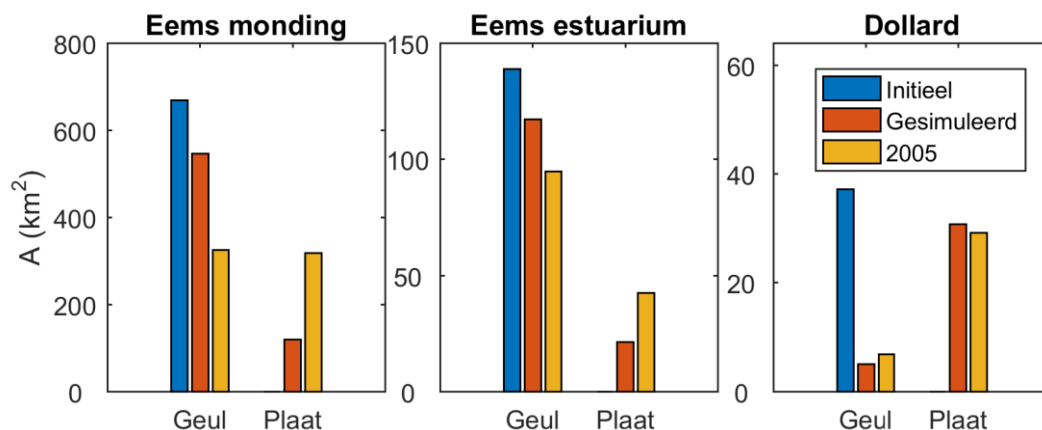
- Het relatieve belang van de westelijke geul in de monding wordt groter ten opzichte van de oostelijke geul. De Westereems lijkt maar beperkt beïnvloed te worden door de Ley Bocht, en daarom zal dit vooral het gevolg zijn van de Dollard.
- Het meergeulensysteem in het middendeel van het Estuarium (overeenkomend met de huidige situatie, met een prominent Oost Friesche Gaatje en een minder ontwikkelde Bocht van Watum – vergelijk met Figuur 1.1) verandert in een enkel-geuls systeem. Dit suggereert dat het invullen van de Dollard deels verantwoordelijk is voor het dichtslibben van de Bocht van Watum. Dit is in meer detail besproken in Deltares (2017a).



Figuur 3.2 Resulterende bodemligging (links, in meter t.o.v. NAP) en bodemverandering (rechts, in meter; rood is sedimentatie) van de lange termijn hindcastsimulatie met de huidige kustlijn na 800 jaar simuleren.

### 3.1.3 Geuldimensies en plaatareaal

De dimensies van de geulen worden in grote mate bepaald door de neiging van het model om geulen in te snijden en de mate waarin deze insnijding wordt beperkt als gevolg van harde lagen. In §2.2 en §2.3 is door middel van cumulatieve steilheidshistogrammen en hypsometrische curven getoond dat een simulatie met de gekarteerde harde lagen de geuldimensies en hypsometrische verdelingen beter nabootst dan een simulatie met de uniforme harde laag op het niveau NAP -15 m. In Figuur 3.3 is de hypsometrische verdeling geaggregeerd naar een niveau waarbij enkel een onderscheid wordt gemaakt naar geul (areaal onder NAP -1.7 m) en plaat (areaal tussen NAP -1.7 m en NAP +1.35 m) voor de drie subgebieden. Aan het figuur is af te lezen dat het model in staat is om vanaf de initiële condities (geen intergetijdengebied) een morfologie te ontwikkelen waarbij de verdeling tussen sublitoraal en litoraal in grote lijnen overeenkomt met de werkelijkheid. Dieper in het estuarium wordt deze verdeling beter gesimuleerd dan in de monding, waarschijnlijk doordat de Oostereems aan het einde van de simulatie groter is dan in werkelijkheid.

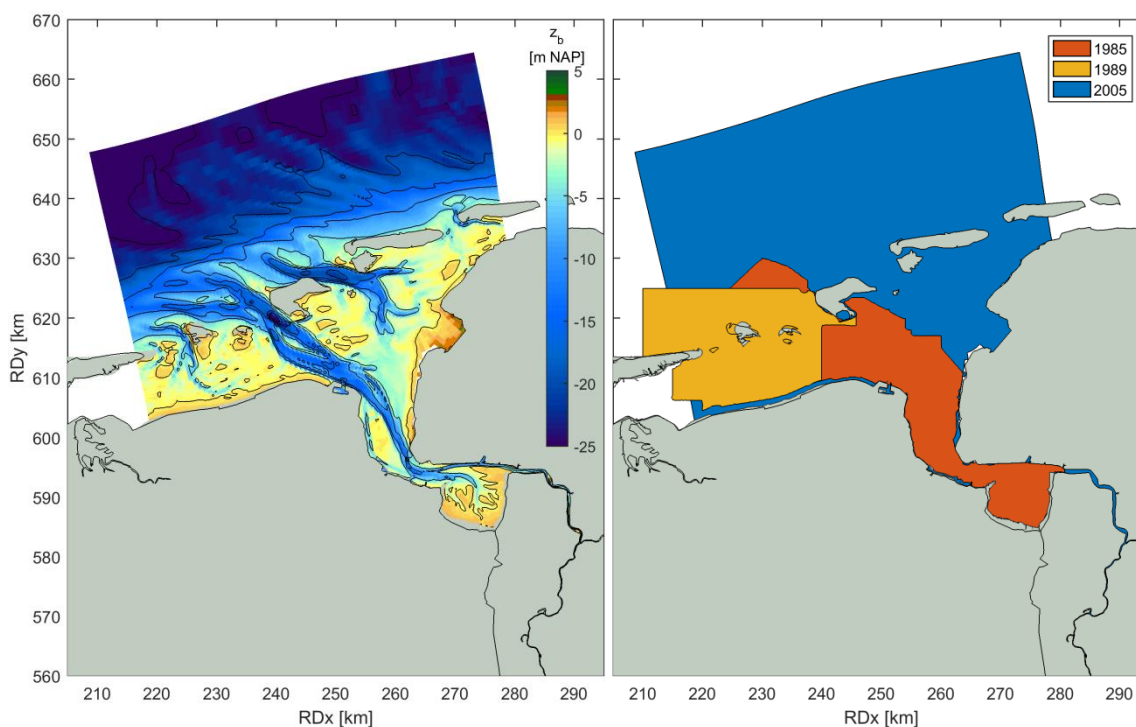


Figuur 3.3 Initieel, gesimuleerd en werkelijke verdeling van geul- (< NAP -2 m) en plaatareaal (> NAP -2 m) voor subgebieden van het estuarium.

## 3.2 Middellange termijn validatie

### 3.2.1 Introductie

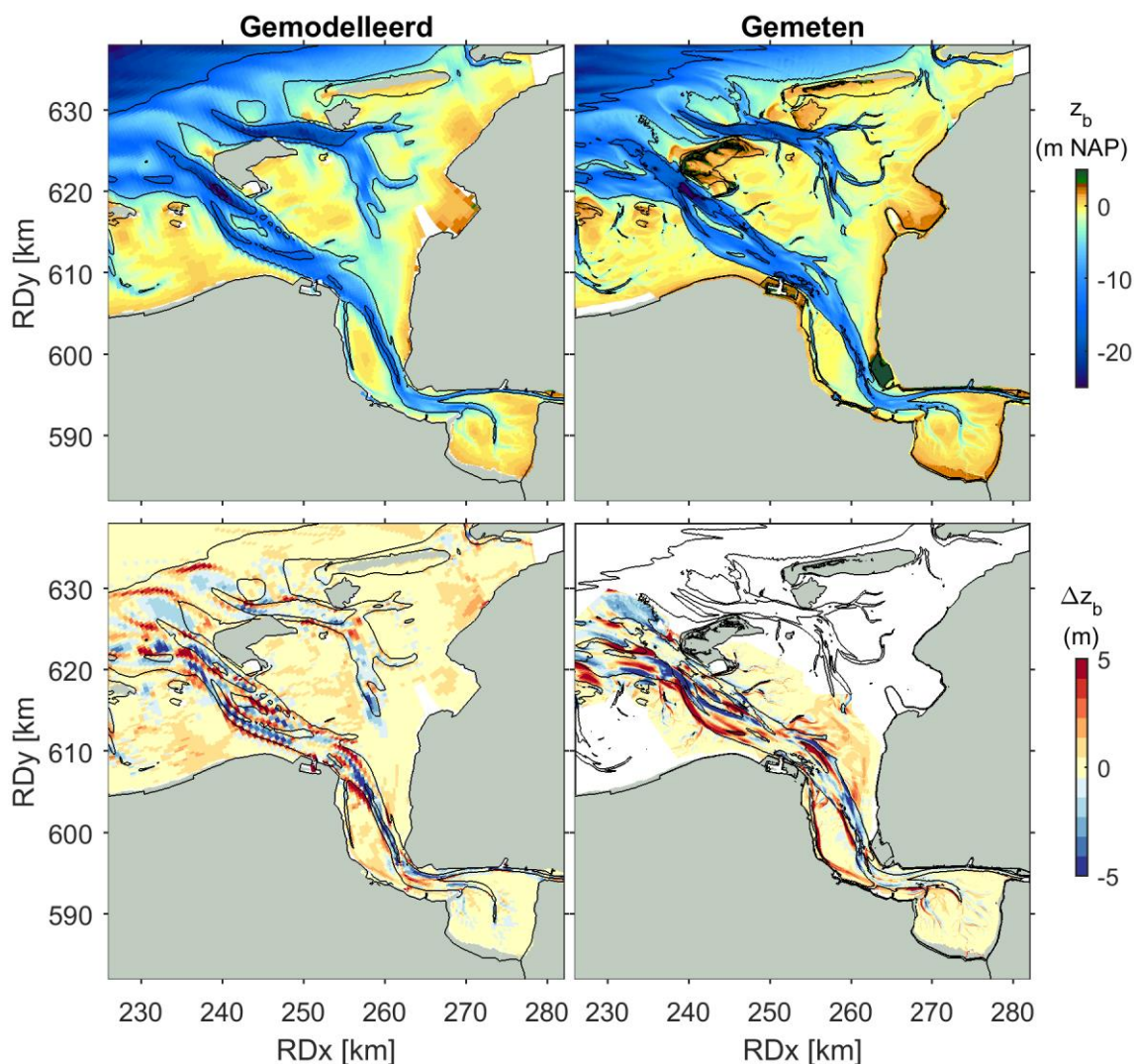
De middellange termijn hindcast is uitgevoerd om het morfologisch gedrag van het LZS-model met de instellingen zoals gebruikt voor voorspellingen (zie Tabel 2.4) te toetsen (valideren). Als validatie-exercitie wordt een periode gemodelleerd die qua lengte ongeveer gelijk is aan de periodeduur van de voorspelling (decennia). Vanwege de beschikbaarheid van goede meetgegevens (bathymetrie) voor de initiële condities en de vergelijking wordt de middellange termijn hindcast uitgevoerd voor de periode 1985 – 2014 (29 jaar). Als initiële conditie wordt een modelbathymetrie opgelegd welke grotendeels gebaseerd is op vaklodingen uit het jaar 1985 (Figuur 3.4, links). Omdat deze meetgegevens niet dekkend zijn voor het gehele modeldomein zijn de meetgegevens aangevuld met vaklodingen uit de jaren 1989 en 2005 (Figuur 3.4, rechts). Deze hindcast wordt vooral uitgevoerd om grootschalige morfologische ontwikkelingen te evalueren, en daarom is in de middellange termijn validatie geen bodemdaling, zeespiegelstijging of baggeren / storten geïmplementeerd (gelijk aan de lange-termijn validatie).



Figuur 3.4 Bodemschematisatie voor de middellange termijn hindcast (links) gebaseerd op vaklodingen uit de jaren 1985, 1989 en 2005 (rechts).

### 3.2.2 Morfologische ontwikkeling

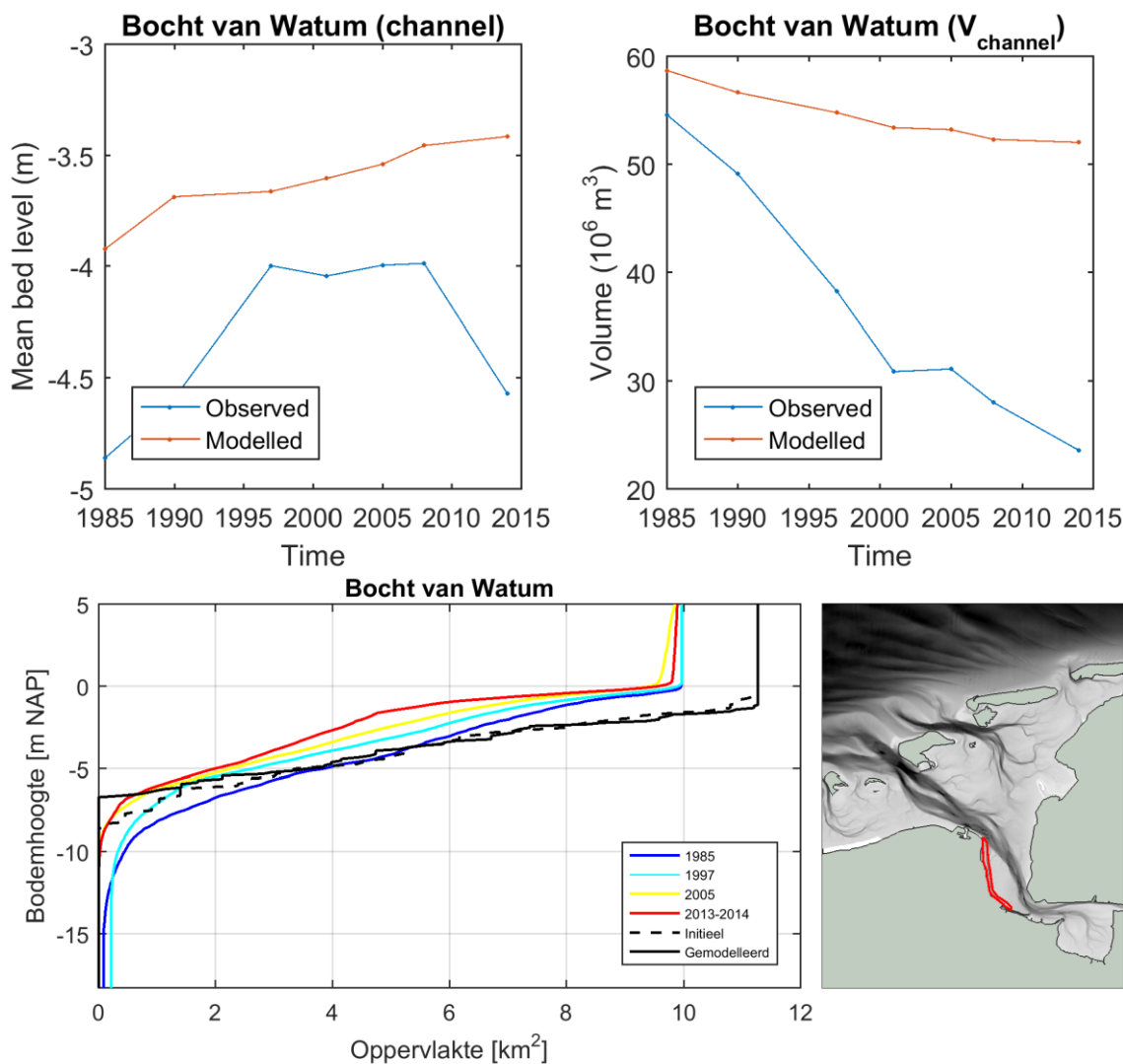
Het resultaat van de middellange termijn hindcast is in Figuur 3.5 (links) uitgezet tegen de metingen van de bodem in 2014 (rechts). De veranderingen gesimuleerd door het model over de periode 1985 – 2014 tonen enkele overeenkomsten maar ook tegenstrijdigheden met de veldmetingen. De ontwikkelingen gesimuleerd door het model worden voor enkele karakteristieke gebieden uitgelicht en hieronder besproken.



Figuur 3.5 Bathymetrie in 2014 (boven) en erosie-sedimentatiepatroon over de periode 1985 - 2014 (onder) zoals gesimuleerd door het model (links) en aan de hand van de metingen (rechts). Het korrelige erosie / sedimentatiepatroon is het gevolg van een beperkte modelresolutie.

De Bocht van Watum sedimenteert in het model, wat goed overeenkomt met de metingen. De grootte van de sedimentatie (bodemverhoging) is echter wel een orde kleiner dan in de metingen. In Figuur 3.6 is deze ontwikkeling uitgelicht door het gesimuleerde gemiddelde bodemniveau van de geul (Figuur 3.6, links), het natte volume (Figuur 3.6, rechts) en de hypsometrische verdelingen (Figuur 3.6, onder) uit te zetten tegen de metingen. Bij deze (en volgende) figuren moet opgemerkt worden dat de schematisatie van de bathymetrie van vaklodingen naar het relatief grove rekenrooster van het model een vereenvoudiging geeft van de beschrijving van het bodemniveau. Als gevolg hiervan (en het feit dat van cellen die deels buiten de polygoon vallen toch het volledige areaal meetelt) is het gemodelleerde areaal groter (zie de hypsometrische curve, vooral een gevolg van een groter aandeel sublittoraal), wat ook het volume en gemiddelde bodemligging beïnvloedt. In Figuur 3.6 is dit duidelijk waarneembaar doordat de initiële condities van het model en de metingen geen gelijke waarden geven. Het model wordt echter geëvalueerd op basis van de vergelijking tussen gemeten en gesimuleerde trends in de bodemontwikkeling en de snelheid van deze trends. De afnemende trend in het natte volume (Figuur 3.6, rechts) wordt dan ook door het model nagebootst, de snelheid is in

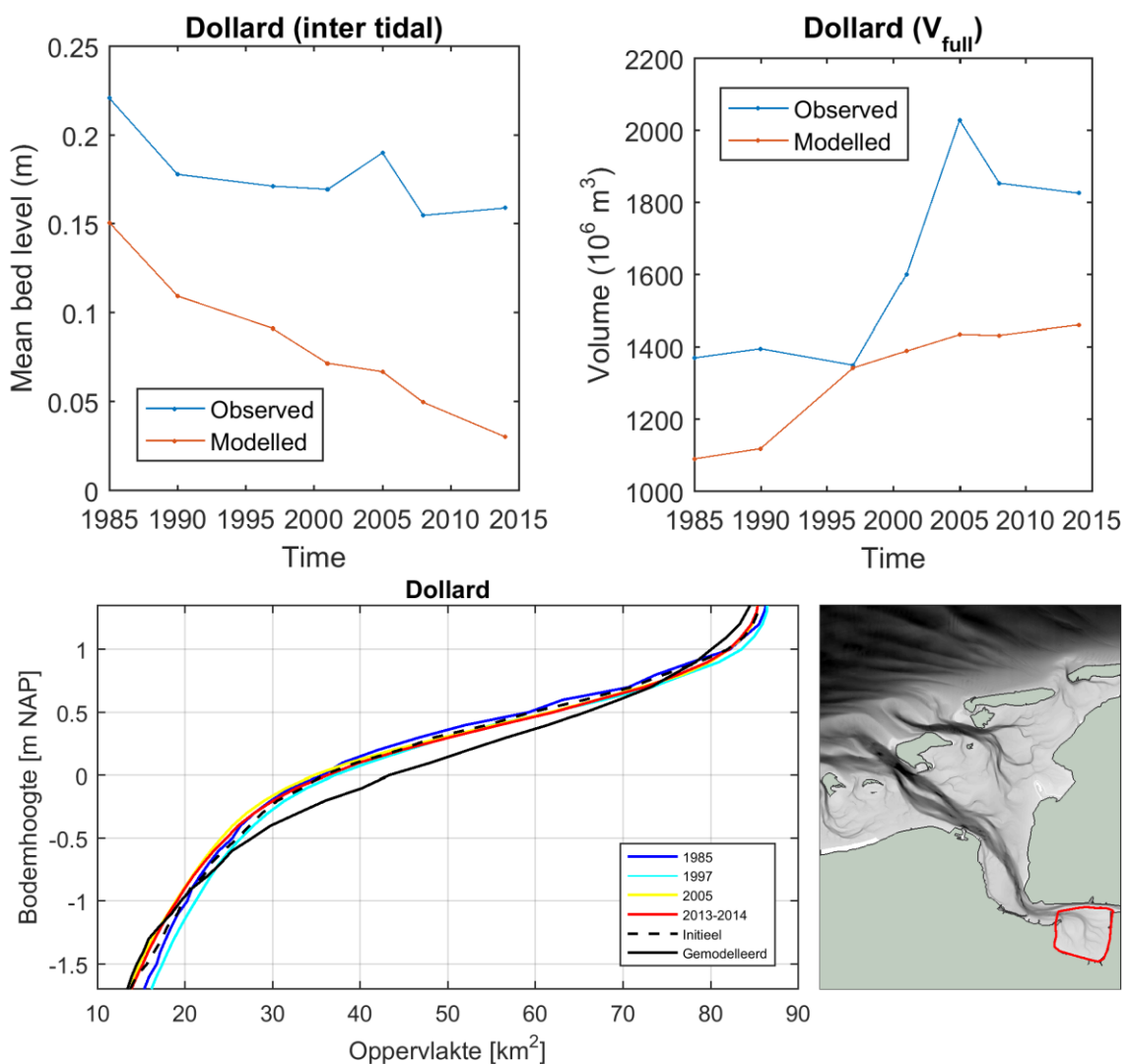
de metingen ( $-1 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ) echter groter dan gesimuleerd door het model ( $-0,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{jaar}$ ). Dit is waarschijnlijk het gevolg van de resolutie van het rekenrooster – de Bocht van Watum is erg smal, en weergegeven door slecht 2-3 cellen. Dit is erg weinig voor een juiste morfologische voorspelling. Op basis van de hypsometrische curven is te zien dat juist het diepere gedeelte van de geul toeneemt in bodemhoogte, dit gedrag wordt redelijk nagebootst door het model.



Figuur 3.6 Gemiddelde bodemhoogte (links boven), het watervolume onder NAP (rechtsboven) en de hypsometrische curven (onder) van de Bocht van Watum berekend op basis van metingen en de gesimuleerde bodemligging.

De gesimuleerde ontwikkeling van de Dollard is grotendeels stabiel (bodemveranderingen minder dan 0.5 meter - zie Figuur 3.5). De geulmigraties die wel duidelijk te zien zijn in de metingen worden veroorzaakt door geulen (prielen) met een dimensie kleiner dan de resolutie van het rekenrooster van het model. Het model kan dergelijke ontwikkelingen niet reproduceren. De gesimuleerde ontwikkeling van de Dollard is uitgelicht in Figuur 3.7. Hier is het gemiddelde bodemniveau van het intergetijdengebied weergegeven voor de metingen en gesimuleerd door het model (Figuur 3.7, linksboven). Het intergetijdengebied is gedefinieerd als het niveau tussen Gemiddeld Laag Water (GLW) en Gemiddeld Hoog Water (GHW); bij Delfzijl is dit tussen NAP -1.70 m en NAP +1.35 m). De figuur laat zien dat gedurende de ~30-

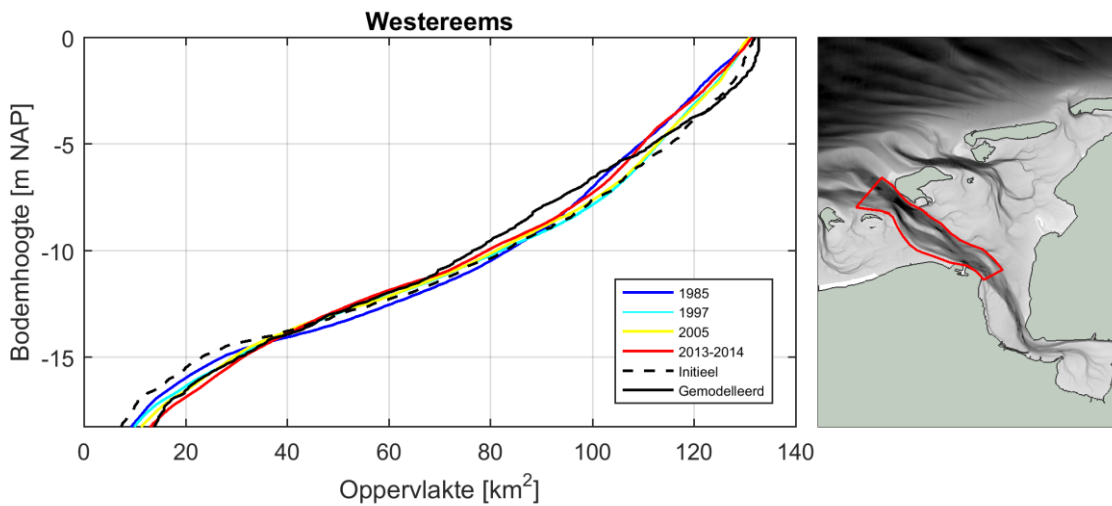
jarige periode het gemiddelde bodemniveau van het intergetijdengebied is verlaagd en dat dit door het model tevens wordt nagebootst. Dit betekent echter niet dat er sediment verdwijnt uit het Dollardgebied, zoals geïllustreerd door het sedimentvolume van het Dollardgebied (Figuur 3.7, rechtsboven). Er vindt in dit gebied blijkbaar een trend van nivellering plaats waarbij de geulen opvullen waarmee de volume-afname als gevolg van het verlagen van het intertidaal ruimschoots wordt gecompenseerd. De hypsometrische curven laten dan ook een toename in bodemhoogte zien voor het diepere gedeelte maar een afname rond NAP. Het bovenste gedeelte van het litoraal (rond NAP 1m) is juist weer toegenomen in de tijd.



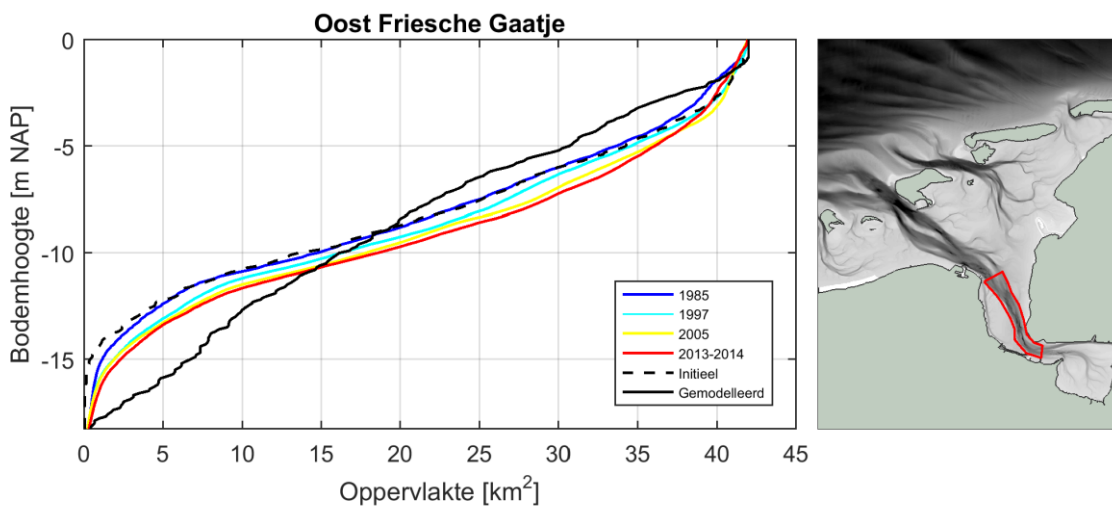
Figuur 3.7 Gemiddelde bodemligging van het intergetijdengebied (linksboven), het sedimentvolume (rechtsboven) en de hypsometrische curven (onder; uitvergroot tussen GLW en GHW) van de Dollard berekend op basis van de metingen en de gesimuleerde bodemligging. Het intergetijdengebied is cf definitie tussen GLW en GHW. Het sedimentvolume is gedefinieerd als de laagdikte (boven een referentievlak) vermenigvuldigd met het oppervlak (per rekencel).

In het mondingsgebied is er een afwisseling van erosie en sedimentatie waar te nemen in de gesimuleerde ontwikkeling (Figuur 3.5) als gevolg van geulverplaatsing. Een dergelijke afwisseling is ook te zien in de metingen. Echter de gesimuleerde uitschuring van de Oude Westereems (ten zuiden van de Meeuwenstaart) komt niet overeen met de werkelijkheid. De

hypsometrische curven van het hele gebied rondom de Oude Westereems (Figuur 3.8) laten zien dat de berekende veranderingen redelijk overeenkomen met de metingen. Het model presteert hier waarschijnlijk vrij goed doordat de morfologische ontwikkeling sterk gestuurd wordt door de aanwezigheid van ondiepe erosie-resistente lagen (Figuur 2.5). De resultaten van het model laten namelijk ook zien dat het model ter plaatse van de Oostereems de neiging heeft de geul uit te schuren. Door de afwezigheid van metingen in 2014 is de ontwikkeling van de Oostereems niet te zien in de metingen, maar deze geul is al eeuwenlang aan het degenereren. Het model lijkt dus de neiging te hebben de geulen meer uit te schuren dan in werkelijkheid het geval is, indien uitschuring (insnijding) niet beperkt wordt door een erosieresistente laag. Dit gedrag wordt duidelijk geïllustreerd door de hypsometrische curven van het Oost Friesche Gaatje (Figuur 3.9). Het model snijdt hier te diep in waardoor er veel sediment beschikbaar komt dat afgezet wordt in de hogere gedeelte. De gesimuleerde hypsometrische verdeling wijkt daardoor af van de werkelijkheid.



Figuur 3.8 Hypsometrische curven van de Oude Westereems berekend op basis van de metingen en de gesimuleerde bodemligging.



Figuur 3.9 Hypsometrische curven van het Oost Friesche Gaatje berekend op basis van de metingen en de gesimuleerde bodemligging.



### 3.3 Conclusies

De lange termijn (centennia) en middellange termijn (decennia) hindcastsimulaties laten zien dat het LZS-model in staat is de historische morfologische ontwikkeling van het Eems estuarium redelijk te reproduceren. Het middellange termijn LZS-model reproduceert de ontwikkeling van de Dollard (intergetijdengebied) en laat een laterale geulontwikkeling zien die redelijk overeenkomt met metingen. Wel worden geulen te diep ingesneden. Op locaties waar de insnijding van de geul in werkelijkheid gelimiteerd wordt door de aanwezigheid van erosieresistente lagen kan het model de ontwikkeling wel goed nabootsen doordat de insnijding in het model hierdoor beperkt wordt.

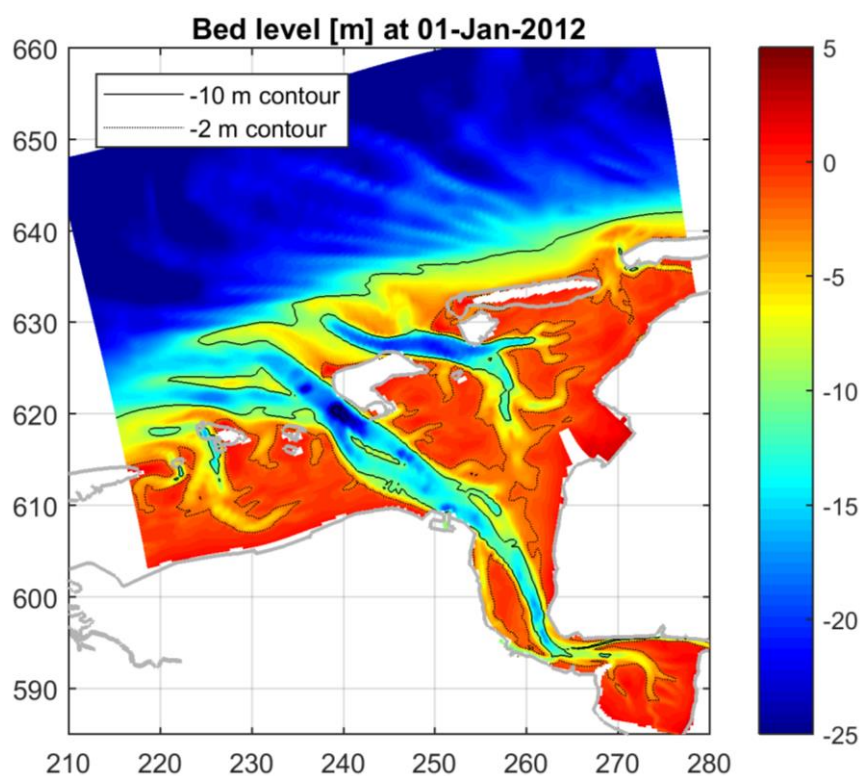


## 4 Modelresultaten: voorspelling

### 4.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt de voorspelling van de autonome ontwikkeling van het estuarium besproken, en de invloed van bodemdaling, zeespiegelstijging en van baggeren en storten daarop. De volgende berekeningen (scenario's) zijn gedaan:

- **Autonome ontwikkeling:** de ontwikkeling van het Eems estuarium bij huidig bagger- en stortbeleid, bodemdaling door gaswinning, en met zeespiegelstijging volgens het KNMI2014W-scenario met een relatief sterke zeespiegelstijging.
- **Effect van zeespiegelstijging en bodemdaling (ten opzichte van autonome ontwikkeling):** de ontwikkeling van het Eems-estuarium bij autonome ontwikkeling maar zonder bodemdaling en zeespiegelstijging.
- **Effect van onttrekken van slib (ten opzichte van autonome ontwikkeling):** de ontwikkeling van het Eems-estuarium wanneer slib wat bezinkt in havens wordt onttrokken.



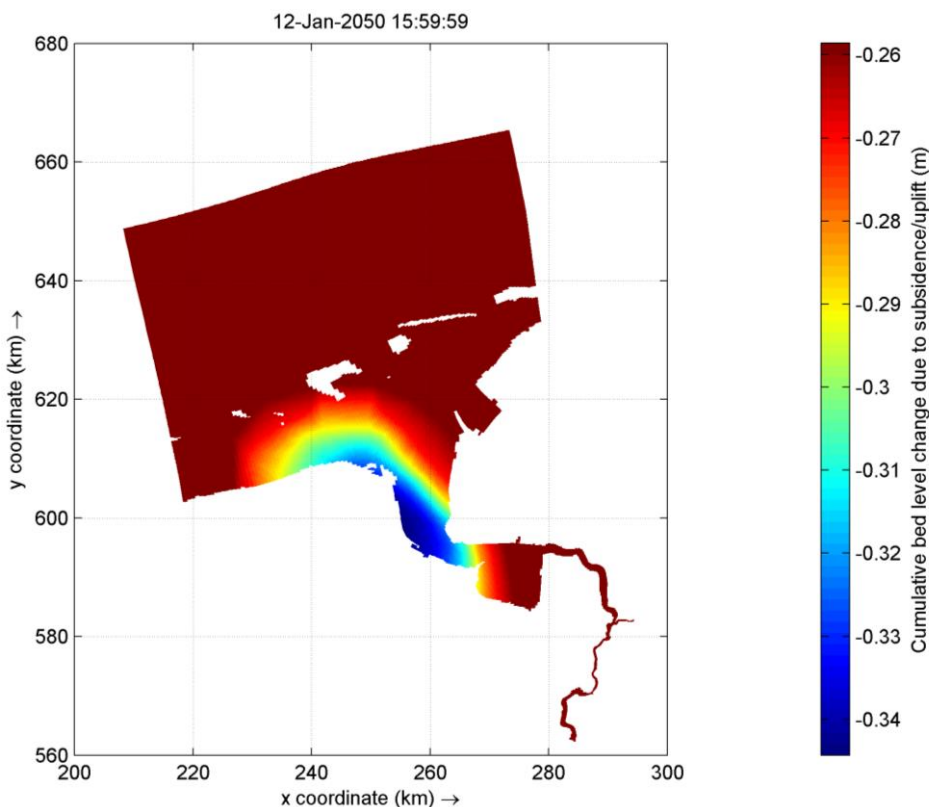
Figuur 4.1 Bodemligging in het model aan de start van de simulatie.

Deze scenario's worden onderzocht met behulp van een drietal modellen, in de volgende wijze:

- 1 Het middellange termijn LZS-model wordt gebruikt om de morfologische ontwikkeling te voorspellen tot 2050. Deze scenario's worden doorgerekend met de gemeten bodem van 2012 als start (Figuur 4.1). De doorgerekende scenario's zijn (1) autonome ontwikkeling, (2) autonoom met onttrekking slib uit havens, en (3) autonoom zonder bodemdaling en zeespiegelstijging.

- 2 Het D3S-model wordt gebruikt om slibconcentratievelden te berekenen voor de huidige situatie (2012) en de voorspelling voor 2050 op basis van bodems berekend met het LZS-model (en de juiste bagger en stortstrategieën). De berekende concentratievelden worden vergeleken in de tijd (verandering tussen 2012 en 2050) en per scenario (verschil tussen een specifiek scenario en de autonome ontwikkeling). Zoals besproken in §2.6 wordt voor de bodemligging in 2012 een combinatie van gemeten bodems (het Eems-estuarium) en berekende bodems (de Eems Rivier) gebruikt.
- 3 Het Dollard-model wordt gebruikt om de autonome ontwikkeling en onzekerheden in het meegroeien van slibrijke gebieden met zeespiegelstijging in meer detail te onderzoeken met een gevoeligheidsanalyse. Met dit model worden geen uitspraken gedaan over bagger- en stortstrategieën.

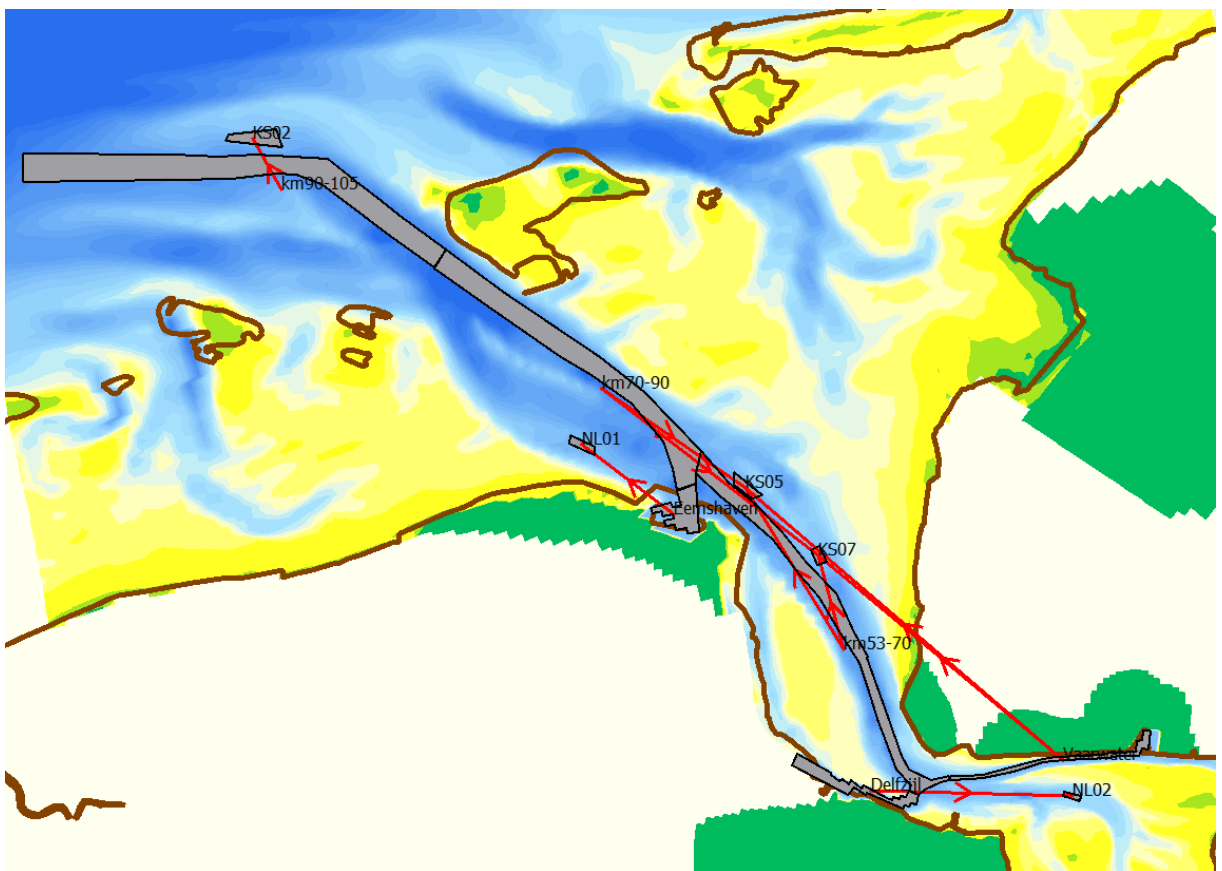
In dit hoofdstuk worden de modelresultaten besproken, maar nog niet geïnterpreteerd. In Hoofdstuk 5 worden de resultaten geïnterpreteerd en wordt de nauwkeurigheid van het gebruikte modelinstrumentarium in meer detail besproken.



Figuur 4.2 Zeespiegelstijging en bodemdaling in 2050 t.o.v. 2012.

Voor de zeespiegelstijging wordt een stijging van 26 cm in 2050 t.o.v. 2012 aangehouden (het KNMI 2014 W scenario – zie Deltares, 2017a). Tussen 2050 en 2100 is de zeespiegelstijging 1.2 cm/jaar (alleen relevant voor het Dollard model). In het model is de zeespiegelstijging geïmplementeerd als bodemdaling (geleidelijk, per rekentijdstap), zodat de vaste interventiediepte van de baggermodule rekening houdt met de toename in waterdiepte als gevolg van zeespiegelstijging (In Delft3D is deze interventiediepte namelijk altijd gedefinieerd t.o.v. een vast referentievlak zoals NAP). Figuur 4.2 toont de zeespiegelstijging (als negatieve waarde, want geïmplementeerd als bodemdaling) en de bodemdalingsschotel als gevolg van gaswinning. De bodemdaling is nabij Delfzijl nog ca. 8 cm bovenop de zeespiegelstijging over een periode van 38 jaar.

Baggeren en storten vinden plaats via een bagger- en stortmodule, waarbij sediment wordt verwijderd wanneer een bepaalde bodemhoogte wordt overschreden. Deze bodemhoogte komt overeen met de formele baggerafspraken in het Eems-estuarium. Het materiaal wordt gestort op locaties welke ook overeenkomen met de werkelijke stortlocaties (zie Figuur 4.3). Voor Delfzijl wordt de oude bagger- en stortroutine gevolgd (storten in Groote Gat) terwijl tegenwoordig het merendeel via airset wordt weggespoten. De reden hiervoor is dat airset een zeer hoge horizontale resolutie nodig heeft om realistisch door te kunnen rekenen, wat niet haalbaar is met het gebruikte modelinstrumentarium.



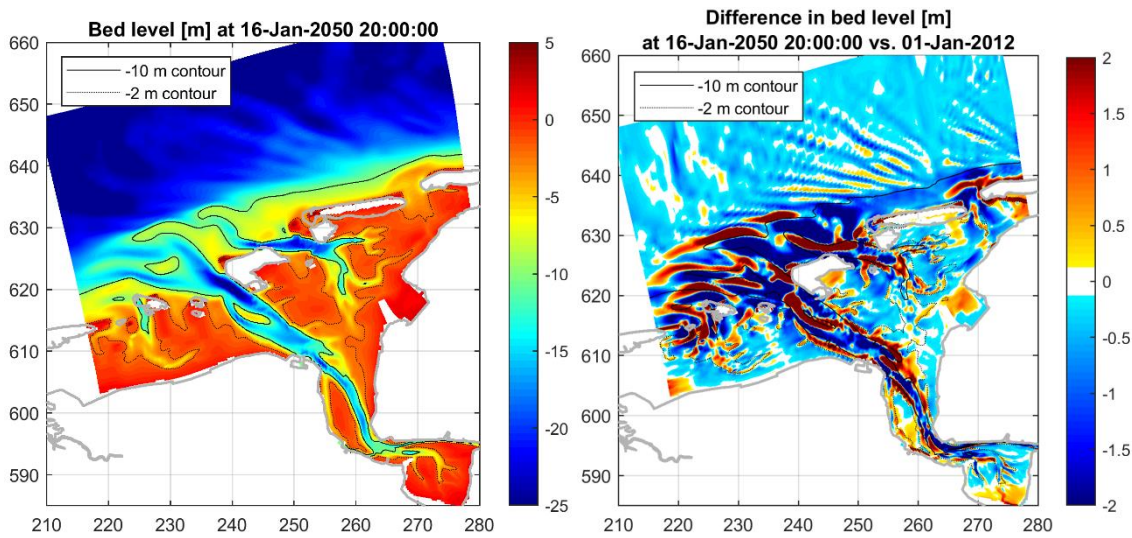
Figuur 4.3 Bagger- en stortvakken zoals geïmplementeerd in het LZS model.

## 4.2 Autonome ontwikkeling

### 4.2.1 Morfologische veranderingen Eems estuarium (LZS model)

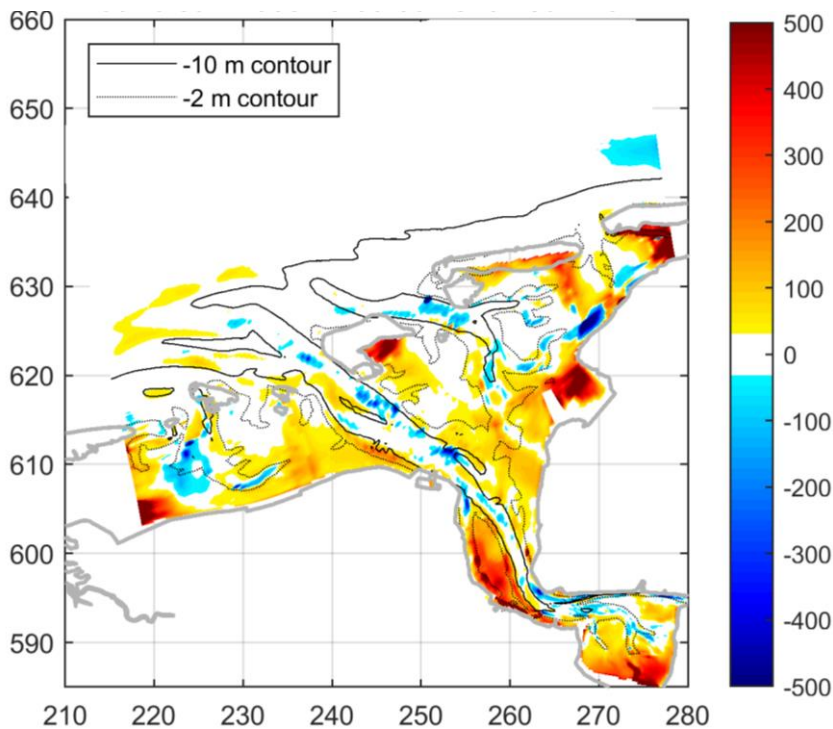
In 2050 ziet de bodemligging volgens het model eruit zoals weergegeven in Figuur 4.4. De belangrijkste morfologische veranderingen zijn:

- uitschuring van de hoofdgeul van het estuarium
- verhoging van de bodemligging ter plaatse van de stortvakken met uitzondering van het stortvak Groote Gat in de Dollard
- verdieping van de Noordzeebodem en intergetijdengebieden in de Waddenzee als gevolg van zeespiegelstijging
- erosie van de buitenzijde van de Waddeneilanden en buitendelta's
- sedimentatie achterin het estuarium, bij de Ley Bocht, het zuidelijk deel van de plaat Hond-Paap en het zuidoostelijk deel van de Dollard
- erosie in de binnenbocht bij Knock

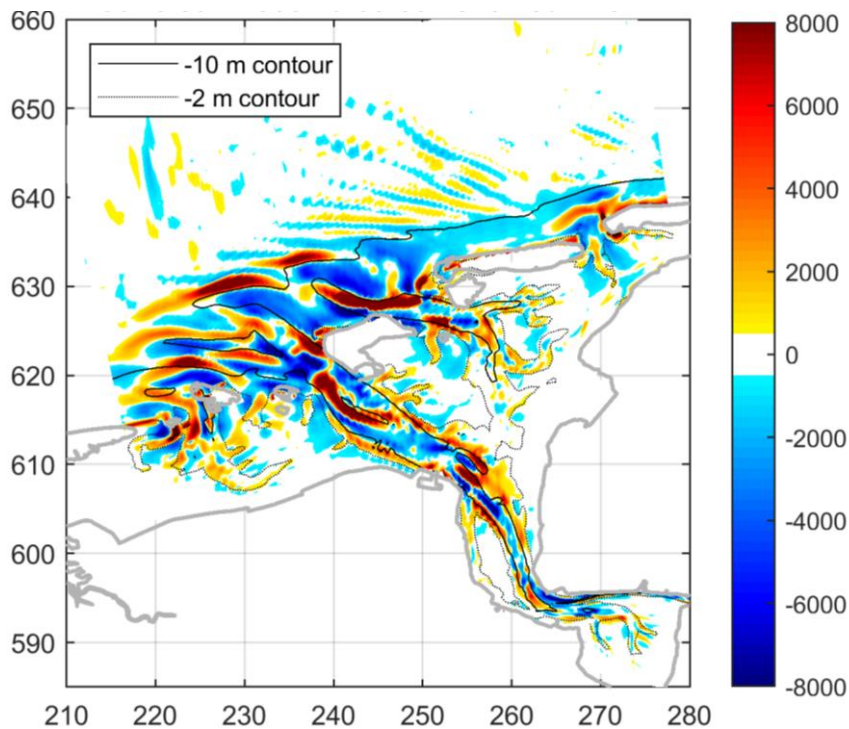


Figuur 4.4 Links: bodemligging in 2050 met bijbehorende contourlijnen bij autonome ontwikkeling. Rechts: verschil in bodemligging tussen 2050 en 2012, met contourlijnen van 2012.

Figuur 4.5 laat zien dat in de gebieden waar sedimentatie optreedt (Dollard, Ley Bocht, Hond-Paap) slib wordt afgezet, terwijl aanzanding daar minimaal is (Figuur 4.6). Deze gebieden worden dus slibrijker. Dit betekent dat slibimport en -afzetting belangrijk zijn voor het meegroeien met zeespiegelstijging van de intergetijdengebieden. Gebieden waar de hoeveelheid zand toeneemt (Figuur 4.6) liggen vooral in de geulen.

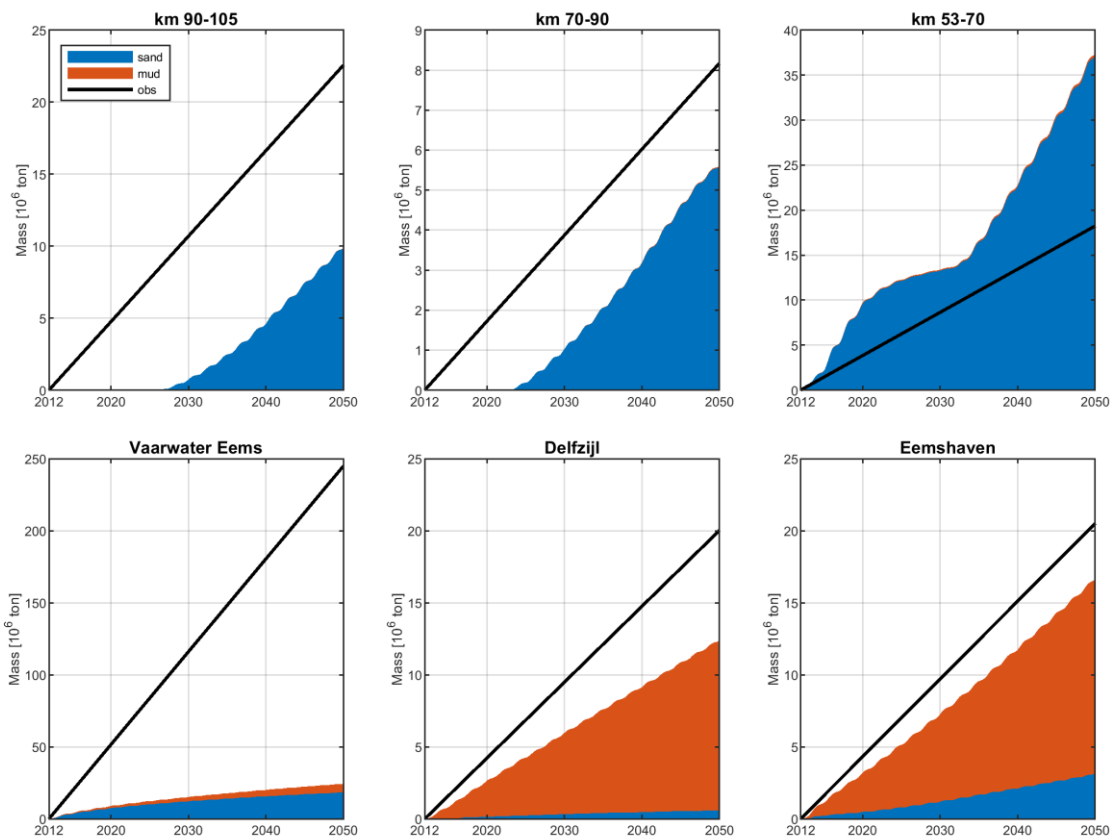


Figuur 4.5 Verschil in de hoeveelheid slib in de bodem [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] over de simulatieperiode tussen 2012 en 2050 met contourlijnen van 2012.



Figuur 4.6 Verskil in de hoeveelheid zand in de bodem [ $\text{kg/m}^2$ ] over de simulatieperiode tussen 2012 en 2050 met contourlijnen van 2012.

De cumulatieve hoeveelheid gebaggerd sediment tijdens de simulatieperiode wordt weergegeven in Figuur 4.7. Deze kan vergeleken worden met huidige baggervolumes, waarbij het huidige baggerbezwaar cumulatief is doorgetrokken (zwarte lijn). Het gebaggerde materiaal in de vaargeul tussen de Noordzee en Knock (km 53 t/m km 105) is (in werkelijkheid) voornamelijk zandig, in de havens (vooral Delfzijl) en het Emders Vaarwater wordt meer slib gebaggerd. Figuur 4.7 toont de berekende hoeveelheid gebaggerd sediment (zand in geel, slib in bruin) voor de autonome ontwikkeling. Het model reproduceert de tweedeling tussen meer zandige baggerspecie in de toegangseul tussen de Noordzee en Knock, en meer slibrijk materiaal in de havens. Over het hele zandige bereik worden de werkelijke baggervolumes goed gereproduceerd (53 miljoen ton berekend en 48 miljoen ton volgens huidig baggerbezwaar). In het model wordt hier echter relatief veel van gebaggerd tussen km 53 en km 70. In het Emders Vaarwater wordt structureel een te laag baggervolume voorspeld door het model, en dit materiaal is ook veel zandiger dan in de werkelijkheid (vooral slib). Dit komt enerzijds omdat de processen die daar de aanslibbing veroorzaken nog niet goed begrepen zijn (vandaar dat binnen het overkoepelende project ook een grote meetcampagne is opgezet) en de slibdynamiek in deze modelversie is geschematiseerd naar 2D en anderzijds doordat de Eemsrivier met onvoldoende resolutie in het modelrooster is opgenomen vanwege de rekentijd.



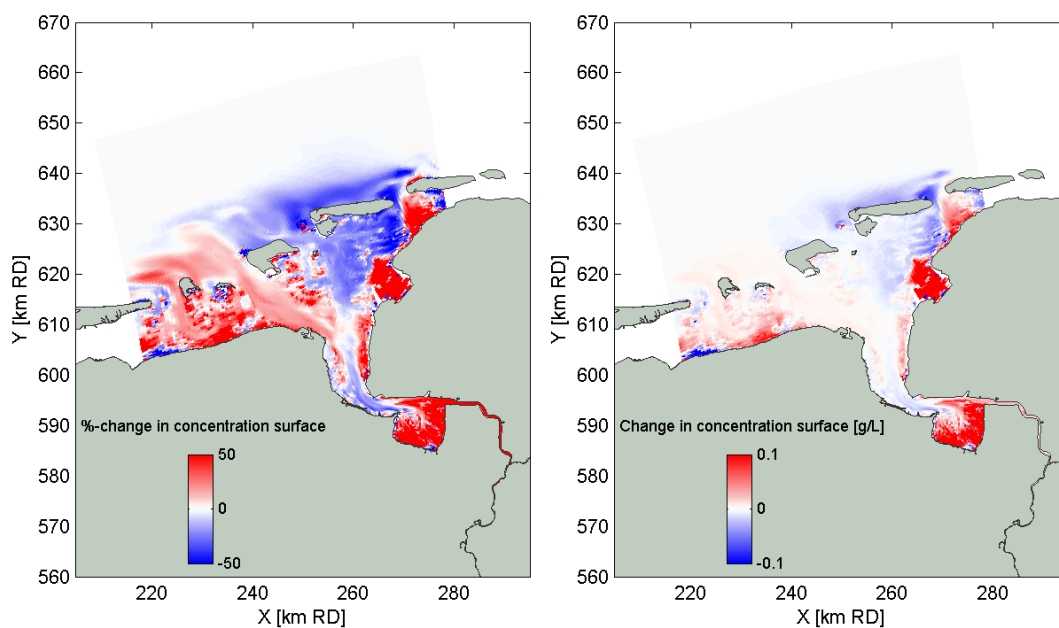
Figuur 4.7 Baggermassa's (cumulatief, van 2012 tot aan 2050) voor de autonome ontwikkeling (met zeespiegelstijging en bodemdaling) zoals voorspeld voor het model (blauwe en rode vlakken voor resp. zand en slib) en zoals gemeten (totaalgewicht, zwarte lijnen).

## 4.2.2 Veranderingen in slibconcentratie (D3S model)

Bij autonome ontwikkeling neemt de slibconcentratie nabij het wateroppervlak toe boven ondiepe gebieden (vooral de Dollard en de Ley Bocht), zie Figuur 4.8. De sterkste afname van de sedimentconcentratie wordt voorspeld voor het oostelijke deel van het mondingsgebied (rond de Oostereems) en voor het middendeel. Opvallend is de toename van de sedimentconcentratie in het vaarwater naar Emden en de Eems Rivier. Als deze toename echter wordt vergeleken met de veranderingen in de sedimentconcentratie in de Eems Rivier als gevolg van de uitschuring van de Eems Rivier zelf (§2.6), valt op dat de concentratie in de Eems Rivier meer wordt gestuurd door de bodemligging van de Eems Rivier dan door veranderingen in het estuarium (zie Figuur 4.9). Uit de berekende concentraties voor de bodems uit 2012, 2050 en 2012 met uitgeschuurde Eems Rivier bodem kan het volgende worden geconcludeerd:

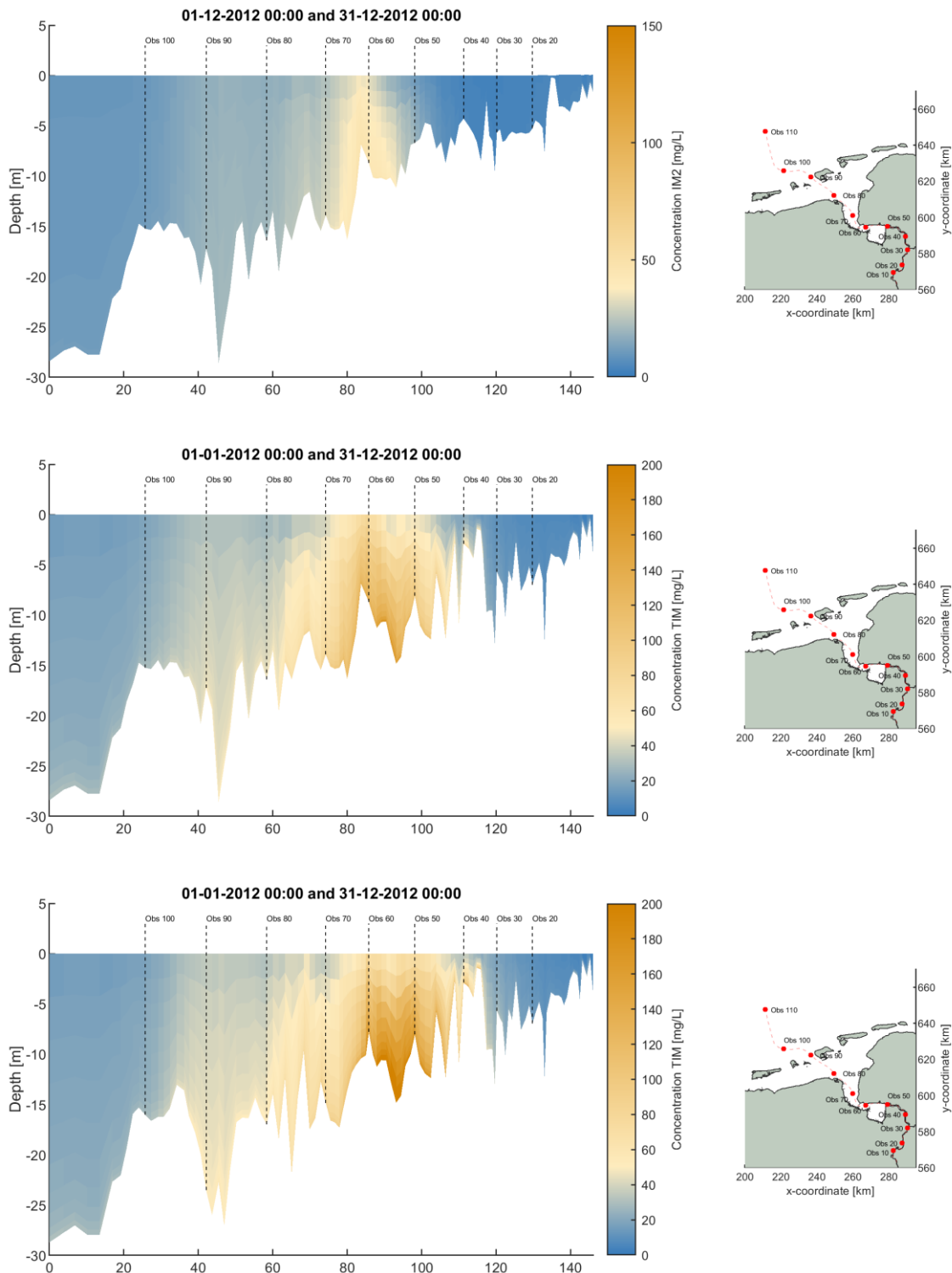
- Voor interpretatie van de effecten van autonome ontwikkelingen in het Eems estuarium is het noodzakelijk dat een uitgeschuurde Eems rivier als referentie aangehouden wordt.
- Bodemveranderingen in de Eems Rivier en het vaarwater naar Emden hebben een grotere invloed op de slibdynamiek in het vaarwater naar Emden en de Eems Rivier dan veranderingen in het Eems estuarium.





*Figuur 4.8 Toename in slibconcentratie tussen 2012 en 2050 bij autonome ontwikkeling: procentueel (links) en absoluut (in g/l, rechts)*

Waarom de slibconcentratie toeneemt boven de platen (en afneemt in de geulen) wordt in meer detail besproken in §4.3.3, waar dieper in wordt gegaan op het effect van zeespiegelstijging.



Figuur 4.9 Jaargemiddelde slibconcentratie met volledige 2012 bodem (boven), 2012 bodem met uitgesuurde Eems Rivier (midden), en voor de 2050 bodem (beneden) in de thalweg van het Eems estuarium. De uitschuring zelf is niet zichtbaar in de bodemligging, omdat dit alleen de diepte van de oorspronkelijke thalweg weergeeft.

### 4.3 Effect zeespiegelstijging en bodemdaling

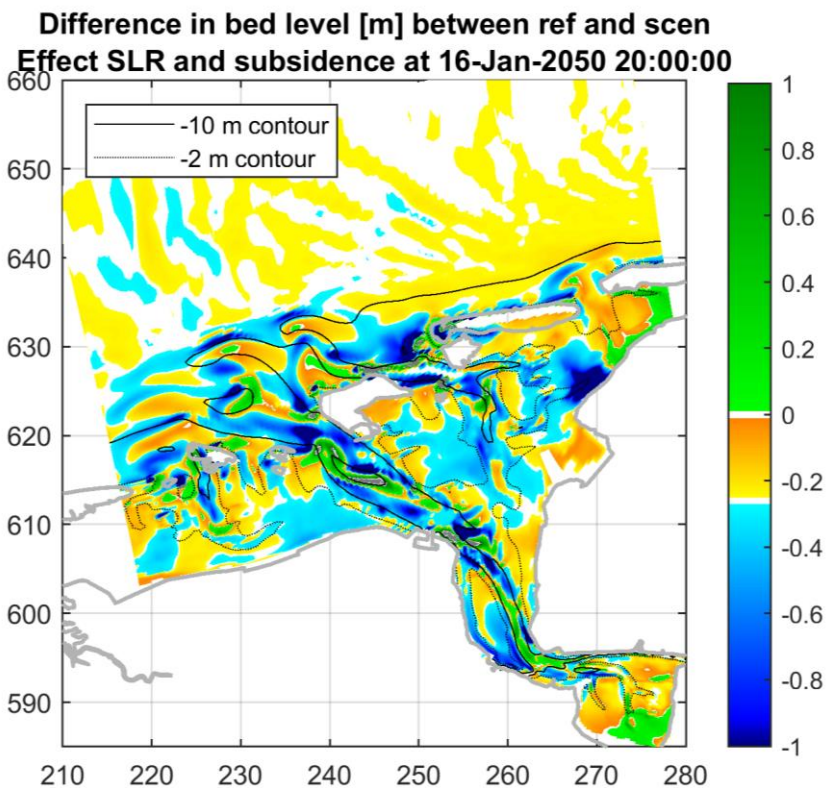
De autonome ontwikkeling (vorige paragraaf) is doorgerekend met zeespiegelstijging en bodemdaling. In deze paragraaf wordt de bijdrage van zeespiegelstijging en bodemdaling aan die autonome ontwikkeling onderzocht door een berekening zonder zeespiegelstijging en bodemdaling te vergelijken met de autonome ontwikkeling.

#### 4.3.1 Morfologische veranderingen Eems estuarium (LZS model)

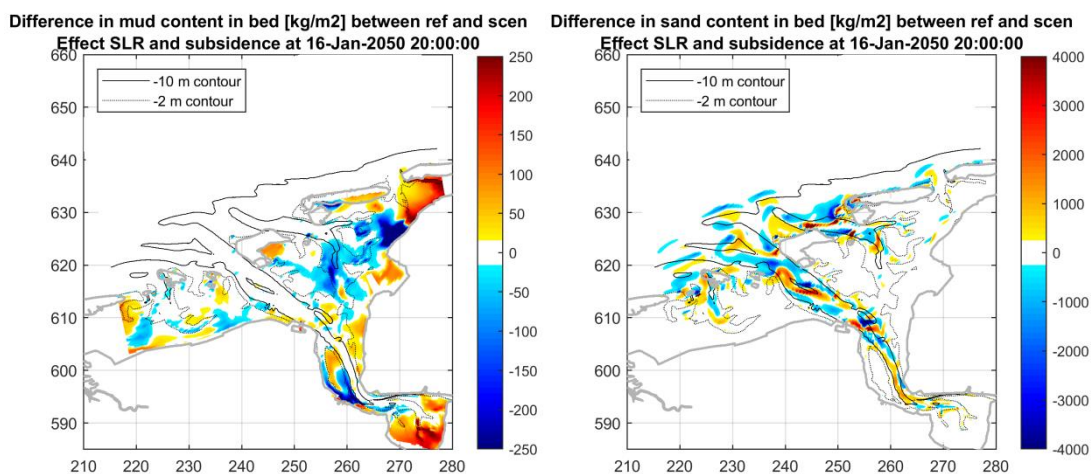
Figuur 4.10 toont het effect van zeespiegelstijging en bodemdaling op de bodemligging. Hiervoor is (voor het jaar 2050) de bodem berekend ZONDER zeespiegelstijging en bodemdaling afgetrokken van een bodem MET zeespiegelstijging en bodemdaling (de autonome ontwikkeling). De zeespiegelstijging is geïmplementeerd als een bodemdaling van 26 cm tot aan 2050. Deze figuur moet als volgt geïnterpreteerd worden. Wanneer de bodem precies meegroeit met de zeespiegelstijging, is het verschil in bodemligging tussen beide scenario's 0. Een waarde tussen 0 en -0.26 meter (gele kleuren) suggereert dat de bodem deels meegroeit met zeespiegelstijging (maar nog steeds verdrinkt). Waardes lager dan -0.26 m (blauwe kleuren) betekent versnelde verdrinking (de bodem groeit niet mee met zeespiegelstijging, en erodeert zelfs). Een waarde hoger dan 0 meter (groen) betekent een sterkere groei dan de zeespiegelstijging zelf (de relatieve waterdiepte neemt dus af).

Let op dat deze bodemveranderingen alleen de respons op zeespiegelstijging en bodemdaling weergeven, niet de totale bodemverandering. De Ley Bocht bijvoorbeeld, laat sterke sedimentatie zien in de autonome ontwikkeling (Figuur 4.4) maar dit is niet puur het gevolg van zeespiegelstijging, want in Figuur 4.10 is de Ley Bocht geel en niet groen. Ook kan het zijn, dat gebieden in de autonome ontwikkeling eroderen, maar door zeespiegelstijging minder eroderen dan als er geen zeespiegelstijging zou zijn. In dat geval laat het verschilplaatje ook een gele of groene arcering zien (bijv. noordelijk deel Hond-Paap).

Door de bodemveranderingen (Figuur 4.10) te vergelijken met veranderingen in de slibhoeveelheid (Figuur 4.11) blijkt dat de gebieden die binnen het Eems estuarium meegroeien met zeespiegelstijging (deels of volledig) ook een toename in slibhoeveelheid in de bodem laten zien. Dit wil zeggen dat de toename in de bodemligging voor een groot deel wordt veroorzaakt door aanslibbing (en niet aanzanding). De belangrijkste gebieden met sterke aanslibbing zijn de Dollard, delen van Hond-Paap, en de Ley Bocht. Erosie vindt vooral plaats in en langs geulen als gevolg van geulmigratie (als een geul zijwaarts verschuift vult de oude geul op, en wordt de nieuwe locatie gekenmerkt door sterke erosie). Deze veranderingen betreffen vooral zandig materiaal (vergelijk Figuur 4.10 met Figuur 4.11). Ook bodemveranderingen in het buitengebied zijn vooral het gevolg van zandverplaatsingen.



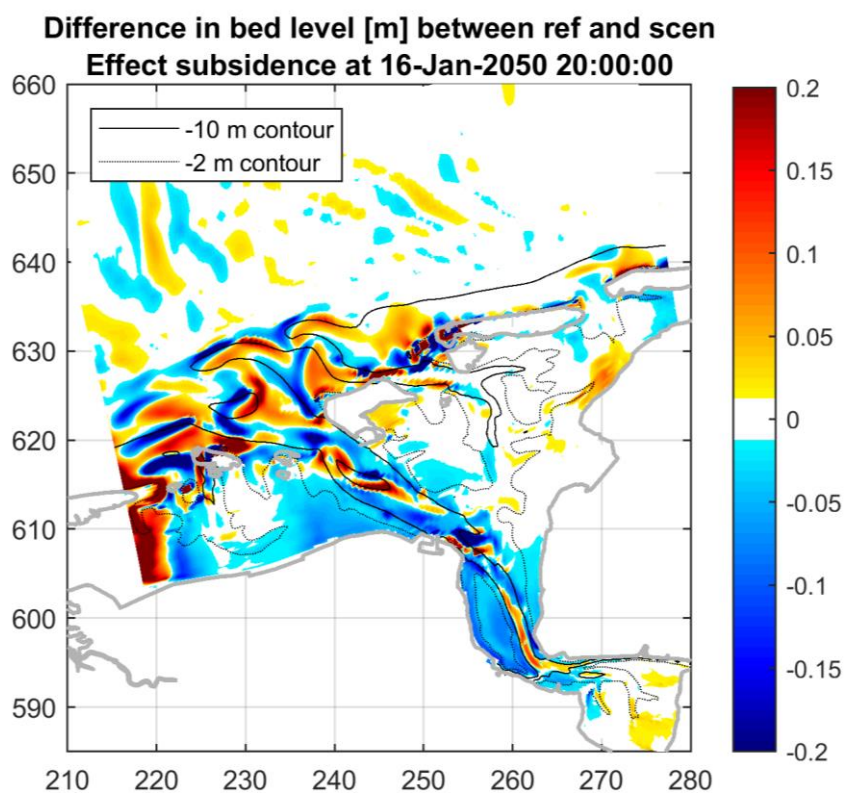
Figuur 4.10 Bodemveranderingen enkel als gevolg van zeespiegelstijging in 2050 met contourlijnen van 2050. Blauwe gebieden tonen erosie, gele gebieden een langzamere meegroeisnelheid dan de zeespiegelstijgingssnelheid en groene gebieden sedimenteren meer dan de zeespiegelstijging.



Figuur 4.11 Links: Verschil in slibhoeveelheid [kg/m<sup>2</sup>, 250 kg/m<sup>2</sup> is equivalent met 0.5 m] in de bodem in 2050 voor simulatie met zeespiegelstijging ten opzichte van simulatie zonder zeespiegelstijging. Rechts: Verschil in zandhoeveelheid [kg/m<sup>2</sup>, 400 kg/m<sup>2</sup> is equivalent met 0.25 m] in de bodem in 2050 voor simulatie met zeespiegelstijging ten opzichte van simulatie zonder zeespiegelstijging. Contourlijnen geven bodemligging in 2012. Een positieve waarde betekent een toename in het slibgehalte (links) of zandgehalte (rechts) door zeespiegelstijging.

Op een vergelijkbare manier kan het effect van bodemdaling worden berekend voor het jaar 2050 (Figuur 4.12). Hierbij wordt een simulatie zonder bodemdaling (maar met zeespiegelstijging) afgetrokken van de autonome ontwikkeling (met bodemdaling en zeespiegelstijging). Hierbij is een bodemdaling van maximaal 8 cm opgelegd (zie ook Figuur 4.2). De verschillen in bodemhoogte binnen de bodemdalingsschotel zijn grotendeels toe te schrijven aan de bodemdaling zelf (0 cm aan de rand tot 8 cm nabij Delfzijl). Dit betekent dat er zeer beperkt compensatie optreedt voor bodemdaling door sedimentatie.

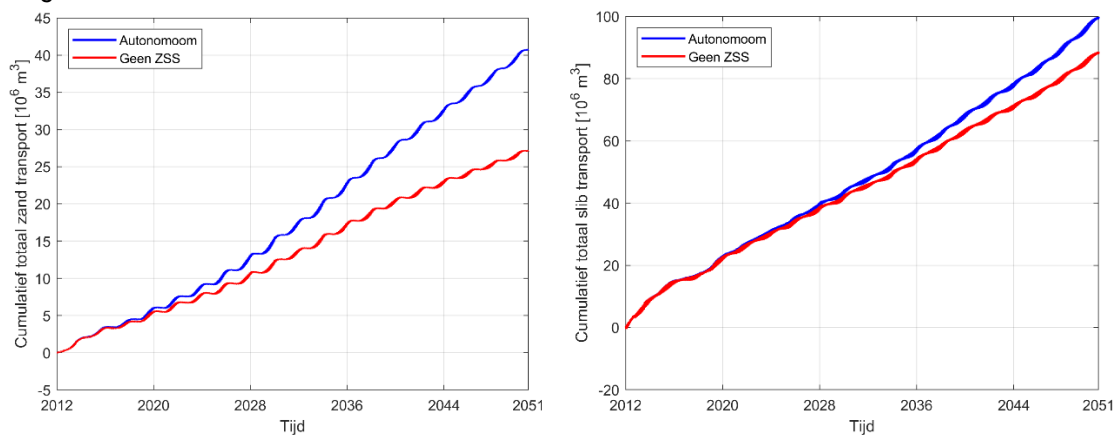
Ook is er impact op de buitendelta's. Dit zal deels het gevolg zijn van geulmigraties, maar de bodemveranderingen langs de westrand van het model zijn dermate groot dat ook randeffecten waarschijnlijk een rol spelen.



Figuur 4.12 Effect van bodemdaling op bodemveranderingen in 2050 met contourlijnen van de bodemligging in 2050. Het effect van bodemdaling is negatief.

Het berekende sedimenttransport het estuarium in wordt beperkt beïnvloed door de zeespiegelstijging (Figuur 4.13). Zonder zeespiegelstijging wordt per jaar 2.3 miljoen m<sup>3</sup> slib het estuarium in getransporteerd en 0.7 miljoen m<sup>3</sup> zand (cumulatief transport uit Figuur 4.13 gedeeld door 38 jaar). Bij zeespiegelstijging neemt het zandtransport toe met 0.35 miljoen m<sup>3</sup> (50%) en de slibimport met 0.3 miljoen m<sup>3</sup> (15%) - zie §5.1.2 voor nauwkeurigheid van deze transporten. Deze beperkte meegroei capaciteit kan het gevolg zijn van een vertraagde reactie (het systeem heeft tijd nodig om evenwichtstransporten in overeenstemming met zeespiegelstijging te genereren). Deze vertraging wordt ook gesuggereerd door de toename van de verschillen in transporten met en zonder ZSS in de tijd (Figuur 4.13). In de eerste 5 tot 10 jaar neemt het transport nauwelijks toe als gevolg van zeespiegelstijging, terwijl het zandtransport met ZSS 75% hoger is in de laatste 10 jaar (20% voor slib).

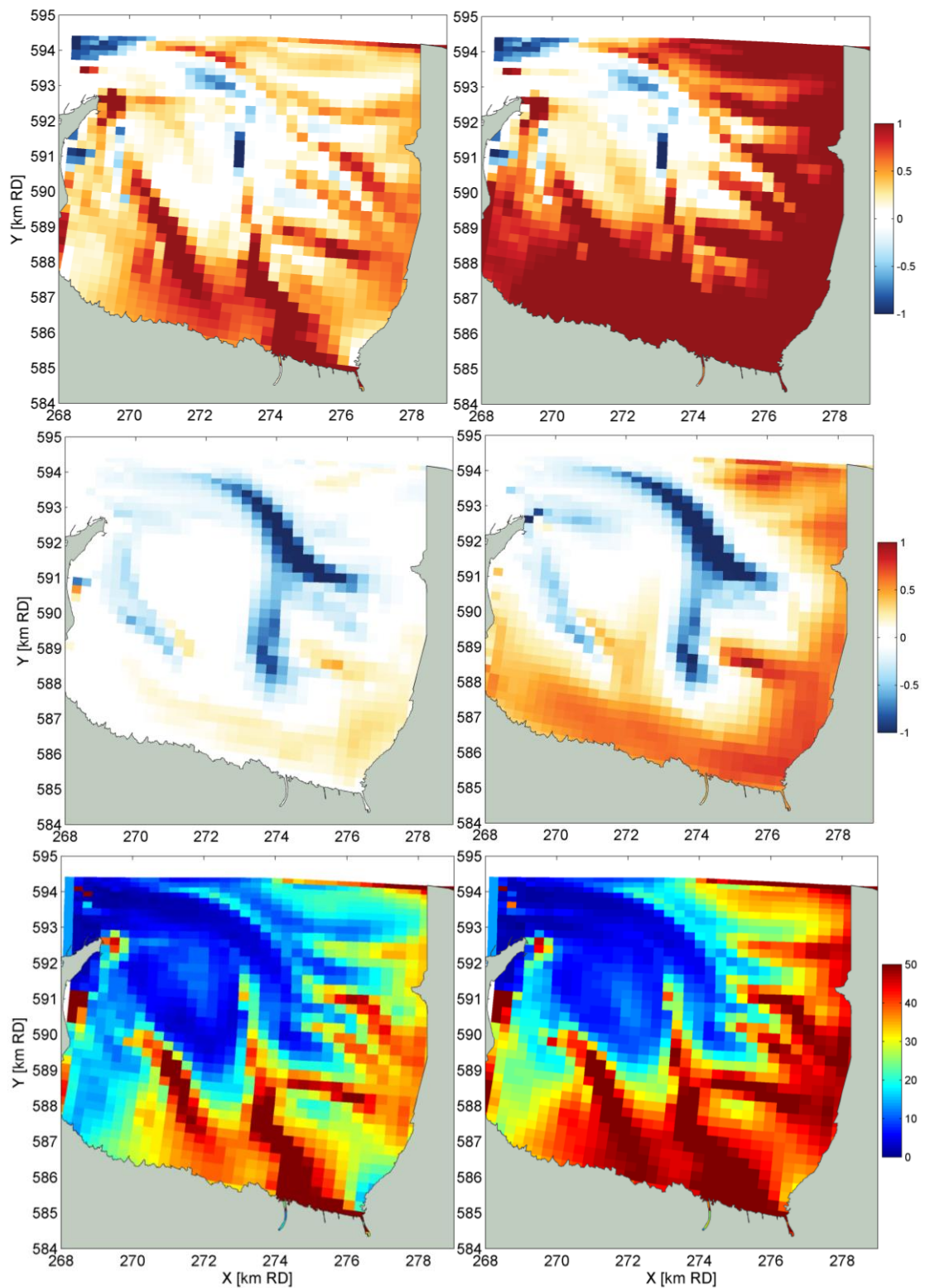
De volumes slibimport (zoals hierboven genoemd) zijn daarom afhankelijk van de keuze van de bulkdichtheid. De bulkdichtheid van zand is altijd rond  $1600 \text{ kg/m}^3$ , maar de dichtheid van slib is afhankelijk van de mate van consolidatie. In Figuur 4.13 is uitgegaan van  $1000 \text{ kg/m}^3$  (geconsolideerd slib), maar afhankelijk van de mate van consolidatie kan dit rond de 20% hoger of lager liggen. Dit geeft een bandbreedte voor slibimport van  $1.8 - 2.8$  miljoen  $\text{m}^3$  zonder zeespiegelstijging en  $2.1 - 3.1$  miljoen  $\text{m}^3$  met zeespiegelstijging. Gecombineerd met zandtransport betekent dit dat de totale sedimentimport door zeespiegelstijging toeneemt van  $2.5 - 3.5$  miljoen  $\text{m}^3$  tot  $3.1 - 4.1$  miljoen  $\text{m}^3$ . Deze waarden worden in meer detail besproken in §5.1.3.



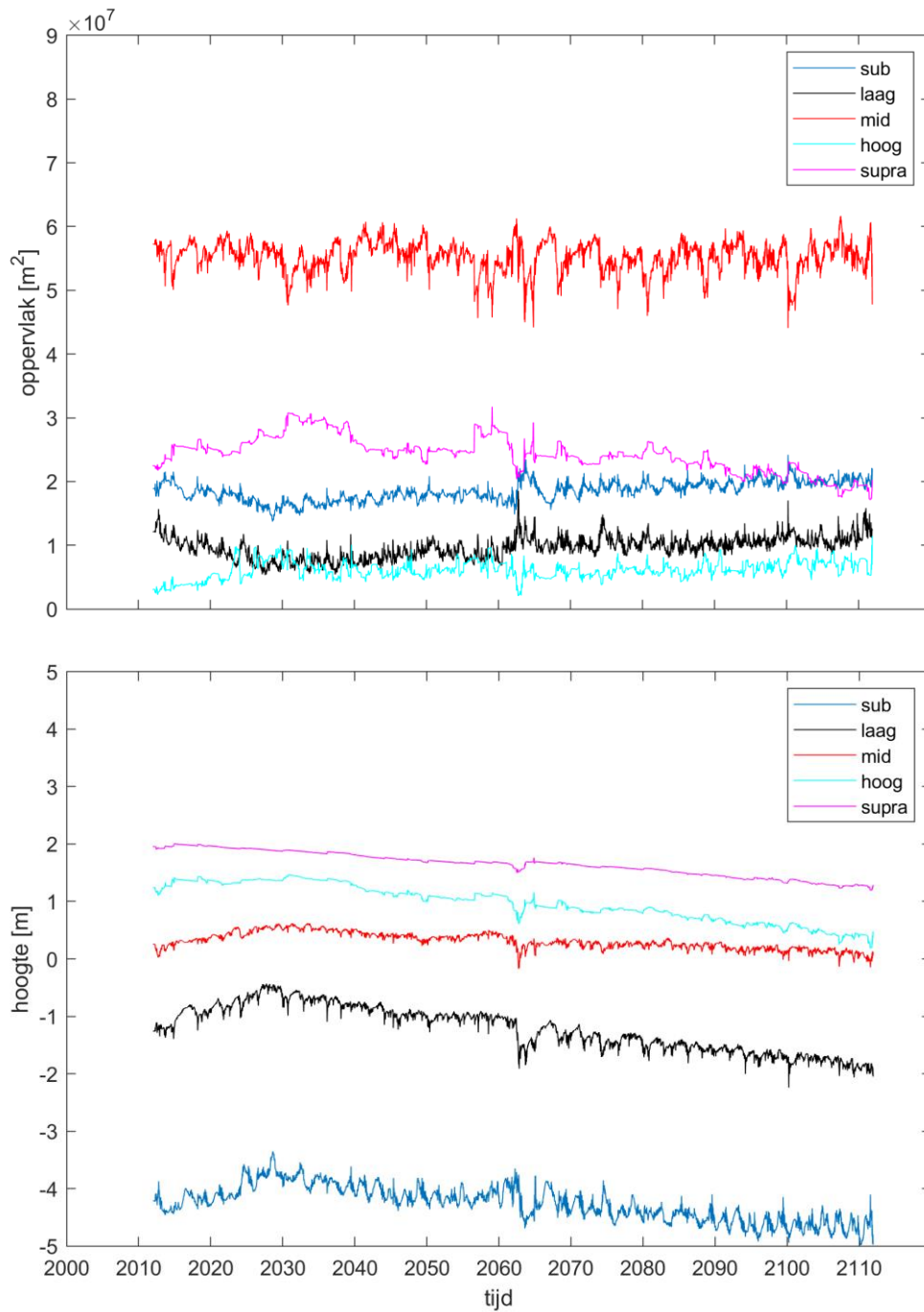
Figuur 4.13 Zand transport (links) en slibtransport (rechts, in miljoenen  $\text{m}^3$ ) door de keel van het Eems Estuarium tussen Borkum en Rottumeroog, met en zonder zeespiegelstijging. De slib en zandvolumes zijn gebaseerd op een dichtheid van  $1000 \text{ kg/m}^3$  voor slib en  $1600 \text{ kg/m}^3$  voor zand.

#### 4.3.2 Morfologische veranderingen Dollard (Dollard model)

Het Dollard model is in eerste instantie voor een periode van 100 jaar gedraaid (met de referentie-instellingen zoals beschreven in hoofdstuk 2) met en zonder zeespiegelstijging. Tijdens de eerste 50 jaar zijn bodemveranderingen voor een groot deel het gevolg van inspelen, resulterend in grote bodemveranderingen (Figuur 4.14). In de daaropvolgende 50 jaar zijn de voorspelde bodemveranderingen beperkt in de simulaties zonder zeespiegelstijging. Met zeespiegelstijging vindt aanslibbing plaats, met waardes tot aan de zeespiegelstijgsnelheid (60 cm in 50 jaar, gelijk aan de opgelegde zeespiegelstijging na 2050) op de hoge intergetijdengebieden. Dit betekent dat de intergetijdengebieden aanzienlijk meegroeien met zeespiegelstijging, maar slechts zeer lokaal de stijging volledig bijhouden.



Figuur 4.14 Bodemverandering (in meter) tussen 2012 en 2062 (boven), tussen 2062 en 2112 (midden), en het slibgehalte in 2112 (in %, onder) voor de referentiesimulatie zonder (links) en met (rechts) zeespiegelstijging.



Figuur 4.15 Verandering in ecotopenoppervlakte (boven) en verandering in hoogte (t.o.v. het daadwerkelijk gemiddelde zeeniveau, dus geen vast referentievlak als NAP) per ecotoop op basis van het areaal in 2012 (beneden), met zeespiegelstijging. Gedurende de tijd daalt de bodem omdat zeespiegelstijging als bodemdaling is geïmplementeerd. Ecotopen welke de zeespiegelstijging bijhouden veranderen daarmee niet in hoogte.



### *Ecotopenindeling*

Om het effect van de zeespiegel verder te kwantificeren, worden de resultaten omgerekend naar ecotopenklassen. Hiervoor wordt de ecotopenindeling gebruikt zoals in Deltares (2017c), met een kleine aanpassing: er wordt geen onderscheid gemaakt tussen hoogdynamisch en laagdynamisch om de veranderingen in de tijd inzichtelijker te maken. De verandering van het areaal van de verschillende ecotopen in de tijd kan op twee manieren berekend worden:

1. **Ecotoopareaal.** Op elk tijdstip wordt het ecotoopenareaal opnieuw berekend. Wanneer een gebied verdrinkt, verandert het type ecotoop. De areaalgrootte van elke ecotoop verandert daardoor in de tijd. Dit is fysisch de meest realistische methode.
2. **Ecotoophoogte.** Het type wordt voor de initiële conditie gedefinieerd. Vervolgens worden de veranderingen in bodemhoogte per ecotoop berekend. Dit is fysisch niet het meest realistisch (als bijvoorbeeld het hooglittoraal verdrinkt wordt het midlittoraal of zelfs laaglittoraal), maar het is wel de meest inzichtelijke methode om het effect van zeespiegelstijging te analyseren. Deze methode wordt daarom vooral toegepast.

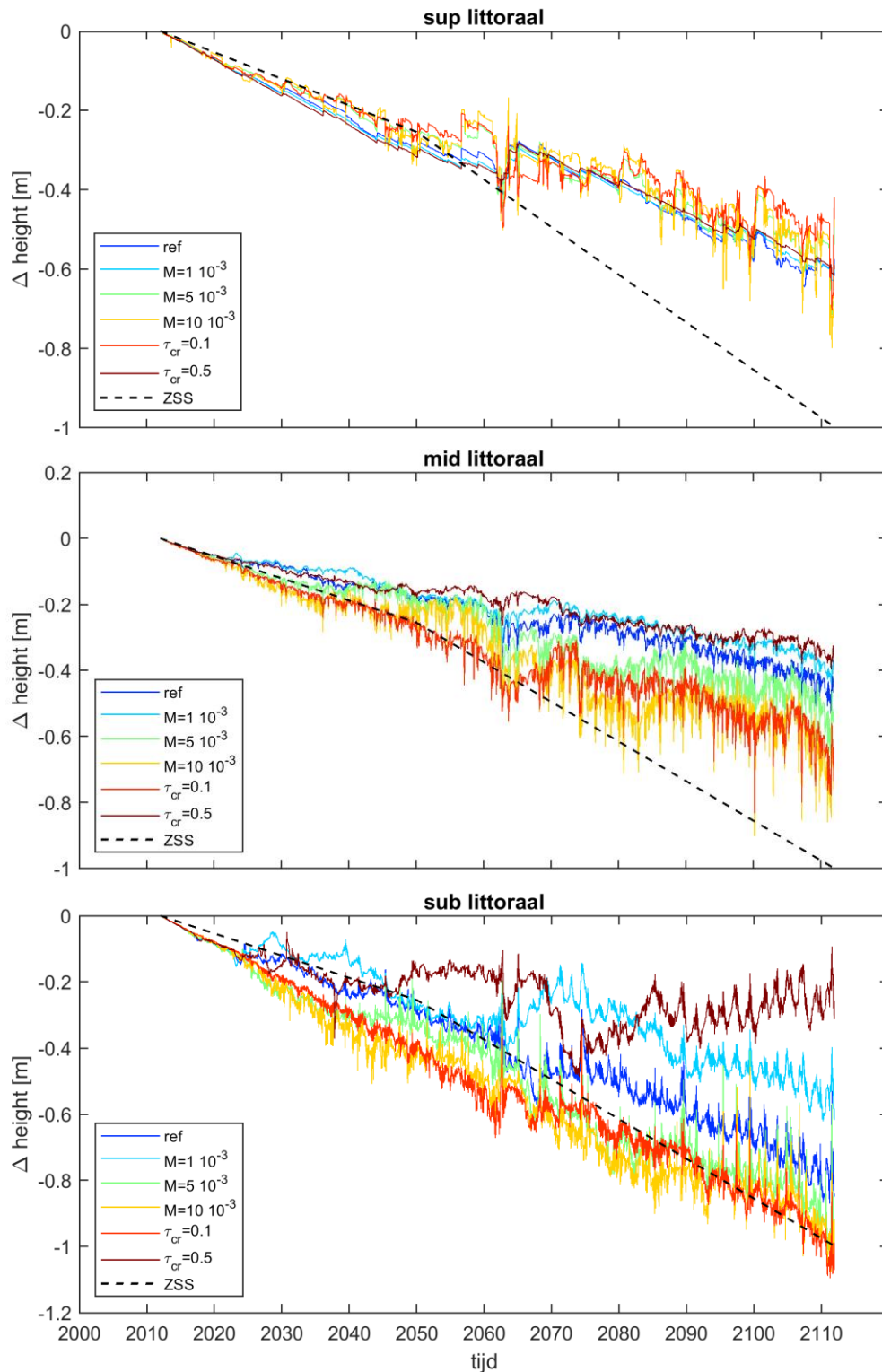
De verandering in ecotoopareaal en in ecotoophoogte zijn weergegeven in Figuur 4.15. Bij autonome ontwikkeling neemt het areaal van supralittoraal (incl. kwelders) af, terwijl de arealen hoog-, laag-, en sub-littoraal toenemen. Het mid-littoraal blijft gelijk. Dit suggereert verdrinking: het hoog-littoraal (en dieper gelegen ecotopenklassen) neemt toe ten koste van het supra-littoraal. De hoogte van het supra-littoraal en hoog littoraal ten opzichte van de zeespiegel neemt sterk af (Figuur 4.15) omdat beiden te hoog liggen om regelmatig te overstromen (en dus beperkt de tijd hebben om mee te groeien). Het mid-littoraal is het meest constant in de tijd: de hoogte blijft rond 0 NAP (ondanks een meter zeespiegelstijging in de 100 jaar simulatie).

### *Gevoeligheidsanalyse parameterinstellingen met/zonder zeespiegelstijging*

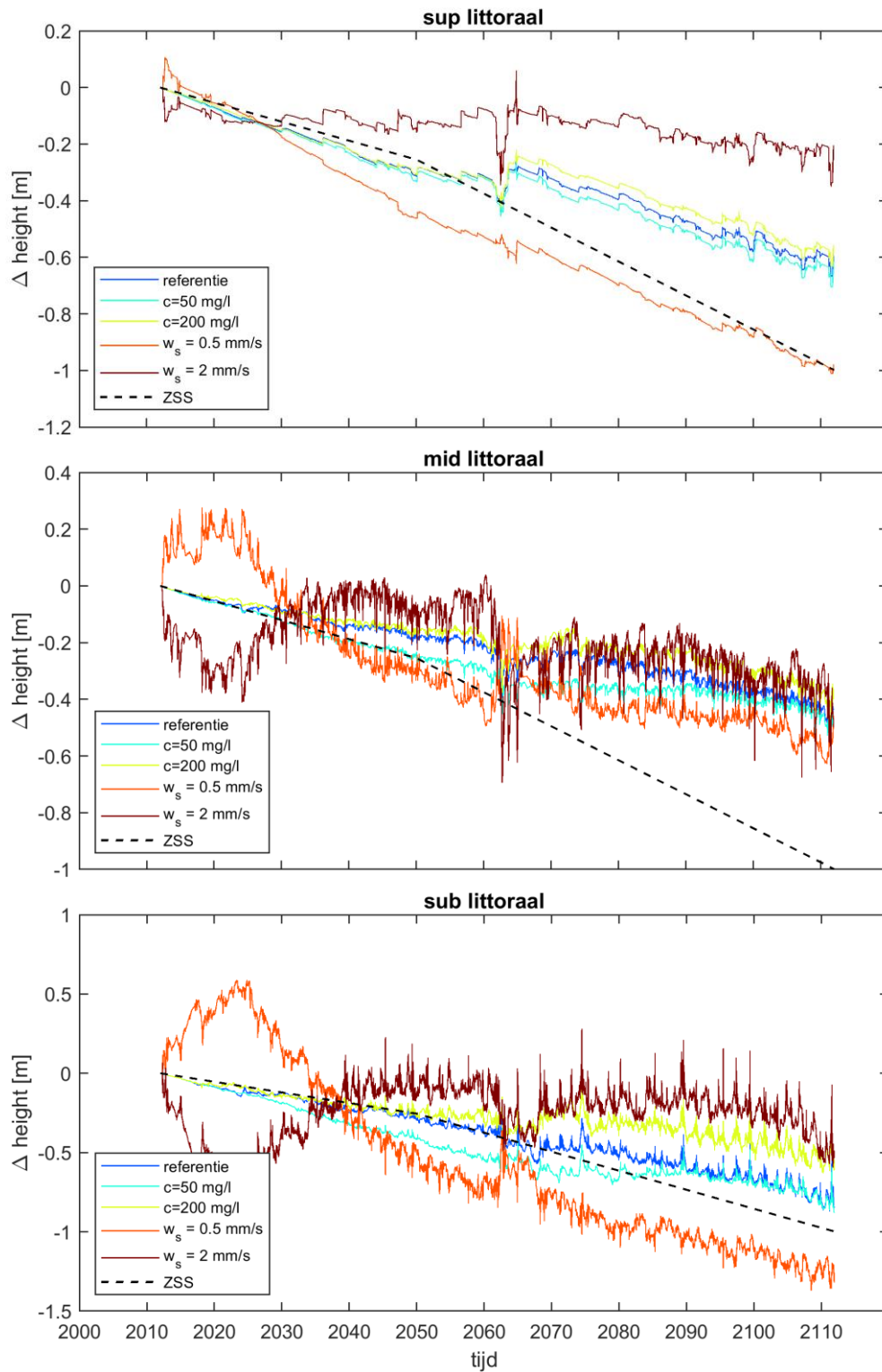
Een belangrijke vraag is of de Dollard wel of niet kan meegroeien met de zeespiegelstijging. Het antwoord hierop is afhankelijk van (onzekerheden in) modelinstellingen. Om dit effect inzichtelijk te maken wordt het verschil in bodemhoogte tussen berekeningen met en zonder zeespiegelstijging geanalyseerd. Een aantal varianten van modelinstellingen ten opzichte van de referentie-modelinstellingen (Tabel 2.3) zijn gedefinieerd: het slib is meer of minder erodeerbaar (erosie parameter  $M$  en de kritische schuifspanning voor erosie  $\tau_{cr}$ ), de valsnelheid is hoger of lager, of er is meer of minder slib beschikbaar.

- De erosie parameter  $M$  is  $1 \cdot 10^{-3}$ ,  $5 \cdot 10^{-3}$ , of  $10 \cdot 10^{-3}$  kg /m<sup>2</sup>/s in plaats van  $2 \cdot 10^{-3}$  kg /m<sup>2</sup>/s
- De kritische schuifspanning voor erosie  $\tau_{cr}$  is 0.1 of 0.5 Pa in plaats van 0.25 Pa
- De valsnelheid  $w_s$  is 0.5 of 2 mm/s in plaats van 1 mm/s.
- De slibconcentratie aan de modelrand is 50 of 200 mg/l in plaats van 100 mg/l

Deze modelinstellingen zijn toegepast voor een model met en een model zonder zeespiegelstijging. De resultaten zijn weergegeven in Figuur 4.16 en Figuur 4.17.



Figuur 4.16 Verschil in hoogte per ecotoop (areaaldefinitie 2012) als gevolg van zeespiegelstijging (ZSS) voor het supralittoraal, het midlittoraal, en het sublittoraal, bij verschillende erosie-instellingen. Het laaglittoraal en hooglittoraal wordt niet gepresenteerd omdat deze sterk overeenkomen met het midlittoraal, en het midlittoraal veel groter in oppervlakte is (zie Figuur 4.15). Een horizontale lijn betekent dat het ecotoop meegroeit met de zeespiegelstijging. Wanneer de lijnen dalen, verdrinkt het ecotoop. Een beperkte daling (zoals voor het mid littoraal) betekent dat de zeespiegelstijging grotendeels wordt bijgehouden.



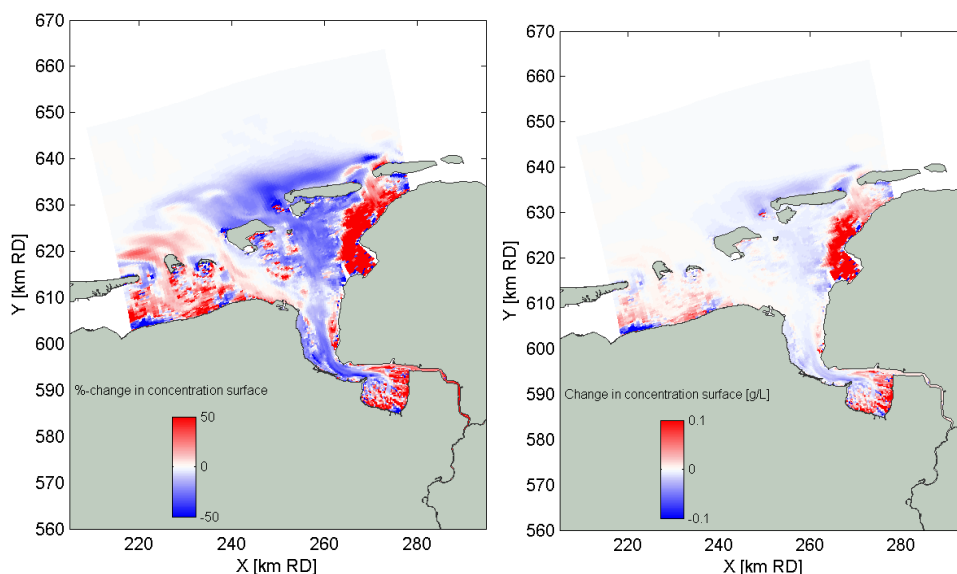
Figuur 4.17 Als Figuur 4.16, maar dan voor variaties in de slibconcentratie aan de rand en voor de valsnelheid.

Deze vergelijking laat het volgende zien:

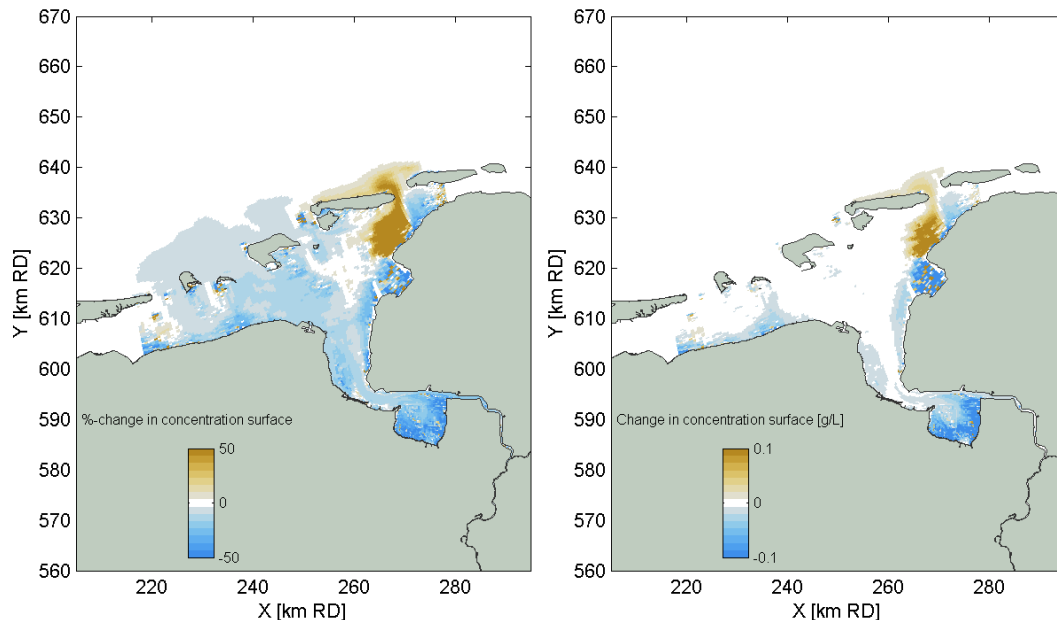
- Het supralitoraal verdrinkt gedeeltelijk. Deze voorspelling is ongevoelig voor erosieparameter instellingen maar zeer gevoelig voor valsnelheidsinstellingen. Dit komt omdat het supralitoraal een bezinkgebied is (sediment wat hier bezinkt wordt niet meer geërodeerd en elders afgezet). Merk op dat het supralitoraal in het model (1) niet volledig is (niet alle kwelders zijn gemodelleerd) en (2) niet begroeid (geen vegetatie module).
- Het mid-litoraal, het laag-litoraal en hoog-litoraal (laatste 2 hier niet gepresenteerd) groeit gedeeltelijk mee met de zeespiegelstijging. Opvallend is dat een versnelling van de ZSS hier geen invloed op heeft. Kennelijk vindt sedimentatie plaats als hier mogelijkheden voor zijn (accommodatieruimte), en het is minder belangrijk hoeveel ruimte dit is. Bij versnelde zeespiegelstijging is de aanslibbingsnelheid onvoldoende om de zeespiegelstijging volledig bij te houden (voor alle modelparameterinstellingen).
- Het gedrag van het sublitoraal is sterk afhankelijk van modelparameters. Met beperkte erosiesnelheden (hoge kritische schuifspanning voor erosie  $\tau_{cr}$ , lage erosie parameter  $M$ ) wordt de zeespiegelstijging goed bijgehouden. Bij andere instellingen wordt zeespiegelstijging echter totaal niet bijgehouden. Dit betekent dat de respons van het sublitoraal op de zeespiegelstijging moeilijk te voorspellen is.

#### 4.3.3 Veranderingen in slibconcentratie (D3S model)

De veranderingen in slibconcentratie zijn uitgerekend voor het scenario met autonome ontwikkeling (zie §4.2.2) en voor het scenario zonder zeespiegelstijging en bodemdaling. Met zeespiegelstijging nam de slibconcentratie toe boven ondiepe gebieden, en af in de geulen). Zonder zeespiegelstijging en bodemdaling is dit patroon hetzelfde (Figuur 4.18). Een belangrijk verschil (vergelijk Figuur 4.8) is echter dat de toename in slibconcentratie boven de platen minder sterk is dan voor autonome ontwikkeling. Dit wordt aanvullend geïllustreerd door de veranderingen voor het scenario zonder zeespiegelstijging te vergelijken met de autonome ontwikkeling (Figuur 4.19). In het grootste deel van het estuarium laat een scenario zonder zeespiegelstijging lagere concentraties zien ten opzichte van het scenario met zeespiegelstijging en bodemdaling (de autonome ontwikkeling). Het effect van zeespiegelstijging op de slibconcentratie is in de Dollard het grootst.



Figuur 4.18 Toename in slibconcentratie tussen 2012 en 2050 zonder zeespiegelstijging: procentueel (links) en absoluut (in g/l, rechts)



Figuur 4.19 Verskil in slibconcentratie zonder zeespiegelstijging ten opzichte van de autonome ontwikkeling: procentueel (links) en absoluut (in g/l, rechts). Blauw betekent dat zeespiegelstijging leidt tot een hogere slibconcentratie dan zonder zeespiegelstijging.

Een belangrijke vraag is waarom deze patronen door het model worden berekend, en hoe realistisch deze berekeningen zijn. Een verandering in het slibgehalte in de waterkolom en de bodem kan het gevolg zijn van wijzigingen in (1) getijdynamiek, (2) zout-gedreven dichtheidsstromen, of (3) accommodatieruimte (ruimte voor bezinking van slib). Alle drie worden beïnvloed door morfologische veranderingen en door zeespiegelstijging.

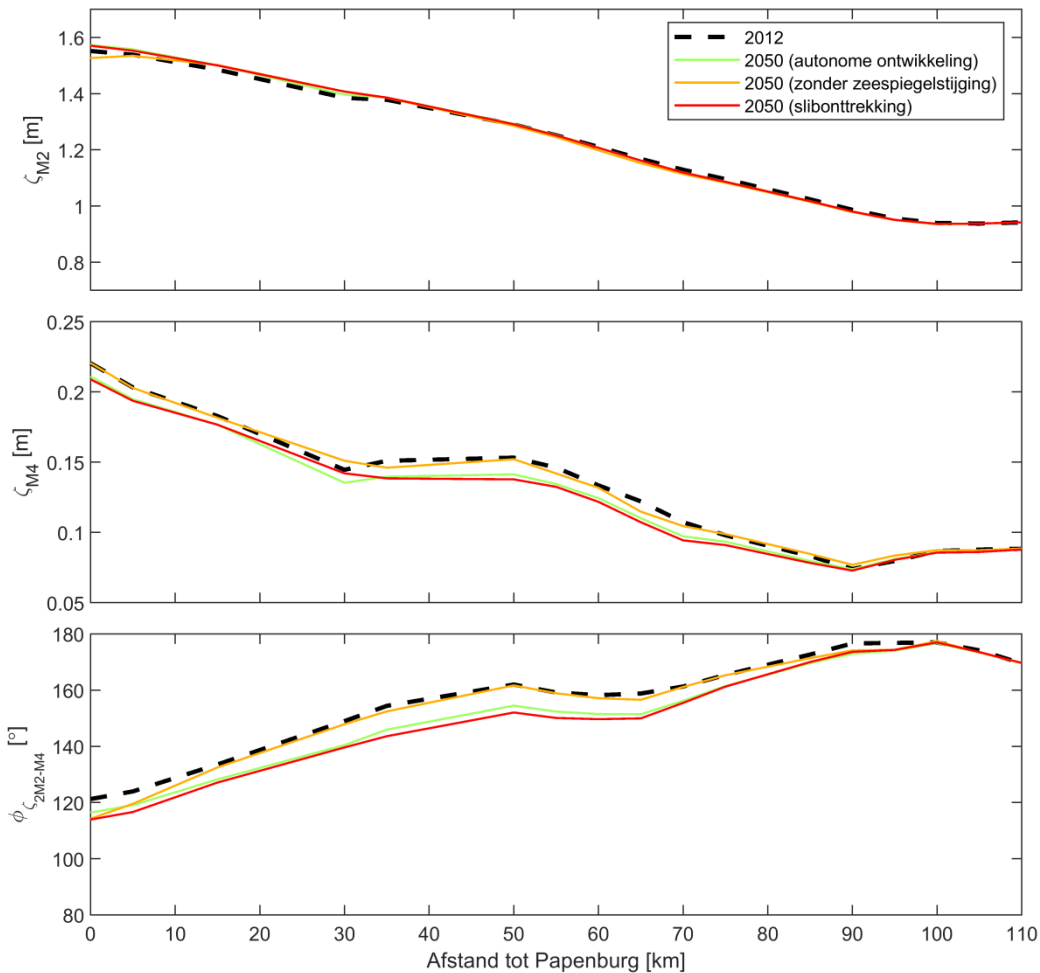
#### Getijdynamiek

De verandering in de slibconcentratieverdeling met en zonder zeespiegelstijging lijkt niet verklaard te kunnen worden met veranderingen in de getijamplitude of asymmetrie (Figuur 4.20, vergelijk hierbij de autonome ontwikkeling 2050 met 2050 zonder zeespiegelstijging). Door het gehele estuarium treedt er geen grote veranderingen op in de amplitude van het M2 getij (2012, alle 2050 scenario's). Het M4 getij neemt ongeveer 10% af door zeespiegelstijging ten opzichte van 2012, maar ook ten opzichte van 2050 zonder zeespiegelstijging (middenpaneel Figuur 4.20). Dit leidt tot een afname van slibimport.

Het faseverschil tussen M2 en M4 neemt ~10 graden af door zeespiegelstijging. Hierdoor verschuift het type asymmetrie van kenteringsasymmetrie (de hoogwaterkentering duurt langer dan laagwaterkentering; maximaal bij 180 graden faseverschil) naar maximale stromingsasymmetrie (vloedstroomsnelheden zijn hoger dan eb stroomsnelheden; maximaal bij 90 graden faseverschil).

Beide typen asymmetrie leiden tot sedimentimport, waarbij maximale stromingsasymmetrie vooral relevant is voor sedimentdeeltjes met veel water-bodemuitwisseling (hoge valsnelheid, hoge beschikbaarheid) zoals zand of sterk geflocculeerd slib. Kenteringsasymmetrie speelt vooral een rol voor deeltjes met een beperkte valsnelheid, maar nog wel tijdens elke kentering worden afgezet (bijvoorbeeld matig geflocculeerd slib). Dit suggereert dat zeespiegelstijging leidt tot een (zeer beperkte) afname van slibimport. Door zeespiegelstijging neemt echter ook

het getijdebiet licht (~ 5% tijdens maximale instroom) toe (Figuur 4.21) – dit zou weer wel tot een toename van slibimport kunnen leiden.



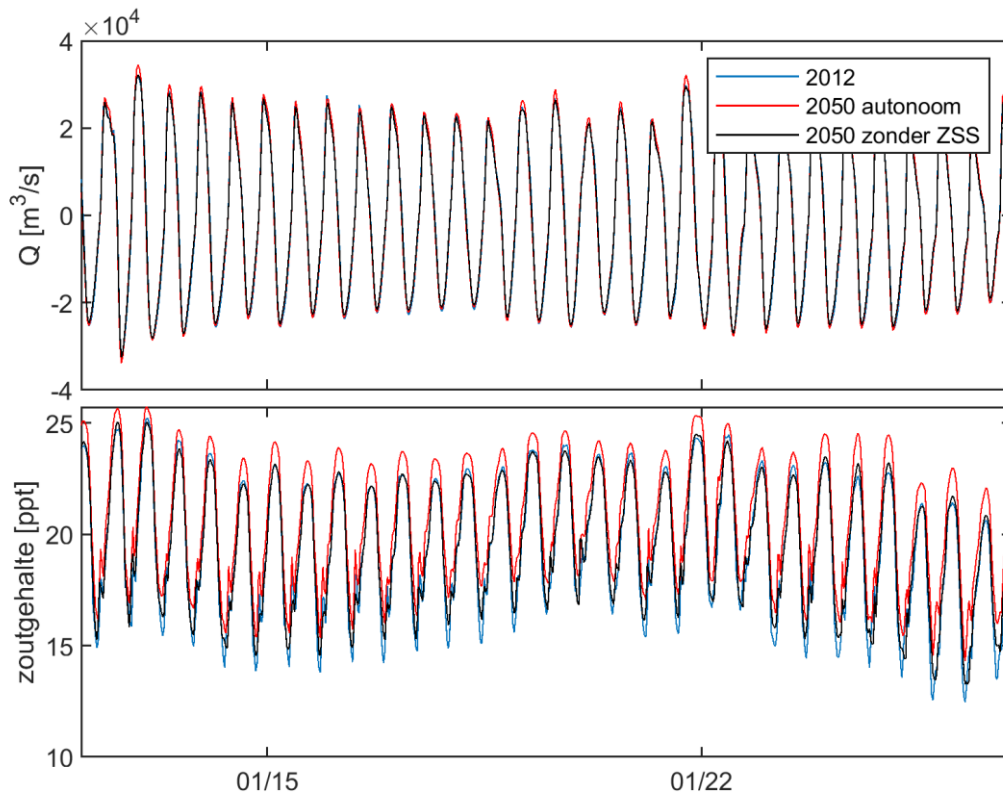
Figuur 4.20 Amplitude van het M2 getij (boven), het M4 getij (beneden) en het faseverschil tussen M2 en M4 (beneden), voor berekeningen in 2012 (met uitgeschuurde Eems rivier) en in 2050 voor de autonome ontwikkeling, zonder zeespiegelstijging, en met slibonttrekking (Delfzijl en Eemshaven).

### Zout-gedreven dichtheidsstroming

Horizontale gradiënten in het zoutgehalte leiden tot een stroming nabij de bodem in de richting van de lagere zoutgehalten (en in omgekeerde richting nabij het wateroppervlak). Aangezien de slibconcentratie nabij de bodem hoger is dan nabij het wateroppervlak, leidt dit typisch tot een landwaarts sedimenttransport (water is minder zout nabij land door instroming van rivieren). Eerdere modelsimulaties (Deltares, 2015b) lieten zien dat zout een belangrijke rol lijkt te spelen in de verdeling van slib in het Eems Estuarium.

Zout-gedreven stroming neemt sterk niet-lineair toe met de waterdiepte, en daarom leidt een verdieping van geulen tot een sterkere indringing van zout en troebel water over de bodem. In de vaargeul ter hoogte van Delfzijl neemt het zoutgehalte nabij de bodem sterk toe (ten opzichte van 2012) voor het scenario met zeespiegelstijging; zonder zeespiegelstijging is deze toename veel beperkter (Figuur 4.21).

Het is daardoor aannemelijk dat zeespiegelstijging leidt tot een sterkere zout-gedreven stroming, en daarmee import van slib. Zout-gedreven stromingen leiden daarom tot een toename van de slibconcentratie in het estuarium.



Figuur 4.21 GetijdEBiet door het Eems estuarium nabij Delfzijl (boven) en zoutgehalte nabij de bodem in de vaargeul ter hoogte van Delfzijl, tijdens een springtij-doodtijcyclus in januari, voor scenario's 2012, 2050 bij autonome ontwikkeling en 2050 bij autonome ontwikkeling zonder zeespiegelstijging.

#### Accommodatieruimte

In Intergetijdengebieden bestaat een dynamisch evenwicht tussen de waterbeweging, slibconcentratie, en bodemligging. In dynamische gebieden (hoge stroomsnelheden en/of golfwerking) zal de bodem vooral zandig zijn; in luwe gebieden vooral slibrijk. Wanneer het waterniveau stijgt, is er meer accommodatieruimte waar sediment afgezet kan worden. In een gebied met voldoende aanbod van slib (zoals in het huidige Eems estuarium) en een relatief snelle toename van de accommodatieruimte zal dit materiaal vooral uit slib bestaan. Wanneer sediment geleidelijk wordt afgezet, kan het bodemsediment zandiger zijn.

Een snelle toename van de accommodatieruimte leidt daarom tot een toename van het slibgehalte in de bodem. Dat betekent tegelijkertijd dat er tijdens periodes met hogere hydrodynamische forcering (door getijstrooming en/of golfwerking) ook meer slib opgewoeld kan worden. Dit leidt vervolgens tot een toename van de slibconcentratie in de waterfase die in rustiger periodes weer kan bezinken.

### Synthese: relatief belang van verschillende mechanismen

Het verschil in zoutgehalte tussen de berekening voor 2050 met en zonder zeespiegelstijging suggereert dat zeespiegelstijging leidt tot een verhoging van het zoutgehalte aan de bodem met 1 tot 2 ppt. Deze toename is een logisch gevolg van de toename in waterdiepte, en is relatief ongevoelig voor model onnauwkeurigheden. Deze sterkere zoutindringing zal daarom deels bijdragen aan de verhoging van het slibgehalte. Het lijkt echter niet realistisch dat een dergelijke toename in het zoutgehalte zal leiden tot een toename in de slibconcentratie zo sterk als in Figuur 4.19.

De veranderingen in getijasympmetrie zijn beperkt, en zouden eerder leiden tot een afname van de slibimport. De veranderingen in getijebiet zijn ook zeer klein (5% tijdens maximale instroom, minder over de gehele getijcyclus) en leiden ook niet tot grote effecten.

Een toename in de slibconcentratie door toegenomen accommodatieruimte boven de platen lijkt het meest aannemelijke gevolg van zeespiegelstijging. Dit komt ook overeen met het ruimtelijk beeld in Figuur 4.19: de veranderingen zijn het sterkst in het gebied waar accommodatie het sterkst toeneemt, namelijk in de Dollard.

## **4.4 Effect van baggeren en storten**

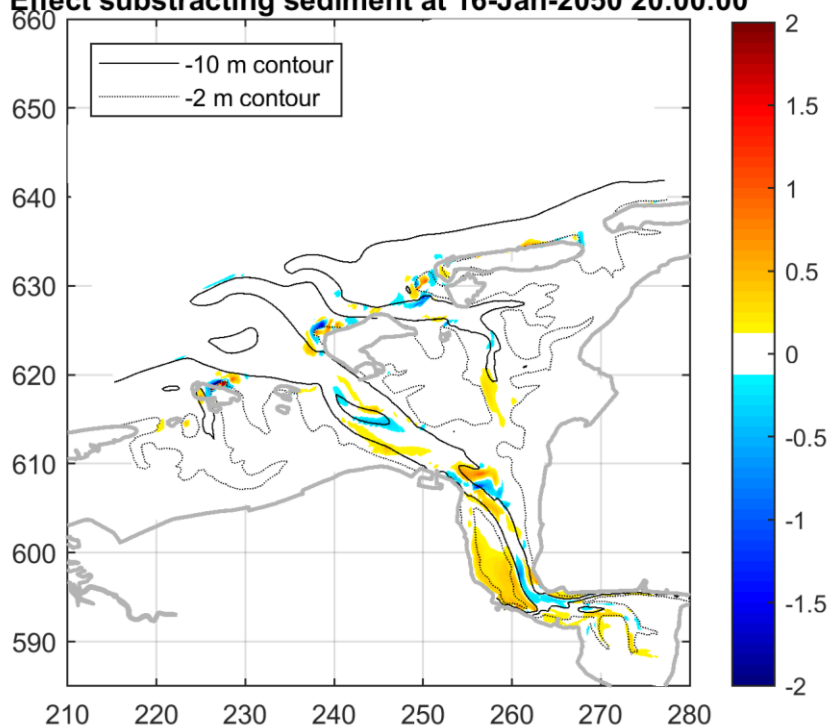
### 4.4.1 Morfologische veranderingen Eems-estuarium (LZS model)

Bij autonome ontwikkeling wordt het gebaggerde sediment teruggestort in de waterkolom, wat deels weer wordt afgezet in de bodem. Om de impact van het onttrekken van slib op de morfologische ontwikkeling te kwantificeren, wordt de autonome ontwikkeling van het estuarium doorgerekend waarbij slib wat in de havens van Delfzijl en Eemshaven bezinkt wordt onttrokken. Zonder slibonttrekking voorspelt het model een baggerbezwaar van 0.32 miljoen ton/jaar in Delfzijl, en 0.37 miljoen ton per jaar Eemshaven (zie ook Figuur 4.7). Dit neemt af wanneer sediment niet wordt teruggestort tot aan 0.34 miljoen ton/jaar in Eemshaven en 0.29 miljoen ton/jaar in Delfzijl (een reductie van ~10%).

Het effect van onttrekken wordt gevisualiseerd door van de simulatie met slibonttrekking de referentiesimulatie met baggeren en verspreiden af te trekken. Positieve bodemveranderingen betekenen in Figuur 4.22 dat de bodemligging hoger is bij autonome ontwikkeling dan bij onttrekking. Het onttrekken van sediment leidt er toe dat de bodem op het midden en zuidelijke deel van Hond-Paap niet ophoogt en minder slibrijk is dan bij autonome ontwikkeling (Figuur 4.23). Buiten Hond-Paap zijn veranderingen in bodemhoogte en slibgehalte beperkt.

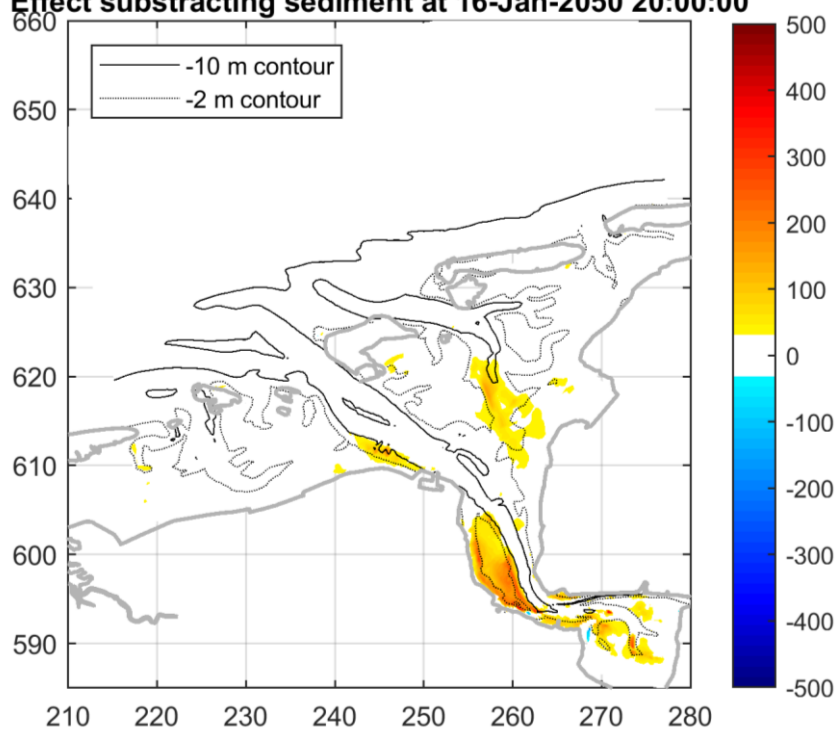


**Effect substracting sediment at 16-Jan-2050 20:00:00**



Figuur 4.22 Het effect van onttrekken van sediment op de bodemveranderingen in 2050. Een positieve waarde betekent een hogere bodemhoogte in de referentiesimulatie.

**Effect substracting sediment at 16-Jan-2050 20:00:00**

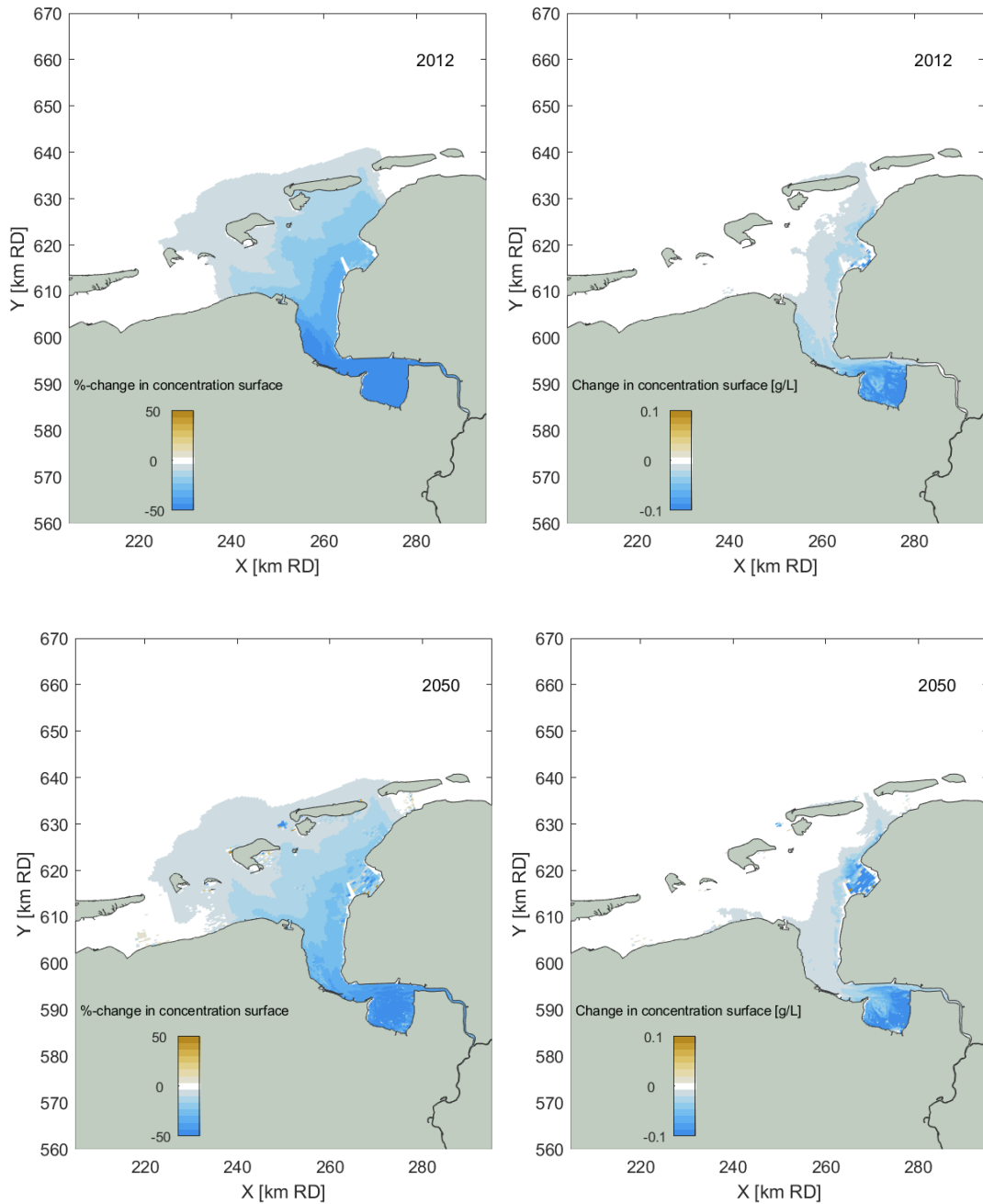


Figuur 4.23 Effect van onttrekken op de hoeveelheid slib in de bodem [kg/m<sup>2</sup>] in 2050. Een positieve waarde betekent dat de bodem slibrijker is bij de autonome ontwikkeling.

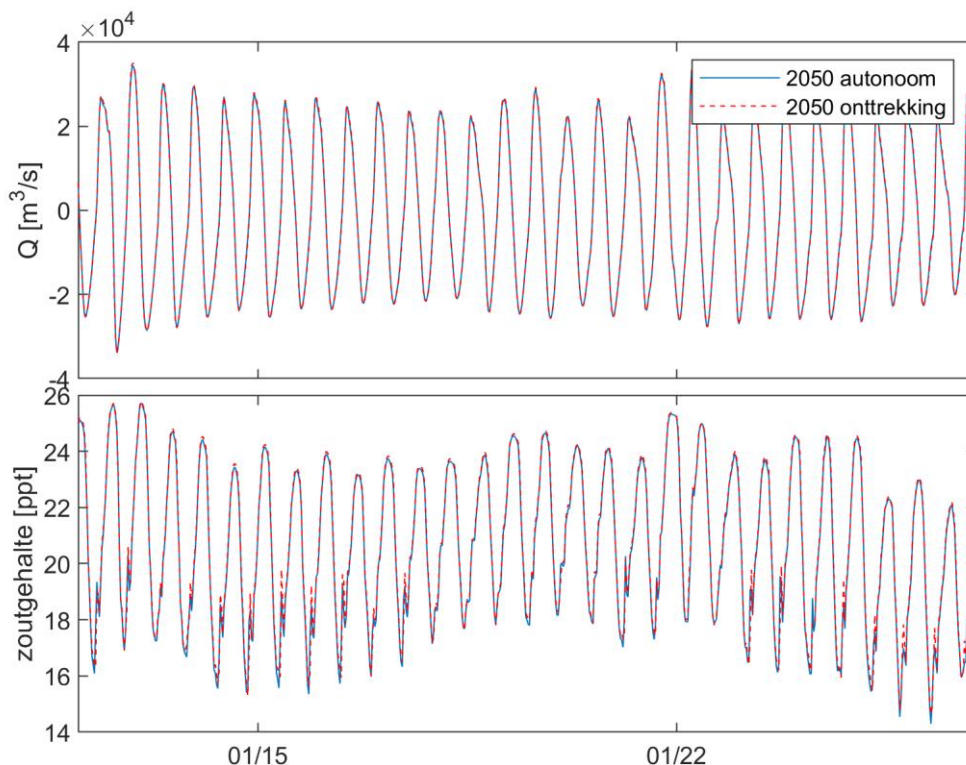
## 4.4.2 Veranderingen in slibconcentratie (D3S model)

Tijdens eerdere modelsimulaties (Deltares, 2015b) is gedemonstreerd dat slib onttrekken vanuit havens en vaarwegen leidt tot een sterke afname in de slibconcentratie. In voorliggend rapport wordt deze analyse uitgebreid door het effect van onttrekken ook door te rekenen op basis van een bodem berekend voor 2050. Hierbij wordt in het D3S model 0.24 (0.23) miljoen ton/jaar onttrokken in Delfzijl, en 0.14 (0.19) miljoen ton/jaar in Eemshaven, voor het jaar 2012 (2050). De afname van het baggerbezwaar als gevolg van onttrekken is veel sterker dan bij het LZS model (10%, zie boven): 49% (38%) voor Delfzijl en 22% (17%) voor Eemshaven, in het jaar 2012 (2050).

Ook uit de morfodynamische berekeningen blijkt dat onttrekken van slib een efficiënte manier is om de slibconcentratie te reduceren (Figuur 4.24). Het effect van onttrekken neemt toe richting de Dollard, waar het effect maximaal is (niet alleen in absolute, maar ook in relatieve zin). Het belangrijkste verschil tussen 2012 en 2050 is dat het effect van onttrekken minder sterk lijkt te worden boven de plaat Hond-Paap, maar juist sterker boven de Ley Bocht. De afname boven Hond-Paap is een logisch gevolg van de verlaging van de bodem (zie Figuur 4.22). De afname boven de Ley Bocht is minder goed te verklaren. Het onttrekken van slib heeft geen noemenswaardig effect op het getijvolume of het zoutgehalte (Figuur 4.25) omdat er slechts relatief kleine morfologische veranderingen (Figuur 4.22) optreden.



Figuur 4.24 Toename in slibconcentratie zonder terugstorten (onttrekking) ten opzichte van de autonome ontwikkeling, in 2012 (boven) en 2050 (beneden); procentueel (links) en absoluut (in g/l, rechts). Een afname betekent dat onttrekken van sediment leidt tot een afname in de slibconcentratie.



Figuur 4.25 Getijdebiet door het Eems estuarium nabij Delfzijl (boven) en zoutgehalte nabij de bodem in de vaargeul ter hoogte van Delfzijl, tijdens een springtij-doodtijcyclus in januari, voor 3 scenario's in 2050: autonome ontwikkeling, stoppen met baggeren en storten, en onttrekken van sediment.

#### 4.5 Conclusies

De voorspelling van de bodemontwikkeling in de autonome situatie laat zien dat de bodem waarschijnlijk niet volledig kan meegroeien met zeespiegelstijging. Hoewel op veel plekken sedimentatie plaatsvindt, is de ophoging van de bodem veelal kleiner dan de toename in zeespiegelniveau. Een aantal luwe gebieden zoals het zuidoostelijk deel van de Dollard en de Ley Bocht groeien wel voor een belangrijk deel mee met de zeespiegelstijging. Sedimentatie op intergetijdengebieden wordt voornamelijk veroorzaakt door slibafzettingen. Aanvullende berekeningen met een lokaal model van de Dollard laten zien dat de aanslibbing in het intergetijdengebied slechts beperkt wordt beïnvloed door modelinstellingen, maar vooral wordt gedreven door de beschikbare accommodatieruimte. In de zandige geulen van het buitenestuarium treden vooral laterale geulverplaatsingen op.

De modeluitkomsten laten zien dat effecten van bodemdaling nauwelijks worden gecompenseerd met sedimentatie. Dit beïnvloedt vooral het gebied rond Hond-Paap waar bodemdaling het sterkst is. Dit gebied wordt sterker beïnvloed door stortscenario's: als wordt gestopt met verspreiden van havenslib, zal de plaat Hond-Paap niet meegroeien en minder slibrijk worden.

Bij de autonome ontwikkeling neemt de slibconcentratie toe boven de platen, vooral in het Dollardgebied. Dit is vooral het gevolg van zeespiegelstijging: een toekomstscenario zonder zeespiegelstijging laat een veel beperkter verandering in slibconcentraties zien. Het belangrijkste effect van zeespiegelstijging is het toenemen van de accommodatieruimte. Daardoor wordt meer slib afgezet wat tijdens erosiefasen (golfwerking) in suspensie wordt

gebracht, en dus tot een verhoging van de vertroebeling leidt. In de geulen nemen de berekende sedimentconcentraties minder sterk toe omdat regelmatige getijstroming aanslibbing hier beperkt.

Naast het effect van de accommodatieruimte zal ook de verwachte toename in het getijdebiet en zout-gedreven stroming bijdragen aan een verhoging van de vertroebeling. De asymmetrie van het getij zal echter waarschijnlijk afnemen als gevolg van zeespiegelstijging, wat leidt tot een afname van slib import.

Onttrekken van slib wat wordt afgezet in havens zal naar verwachting ook in 2050 effectief blijven. Rond Hond-Paap, wordt slibonttrekking minder efficiënt voor concentratieverlaging, waarschijnlijk als gevolg van lokale morfologische veranderingen.



## 5 Model interpretatie

### 5.1 Geschiktheid modelinstrumentarium

Ten opzichte van de eerste versie van het LZS model (Deltares, 2017a) is de huidige versie aanzienlijk verbeterd op het gebied van insnijding van geulen (door middel van harde lagen), randvoorwaarden en slibtransport. Hieronder worden de belangrijkste modelresultaten op het gebied van modelnauwkeurigheid kort toegelicht.

#### 5.1.1 Modelverbeteringen

Met de toegepaste aanpassing van de randvoorwaarden is het model morfologisch stabiel, en geschikt voor het doorrekenen van scenario's tot aan 2050 (zoals hier gerapporteerd). Wanneer het model voor langere periodes doorgerekend gaat worden, vormt de instabiliteit van de modelranden een modeltekortkoming. De reden hiervoor is tweeledig:

- De randvoorwaarden zijn afgeleid voor de bodemligging van het huidige Eems estuarium, en zijn beperkt geldig voor een afwijkende bodemligging (zoals gebruikt voor de lange termijn hindcast). Een oplossing hiervoor is het zeewaartse rekendomein te vergroten. Een dergelijke vergroting heeft echter ook weer nadelen: het zou leiden tot (nog) langere rekestijden, en de slibtransporten zijn minder goed te sturen via randvoorwaarden.
- Het Eemsgebied is complex vanwege het Waddengebied in combinatie met zand-slibmodellering. Het Eems model heeft open randen op de Noordzee en de Waddenzee. Voor studies waarin alleen het zandtransport wordt bestudeerd, zouden de Waddenzee randen afgesloten kunnen worden (zandtransport over de wantijen is verwaarloosbaar), maar voor slibtransport zijn deze randen wel belangrijk – een belangrijk deel van de slibinflux komt uit de Waddenzee. De Waddenzee randen beïnvloeden de Noordzee randen, die hierdoor instabiel kunnen worden. Dit beperkt de simulatieduur van de modellen.

De gevoeligheid van de randen voor de bodemligging betekent mogelijk dat maatregelen met een sterk afwijkende topografie tot numerieke instabiliteit leiden. In dat geval zal de rekestijdstap verder worden verlaagd, wat betekent dat rekestijden verder toenemen. Of de randvoorwaarden moeten opnieuw worden gegenereerd door de grootschalige modellen opnieuw te draaien.

De harde lagen zoals ingebouwd in het huidige model vormen een verbetering, doordat overmatige insnijding van geulen (deels) wordt voorkomen. Deze harde lagen leiden ook tot een nauwkeuriger lange-termijn ontwikkeling van het estuarium (op basis van de berekende hypsometrische curves). De geulen snijden echter nog steeds in. Dit is het gevolg van de combinatie van (1) een rekenschema met weinig numerieke diffusie (wat voor geulinsnijding nadelig uitpakt), (2) de gebruikte zandtransportformulering (Van Rijn is de meest accurate transportvoorspeller (en een van de weinigen welke ook de effecten van golven kan voorspellen), maar heeft wel de neiging teveel in te snijden. De reden voor deze insnijding is onvoldoende bekend) en (3) de lage roosterresolutie (insnijding is sterker naarmate een geul uit minder roostercellen bestaat). Een gevolg van deze insnijding is dat stroomopwaarts slibtransport wordt overschat, wat leidt tot een verhoging van de slibconcentraties in vooral de Dollard. Deze verhoging van de concentraties is waarschijnlijk niet realistisch.

In Deltares (2017a) is reeds aangegeven dat de oriëntatie van de roostercellen de bodemontwikkeling negatief beïnvloedt. De geulen lijken de roostercellen te volgen, wat tot deels onrealistisch morfologisch gedrag leidt. Dit kan alleen opgelost worden door met een hogere resolutie te rekenen, maar dit is niet mogelijk vanwege de lange reketijden die dat vergt.

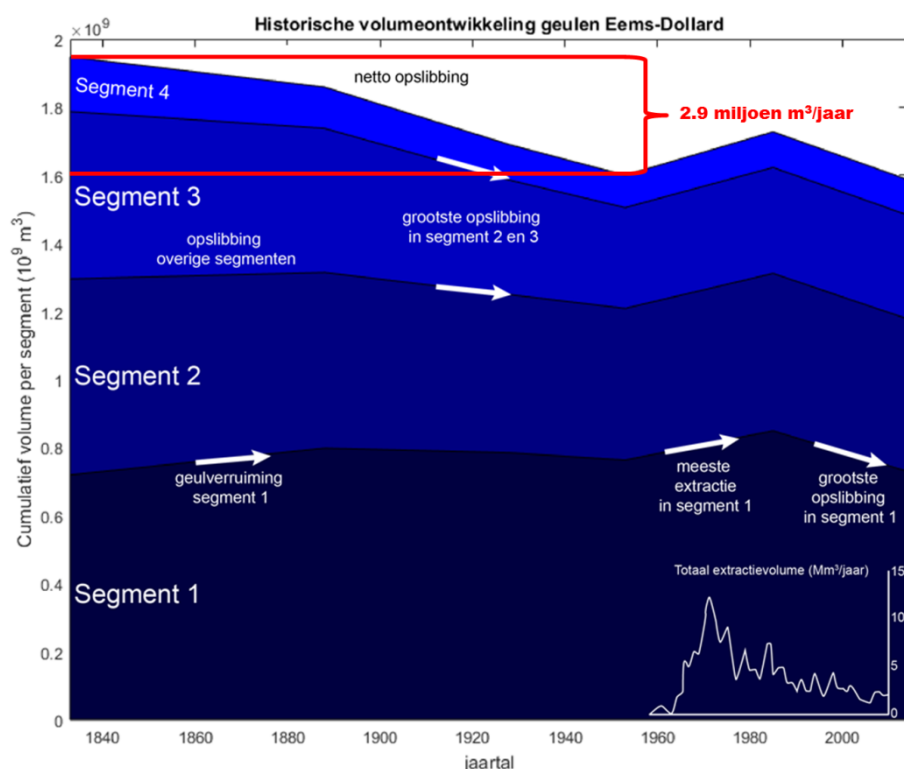
Het slibtransport in het LZS model is sterk verbeterd. De Dollard groeit nu mee met de zeespiegelstijging, en wordt vooral gestuurd door accommodatieruimte (zie §4.3: veranderingen in getij en dichtheidsstroming zijn waarschijnlijk minder belangrijk). Aanslibbing als gevolg van vergrote accommodatieruimte is slechts beperkt afhankelijk van modelparameterinstellingen, en mag daarom als een betrouwbaar modelresultaat worden beschouwd. Dit geldt voor zowel het Dollard-model, het LZS-model, als het D3S-model (in deze laatste alleen tot uiting komend in toegenomen slibconcentraties).

#### 5.1.2 Transport door de geulen

Het LZS model reproduceert gemeten gebaggerde massa's binnen een factor 2. Aanzanding en aanslibbing in havens en vooral vaargeulen is een kleine netto bodemverandering ten opzichte van grote bruto depositie en erosie termen, en daarom lastig voor modellen om te reproduceren. Een overeenkomst binnen een factor 2 mag daarom als een betrouwbaar resultaat worden beschouwd. De nauwkeurigheid van het transport door de geulen wordt verder geëvalueerd met behulp van gemeten volumeveranderingen in Pierik et al. (2018).

Zonder zeespiegelstijging is het zandtransport vanuit de Noordzee het Eems estuarium in 0.7 miljoen m<sup>3</sup> *in situ* per jaar en het slibtransport 1.8 – 2.8 miljoen m<sup>3</sup> per jaar (totaal 2.5 – 3.5 miljoen m<sup>3</sup> per jaar - zie §4.3). Volgens Pierik et al. (2018) is in de periode 1833-1950 het natte volume van de Eems afgenomen van 1,95x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> tot 1,60x10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>. In deze periode zijn volumeveranderingen te relateren aan sedimentimport; na 1960 gaan grootschalige sedimentonttrekkingen ook een rol spelen. De natuurlijke sedimentimport in het estuarium zal daarom rond de 2,9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar zijn geweest (zie ook Figuur 5.1). Dit komt goed overeen met de modelresultaten zonder zeespiegelstijging. Wanneer het effect van zeespiegelstijging wordt meegenomen, neemt de import slechts ongeveer een 0.7 miljoen m<sup>3</sup> per jaar toe (Figuur 4.13).





Figuur 5.1 Volumeontwikkeling van de geulen (watervolume onder NAP) sinds 1833 per segment, uit Pierik et al., 2018. Segment 1 ligt zeewaarts van Eemshaven, Segment 2 is de vaargeul rond Eemshaven, Segment 3 het gebied rondom Hond-Paap en segment 4 de geul tussen Knock en de Dollard – Zie Figuur 15 in Pierik et al. (2018) voor details. Totale extractie op basis van Mulder (2013), hierin is meegenomen zandwinning, baggervolume en terugstortingen. In totaal is ongeveer 200 Mm<sup>3</sup> geëxtraheerd uit het systeem tussen 1953 en 1985, wat overeenkomt met de gevonden geultoename. De afname in volume tussen 1833 en 1960 komt overeen met 2.9 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

### 5.1.3 Meegroeien met de zeespiegelstijging

Het voorspellen van de bodemligging bij zeespiegelstijging vormt een grote uitdaging voor numerieke modellen. In dergelijke modelstudies wordt vaak onderscheid gemaakt tussen (1) zeespiegelstijging bijhouden, (2) verdrinken, en (3) gedeeltelijk verdrinken OF gedeeltelijk bijhouden. De eerste houdt in dat de bodem van een deelgebied de zeespiegelstijging volledig bij kan houden, terwijl bij (2) nauwelijks sedimentatie optreedt en het gebied volledig verdrinkt (alle platen verdwijnen). De derde categorie is minder duidelijk gedefinieerd. In het onderzochte gebied vindt er sedimentatie plaats, maar niet genoeg om zeespiegelstijging bij te houden. Dit wordt soms gedeeltelijk verdrinken genoemd, maar soms ook gedeeltelijk zeespiegelstijging bijhouden. In dit rapport spreken wij over gedeeltelijk bijhouden. Daarnaast kan de aanduiding 'gedeeltelijk bijhouden' puur over verticale verschillen gaan (in het hele onderzochte gebied is de aanslibbing minder dan zeespiegelstijging) maak ook over ruimtelijke verschillen (een deel van het onderzochte gebied houdt de zeespiegelstijging bij, maar een deel niet). Wij refereren naar verticale verschillen per deelgebied.

In de Waddenzee is in het (recente) verleden gebruik gemaakt van ASMITA om meegroeien met de zeespiegelstijging te kwantificeren (zie Wang et al., 2018 en referenties hierin). ASMITA is een evenwichtsmodel, waar de interactie tussen geulen, platen, en zeewaartse bekken op hoog aggregatieniveau wordt gekalibreerd met historische bodemgegevens. Bij deze aanpak geldt dat de kritische zeespiegelstijging waarbij verdrinking optreedt, afneemt met de grootte van het bekken (m.a.w. kleine bekkens kunnen een grotere zeespiegelstijging bijhouden) en

het sedimentaanbod. De ASMITA resultaten van Wang et al. (2018) suggereren dat de individuele Waddenzeebekkens deels verdrinken bij verschillende waarden voor de zeespiegelstijging, met het Vlie (0.63 cm/jaar) als meest gevoelig en het Pinkegat (3.27 cm/jaar) als minst gevoelige bekken. Het Eems estuarium is hierbij niet onderzocht, maar de resultaten van de ASMITA studie kunnen wel worden geëxtrapoleerd naar de Eems. Enerzijds is het Eems estuarium groter dan bijvoorbeeld het Vlie, waardoor een lagere kritische waarde voor de zeespiegelstijging verwacht mag worden. Aan de andere kant is het aanbod groter, en dus een hogere kritische zeespiegelstijging mogelijk is.

Proces-gebaseerde modellen (zoals Delft3D) worden weliswaar steeds meer gebruikt om lange periodes door te rekenen, maar relaties met zeespiegelstijging zijn nog weinig gelegd. Een recente uitzondering hierop is Elmilady et al. (2019): zij concludeerden met behulp van een proces-gebaseerd model (Delft3D) dat de intergetijdengebieden in een door hen onderzocht deel van de baai van San Francisco voor bijna de helft verdrinken bij het minst extreme zeespiegelstijgingsscenario (0.47 cm/jaar) – 90% verdwijnt binnen 100 jaar bij een zeespiegelstijging van 1.67 cm/jaar. Proces-gebaseerde modellen suggereren ook dat kwelders de zeespiegelstijging niet bij zullen houden (Best et al., 2018).

De hier gepresenteerde resultaten suggereren dat een groot deel van de slibrijke intergetijdengebieden in het Eems estuarium een zeespiegelstijging van 0.68 cm/jaar deels bijhouden (LZS-model, tot 2050). Indien het slibaanbod voldoende blijft (zoals aangenomen in het Dollard model) houden de platen een stijging van 1.2 cm/jaar deels (maar niet volledig) bij. Het LZS-model suggereert verder dat de zandige geulen en zandige platen de zeespiegelstijging niet bij kunnen houden. De goede overeenkomst tussen historische veranderingen in het geulvolume en berekende netto transporten (§5.1.2) suggereert dat het model redelijk in staat is netto transporten te voorspellen, en dat het berekende effect van zeespiegelstijging aannemelijk is. De berekende beperkte compensatie van het model voor bodemdaling is niet in lijn met bodemdalingstudies. De meeste lokale bodemdalingen als gevolg van zout of gasonttrekking zijn nauwelijks in de bodemontwikkeling terug te zien, wat suggereert dat lokale bodemdaling volledig wordt gecompenseerd. Dit suggereert dat subtiele veranderingen in de bodemligging nauwelijks tot een berekende verandering in het residueel transport leiden, terwijl dit in werkelijkheid wel plaatvindt. Men moet zich echter realiseren dat er relatief weinig bekend is over het meegroeien van estuaria met zeespiegelstijging, voor een belangrijk deel omdat hier nog geen realistische datasets beschikbaar voor zijn (een logisch gevolg van het feit dat de zeespiegelstijging nu nog gering is). Het is mogelijk dat zich op langere tijdschalen een nieuw dynamisch evenwicht instelt waar het transport richting het estuarium toeneemt.

Over het hele Eems estuarium is de import echter onvoldoende om de zeespiegelstijging bij te houden. Tussen nu en 2050 is de voorspelde zeespiegelstijging 0.7 cm/jaar. Het Eems-estuarium tussen Borkum en Rottumeroog (het deel waarvan sediment aanvoer via de Westereems plaats vindt) heeft een oppervlakte van ongeveer 500 km<sup>2</sup>. Om de zeespiegelstijging van 0.7 cm/jaar bij te houden, is daarom een sediment import van 3.5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar nodig. Met een zeespiegelstijging van 0,7 cm/jaar neemt de berekende sediment import slechts met 0,5 miljoen m<sup>3</sup>/jaar toe (Figuur 4.13; 0.3 miljoen m<sup>3</sup> zand en 0.25 miljoen m<sup>3</sup> slib). Dit betekent dat het estuarium zonder zeespiegelstijging opvult (2.25 tot 4 miljoen m<sup>3</sup> import in het model, 2.9 miljoen m<sup>3</sup> volgens de oude kaarten van Pierik et al., 2018) maar dat de verwachte zeespiegelstijging tot een grotere sedimentvraag leidt (3.5 miljoen m<sup>3</sup>) dan getransporteerd kan worden (2.8 tot 4.8 miljoen m<sup>3</sup>, wat grotendeels op ondiepe intergetijdengebieden wordt afgezet).

#### 5.1.4 Geschiktheid voor doorrekenen van maatregelen

Het model is opgezet om het effect van maatregelen (zoals geformuleerd binnen Eems Dollard 2050) op morfologische ontwikkeling en slibconcentratie door te rekenen. Dit gaat vooral om maatregelen gericht op aanslibbing (binnendijks of buitendijks), zoals de buitendijkse slibsedimentatie Dollard maar ook potentiële maatregelen zoals doorgerekend in Deltares (2017c). Het morfologisch model is redelijk geschikt om dergelijke maatregelen gericht op aanslibbing van platen door te rekenen, omdat (1) de berekende aanslibbing als gevolg van zeespiegelstijging aannemelijk lijkt (er is geen methode om dit exact vast te stellen), en (2) deze aanslibbing beperkt beïnvloed wordt door modelinstellingen. Ook maatregelen gericht op grootschalige veranderingen in de zandbalans en slibbalans kunnen gekwantificeerd worden, zoals veranderingen in baggerbezwaar en aanslibbing.

Met de huidige resolutie is het model minder geschikt om maatregelen waarbij aanslibbing in de Bocht van Watum belangrijk is door te rekenen, omdat de sedimentatie wordt onderschat. Een mogelijke oplossing hiervoor is om in de toekomst een lokale verfijning (via domeindecompositie) aan te brengen in gewenste gebieden.

Ook is het model minder geschikt voor maatregelen waarbij zoutindringing of gedetailleerde morfologische veranderingen in geulen van belang is. Maatregelen gericht op de vaarweg naar Emden en de Eems rivier moeten zorgvuldig worden geïnterpreteerd omdat zowel het LZS model als het D3S model niet de hypertroebele condities in de Eems reproduceren.

## 5.2 **Systeemgedrag**

Deze studie heeft een aantal belangrijke bevindingen opgeleverd over het functioneren van het Eems estuarium:

*Het dichtslibben van de bocht van Watum is deels het gevolg van de verlanding van de Dollard*  
Lange-termijn morfologische simulaties laten zien dat het kombergingsgebied van de Dollard het geulensysteem in het Eems estuarium sterk beïnvloedt. Met een historisch maximaal kombergingsgebied (zoals voorkwam rond 1500) ontstaat in het middengebied van het Eems estuarium (tussen Eemshaven en de Dollard) een twee-geulen systeem. Wanneer de huidige kustlijn als landwaartse begrenzing wordt gebruikt, ontstaat een enkele getijgeul. Dit suggereert sterk dat de degeneratie van de bocht van Watum (zoals in de afgelopen 200 jaar) in ieder geval deels het gevolg is van de verlanding van de Dollard in de afgelopen 500 jaar. Andere aspecten die hier waarschijnlijk ook aan hebben bijgedragen zijn veranderingen in baggeren en storten, de aanleg van de Eemshaven, en de aanwezigheid van de Griesberg.

*De verdeling over de Westereems en de Oostereems wordt beïnvloed door harde lagen in de ondergrond*

De Westereems is sterker ontwikkeld dan de Oostereems. Het model suggereert dat de Westereems dominantier wordt ten opzichte van de Oostereems wanneer erosie van de onderliggende bodem van de Oostereems wordt begrensd door harde lagen.

*De slibrijke delen van het estuarium kunnen de zeespiegelstijging grotendeels bijhouden*

Zowel het LZS-model als het Dollard model suggereren dat de slibrijke platen de zeespiegelstijging grotendeels bij kunnen houden. Binnen een brede range aan sedimentaanbod- en modelparameters wordt aanslibbing gestuurd door veranderingen in de beschikbare ruimte om te bezinken. Deze accommodatieruimte is sturend omdat de vorm van de intergetijdengebieden in dynamisch evenwicht is met transportprocessen over de platen, en daarom groeien platen mee met de zeespiegelstijging. Kwelders zijn niet als begroeide gebieden meegenomen in het model, maar als hoge platen (en niet alle kwelders zijn onderdeel

van het modeldomein). Het extra invangende karakter typisch voor kwelders kan daarom niet worden geëvalueerd. De verwachting is dat deze geheel meegroeien omdat het aanbod aan slib hoog is en er geen opwerveling in de vegetatie van de kwelders kan plaatsvinden.

#### *De zandige delen van het estuarium verdrinken grotendeels bij zeespiegelstijging*

De zandige, ondiepe delen van het estuarium laten weinig aanzanding zien. Wanneer deze niet verslibben, zullen ze verdrinken. De plaat Hond-Paap groeit gedeeltelijk mee door te verslibben. Het estuarium importeert 1.0 miljoen m<sup>3</sup> zand per jaar (bij zeespiegelstijging) maar dit is onvoldoende om alle zandige delen mee te laten groeien. Het zal hoogstens het meegroeien van een deel van de getijgeulen mogelijk maken. Er hoeft in de vaargeulen mogelijk minder gebaggerd te worden.

#### *Bodemdaling door gaswinning wordt nauwelijks gecompenseerd*

Bodemdaling door gaswinning treedt lokaal op (met een maximum rond Delfzijl). Het effect van bodemdaling is geëvalueerd met de voorspelling (10 cm maximale daling), niet met historische veranderingen (waarin de bodemdaling groter was). De modelresultaten laten nauwelijks compensatie voor bodemdaling zien: bodemdaling wordt daarom in het model nauwelijks bijgehouden. Dit is in tegenstelling met waarnemingen: het effect van bodemdaling wordt nauwelijks waargenomen in de historische bodemontwikkeling. De toplaag van Hond-Paap en de Bocht van Watum (liggend in het gebied met de meeste bodemdaling) verslibben sterk. De beperkte berekende bodemaanpassing lijkt daarom het gevolg van een (onbekende) modeltekortkoming.

#### *Zeespiegelstijging leidt tot een verhoogde vertroebeling in ondiepe gebieden*

Bij een toename van het slibgehalte op de platen wordt meer slib geresuspendeerd. Hierdoor nemen de slibconcentraties boven de platen toe. Aangezien zeespiegelstijging tot opslibbing van de platen leidt, nemen de slibconcentraties toe bij zeespiegelstijging. In werkelijkheid zal dit mogelijk deels worden gecompenseerd door sedimentatie op de kwelders (hoge concentraties leiden tot meer sedimentatie op de kwelders). Dit sediment wordt daarmee onttrokken en leidt tot snellere groei van kwelders maar lagere groei van intergetijdegebieden).

#### *Onttrekken van slib*

Het onttrekken van slib uit havens (van Delfzijl en Eemshaven) leidt tot een sterke afname van sedimentconcentraties (zoals met diverse eerdere studies al is onderbouwd). Hierbij wordt in totaal rond de 0.4 miljoen ton/jaar onttrokken. Het huidige model suggereert dat morfologische veranderingen door slibonttrekkingen klein zijn. Hierdoor blijft het effect van slibonttrekking in de toekomst even groot.

## 6 Conclusies en aanbevelingen

De belangrijkste inhoudelijke conclusies zijn:

- Het dichtslibben van de bocht van Watum is deels het gevolg van de verlanding van de Dollard
- De verdeling van getijdebiet over de Westereems en de Oostereems en daarmee dominantie van beide geulen wordt beïnvloed door harde lagen in de ondergrond, waarbij harde lagen dominantie van de Westereems ten opzichte van de Oostereems bewerkstelligen.
- Bij zeespiegelstijging volgens het KNMI 2014 W scenario zullen de zandige delen van het estuarium verdrinken
- De slibrijke delen van het estuarium kunnen de zeespiegelstijging grotendeels bijhouden
- Bodemdaling door gaswinning wordt nauwelijks gecompenseerd door sedimentatie – hier wordt het dus dieper.
- Zeespiegelstijging leidt tot een verhoogde troebelheid boven de platen
- Onttrekken van slib uit de havens Delfzijl en Eemshaven leidt tot een sterke afname van de troebelheid. Onttrekken heeft nauwelijks morfologische gevolgen. De modelvoorspelling van het effect op de troebelheid zal blijven gelden.
- De belangrijkste veranderingen in ecotopen in de Dollard is een afname van het areaal supralittoraal. Het hoog, laag, en sublittoraal neemt beperkt toe in areaal; het meest voorkomende ecotoop (het midlittoraal) lijkt constant te blijven.

De belangrijkste tekortkomingen in het model zijn:

- De onderschatting van de slibconcentraties in het vaarwater naar Emden en de Eems Rivier
- De roosterresolutie is beperkt (met name in de geulen). Met de huidige generatie computers en software is dit niet op te lossen. Delft3D FM is beter te paralleliseren en daarom kan de rekensnelheid verbeterd worden door met meer computers te rekenen. Een aantal processen van het LZS model zijn nog niet voldoende betrouwbaar in Delft3D FM.
- De geulen snijden te diep in – deels vanwege processen welke onvoldoende worden begrepen (dwarshelling effecten, numerieke diffusie, gridoriëntatie) en deels vanwege de beperkte roosterresolutie.
- De roosterranden zijn numeriek instabiel. Voor simulaties tot aan 2050 gaat dit voor de meeste scenario's goed, maar sterk afwijkende bodemliggingen (als gevolg van veranderingen in de tijd, maar mogelijk ook wanneer maatregelen met sterk afwijkende bodemliggingen worden doorgerekend) leiden tot teveel sedimentatie op de modelranden.
- De kwelders zijn niet goed ingebouwd. Een aantal kwelders ontbreken in het modeldomein, en kwelders welke wel worden gemodelleerd zijn onbegroeid. In werkelijkheid leidt vegetatie tot extra slibvangst. Het model onderschat daarom aanslibbing van de hogere intergetijdengebieden.

De belangrijkste aanbevelingen zijn:

- Het LZS-model kan nog worden verbeterd (zie punten hierboven), maar hierbij moet goed worden nagedacht over de verhouding tussen de inspanning van de verbetering en de opbrengst. Potentiele verbeterpunten zijn vooral gelegen in roosterresolutie, maar dat leidt tot onacceptabel lange rekentijden. Maatregelen kunnen mogelijk wel worden doorgerekend met lokale verfijningen (domeindecompositie). Ook kunnen modelalternatieven beter zijn (bijvoorbeeld het Dollard model, of een model specifiek voor de interactie Eems Rivier – Eems estuarium).
- Het Dollardmodel verbeteren door de resolutie te verhogen en door de kwelders beter in te bouwen .
- De vertroebeling in het vaarwater naar Emden en de Eems-rivier in het D3S-model verbeteren aan de hand van de meetcampagne uitgevoerd in 2018 en 2019. Op basis van voorlopige resultaten van deze meetcampagne lijkt vooral een relatie tussen valsnelheid en slibconcentratie potentieel tot modelverbeteringen te kunnen leiden, en moet mogelijk de doorstroom tussen de Dollard en het vaarwater naar Emden over / tussen de Geise dam herzien worden.
- Het bepalen van bodemveranderingen in het Eems Estuarium, en de rol van zand en slib hierin, op basis van gemeten bodemveranderingen en slibgehalten. Dit geeft kwantitatief inzicht in aanzanding, aanslibbing, en erosie. Dit is belangrijk voor een beter begrip van het systeem en nauwkeurigheid van gebruikte modellen.
- Het doen van onderzoek naar effecten van zeespiegelstijging op morfologisch meegroeien van estuaria zoals het Eems estuarium. Hierdoor kan het vertrouwen in voorspellingen zoals gedaan in deze studie vergroot worden. Een belangrijke uitdaging hierbij is dat modellen in morfodynamisch evenwicht moeten zijn, terwijl de modelbodems nog wel overeenkomsten moeten hebben met de werkelijke bodem. Morfodynamisch evenwicht is relatief eenvoudig bij simpele modellen (op basis van eenvoudige vergelijkingen, maar bijvoorbeeld ook een geschematiseerde geometrie in complexe modellen). Dit type modellen mist de complexiteit van de werkelijkheid, wat de relevantie van dergelijke modellen voor het beantwoorden van vragen beperkt. Hybride oplossingen zoals het Dollard model (waar evenwicht is vanaf 2050, terwijl de bodemligging nog redelijk op de werkelijkheid lijkt) lijken hierbij goede oplossingen.

## 7 Referenties

- Baar, A.W., de Smit, Jaco, Uijttewaai, W.S.J. & Kleinhans, M.G., 2018. Sediment Transport of Fine Sand to Fine Gravel on Transverse Bed Slopes in Rotating Annular Flume Experiments. *Water Resources Research*, 54 (1), (pp. 19-45).
- Benedet, L., J.P.F. Dobrochinski, D.J.R. Walstra, A.H.F. Klein, R. Ranasinghe, 2016. A morphological modeling study to compare different methods of wave climate schematization and evaluate strategies to reduce erosion losses from a beach nourishment project. *Coastal Engineering*, Volume 112, Pages 69-86, ISSN 0378-3839.
- Best, Ü.S.N., M. Van der Wegen, J. Dijkstra, P.W.J.M. Willemsen, B.W. Borsje, Dano J.A. Roelvink (2018). Do salt marshes survive sea level rise? Modelling wave action, morphodynamics and vegetation dynamics, *Environmental Modelling & Software*, Volume 109, Pages 152-166,
- Dankers, PJT, van Maren, DS, en Schmidt, C (2015). Plan van Aanpak Hydromorfologische Verbetering Eems Dollard Estuarium. ED2050 rapport, 74 p.
- Dastgeib, A., 2012. Long-term process-based Morphological modelling of large tidal basins. PhD thesis, Unesco-IHE.
- Deltares, 2015a. Mud dynamics in the Ems Estuary, phase 2: Setup sediment transport models. Deltares rapport 1205711-001-ZKS-0004, 113 p.
- Deltares, 2015b. Mud dynamics in the Ems Estuary, phase 2: Model analysis. Deltares rapport 1205711-001-ZKS-0005, 84 p.
- Deltares, 2015c. Mud dynamics in the Ems Estuary, phase 2: Analysis soil samples. Deltares rapport 1205711-001-ZKS-0006, 75 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, 49 p.
- Deltares, 2017c. Hydromorfologische verbetering ED2050: Eerste beoordeling maatregelrichtingen. Deltares rapport 11200116-000-ZKS-0004, 106 p.
- Elmilady, H., M. van der Wegen, D. Roelvink and B. E. Jaffe (2019). Intertidal Area Disappears Under Sea Level Rise: 250 Years of Morphodynamic Modeling in San Pablo Bay, California.
- Huisman, B., Schrijvershof, R. A., Lanckriet, T., & Van der Werf, J. (2018). Baggerdepositie in diepe geulen. Deltares rapport 1210301-000-ZKS-0027.
- Pages 1-14, *Nederlandse Aardolie Maatschappij*, (2016). Winningsplan Groningen Gasveld 2016. EP201604259068, p 86.
- Pierik, H.J., F.S. Busschers, M.G. Kleinhans, (2018). De rol van resistente lagen in de historische morfologische ontwikkeling van het Eems-Dollard estuarium vanaf de 19e eeuw, Universiteit Utrecht, Departement Fysische Geografie, conceptrapport i.o. Rijkswaterstaat WVL ten behoeve van het ED2050 programma.
- Ridderinkhof, H., van der Ham, R. & van der Lee, W., (2000). Temporal variations in concentration and transport of suspended sediment in a channel-flat system in the Ems-Dollard estuary. *Continental Shelf Research*, 20, pp. 1479-1493
- Vos, P.C., Knol, E., 2015. Holocene landscape reconstruction of the Wadden Sea area between Marsdiep and Weser. Explanation of the coastal evolution and visualization of landscape development of the northern Netherlands and Niedersachsen in five palaeogeographical maps from 500 BC to present. *Neth. J. Geosci.* 94-2, 157–183.
- Wang, Z., Elias, E., Van der Spek, A., & Lodder, Q. (2018). Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: Impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97(3), 183-214. doi:10.1017/njg.2018.8

- Zijl, F., Plieger, R., Vatvani, D., Verlaan, M., Gerritsen, H., Twigt, D. 2009. DCSM v6 model setup and calibration of tidal propagation. Deltares rapport Z4632, 85 p.
- Zijl, F., Sumihar, J., Verlaan, M. 2015. Application of data assimilation for improved operational water level forecasting on the northwest European shelf and North Sea