Deltares

Analyse fysische processen Waddenzee

Inzet numeriek model voor analyse systeemwerking en gevoeligheidsscenario's

Analyse fysische processen Waddenzee
Inzet numeriek model voor analyse systeemwerking en gevoeligheidsscenario's

Auteur(s)
Bob Smits
Julia Vroom
Roy van Weerdenburg
Jelmer Cleveringa
Petra Dankers

Partners
ARCADIS Nederland BV, ZWOLLE
Royal HaskoningDHV Nederland B.V., NIJMEGEN

Analyse fysische processen Waddenzee

Inzet numeriek model voor analyse systeemwerking en gevoeligheidsscenario's

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer ir. W.S. de Vries
Referenties	
Trefwoorden	slibmodellering, Waddenzee, systeembegrip, meteorologie, D-Water Quality, slibtransport, wantijen, binnendijkse en buitendijkse slibvangen

Documentgegevens	
Versie	1.0
Datum	21-12-2020
Projectnummer	11205229-002
Document ID	11205229-002-ZKS-0003
Pagina's	108
Status	Definitief

Auteur(s)

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.2	Bob Smits Julia Vroom Roy van Weerdenburg Jelmer Cleveringa Petra Dankers			
1.0	Bob Smits Julia Vroom Roy van Weerdenburg Jelmer Cleveringa Petra Dankers	Thijs van Kessel	Toon Segeren	

Samenvatting

Voorliggende rapportage beschrijft de inzet van het nieuw ontwikkelde slibmodel voor de Waddenzee (Flexible Mesh model met D-Water Quality) om het systeembegrip te vergroten. Ook zijn enkele extreme scenario's doorgerekend om te verkennen wat de effecten op de slibdynamiek zouden zijn indien grootschalige slibvangen worden aangebracht langs de vastelandskust van de Waddenzee.

Systeembegrip
De inzet van het model voor het vergroten van het systeembegrip richt zich voornamelijk op de verklaring van de korte termijn-, seizoens- en middellange (orde jaren) termijnvariaties in zwevend stof (SPM). Uit de analyse van de mogelijke verklarende factoren voor deze variaties zijn de invloeden van golf-gedreven resuspensie en wind-gedreven (rest)transporten groot gebleken. Doordat de gemiddelde golfhoogte in de winter groter is dan in de zomer (stormen niet meegerekend), laat het model een duidelijk seizoenspatroon in SPM zien. De wind heeft in het model grote invloed op de grootschalige slibtransporten door de zeegaten en over de wantijen. Het jaarlijkse slibtransport over het wantij bij Terschelling is, zowel netto als bruto, groter dan de transporten door de individuele zeegaten. De drie westelijke bekkens laten een netto import van slib zien, terwijl het model resulteerde in een netto export van slib uit het Borndiep, samenhangend met het grote, berekende transport over het wantij van Terschelling. Bovendien laten simulaties voor jaren met enkel een aanpassing van de meteorologische forcering grote verschillen in netto slibsedimentatie in de bekkens zien. Deze slibsedimentatie komt qua ordegrootte overeen met het langjarig gemiddelde uit velddata. Mogelijk leidt een opeenvolging van jaren met relatief veel import tot meer accumulatie van slib dan andere jaren. Deze vergroting van de dynamische buffers kan uiteindelijk leiden tot een langjarige verhoging van SPM in de Waddenzee. Dit kan modelmatig aangetoond worden door het model voor meerdere jaren (orde decennium) achter elkaar te draaien, dat is nu nog niet gedaan.

Mogelijkheden de slibdynamiek te beïnvloeden
Met het model zijn enkele vingeroefeningen gedaan om het effect van zeer grote binnen- en buitendijkse slibvangen te onderzoeken. Deze vergroten de komberging en leiden tot een toename van de stroomsnelheden in de geulen van het betreffende kombergingsgebied. Dit heeft een erosie van het slib in deze geulen tot gevolg. Ook kan een slibvang grote invloed hebben op het bodemslibgehalte en het SPM, zowel in het kombergingsgebied als in de rest van de Waddenzee. Omdat via de jaarlijkse netto slibtransporten door de zeegaten en over de wantijen ook de natuurlijke systeemdynamiek wordt beïnvloed, moeten de effecten van dergelijke maatregelen uitvoerig worden bestudeerd. De mate waarin een slibvang uitwisseling heeft met de Waddenzee is, naast de grootte van de slibvang, een belangrijke indicator voor de invloed op het natuurlijke systeem.

Tot slot concluderen wij dat binnen dit project een nieuw modelinstrumentarium is ontwikkeld voor modellering van slib en met succes is toegepast. Toepassing voor nieuwe casussen kan echter aanvullende modelopzet en -kalibratie vereisen, zoals de lokale roosterverfijning en extra kalibratie op baggervolumes voor de toepassing bij het baggerprobleem van de vaargeul bij Holwerd heeft laten zien (zie Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020). Omdat dit model is opgezet in Flexible Mesh is een dergelijke roosterverfijning gemakkelijker dan voorheen. Bovendien vergemakkelijkt het gebruik van Flexible Mesh ook het doorrekenen van langjarige periodes met variabele meteorologie en hydrodynamica, omdat deze software beter parallel rekent.

Inhoud

	Samenvatting	**4**
	Begrippenlijst	**7**
1	**Introductie**	**8**
1.1	Achtergrond	8
1.2	Het conceptuele model	9
1.2.1	Slibdynamiek op verschillende tijdschalen	9
1.2.2	Bijdrage van bodemslib aan morfologische veranderingen	10
1.2.3	Meerjarige fluctuaties in gesuspendeerd slib (SPM)	10
1.2.4	Interactie met ecologie	11
1.2.5	Link met beleid en beheer	11
1.3	Onderzoeksvragen	11
1.4	Aanpak	12
1.5	Leeswijzer	13
2	**Beknopte beschrijving numeriek model (DWSM)**	**14**
3	**Analyse fysische processen**	**16**
3.1	Introductie	16
3.2	Invloed van golven op seizoensfluctuaties SPM gehalte	16
3.2.1	Onderscheid effect van stormen en normale condities	16
3.2.2	Effect van stormen op SPM	17
3.3	Meteorologie	19
3.3.1	Lokale variaties in SPM per getijperiode	20
3.3.2	Variaties in de slibbalans van de Waddenzee	21
3.3.3	Variaties in SPM door verschillende meteorologische condities en golven	25
3.4	Watertemperatuur	27
3.5	Verticale menging	28
3.6	Zoetwaterafvoer	33
3.6.1	Validatie	38
3.7	SPM variaties op de Noordzee	39
3.8	Microfytobenthos	40
3.9	Baggeren en verspreiden	41
3.9.1	Modelopzet en modelsimulaties	41
3.9.2	Resultaten	43
3.9.3	Discussie	46
3.10	Grootte van dynamische buffers en verblijftijd	47
3.10.1	Grootte van dynamische buffers van slib	47
3.10.2	Verblijftijd van slib in de Waddenzee	50
3.11	Conclusie	51
4	**Het beïnvloeden van de slibhuishouding in de Waddenzee: een gevoeligheidsanalyse**	**53**
4.1	Introductie	53
4.2	Gevoeligheidsscenario’s	53
4.2.1	Drie scenario’s	53
4.2.2	Verschillen tussen scenario’s	55
4.2.3	Omvang verbindingsgeulen	55
4.3	Type uitkomsten van modelsimulaties	56

4.4 Resultaat gevoeligheidsscenario 1: afgraving buitendijkse kwelder en wadplaat bij Zwarte Haan 57
4.4.1 Het scenario 57
4.4.2 Sedimentatie en slib in de bodem 57
4.4.3 Verschil referentie en scenario 58
4.4.4 Slib in de waterkolom 61
4.4.5 Veranderingen in hydrodynamica 62
4.5 Resultaat gevoeligheidsscenario 2: afgraving binnendijks gebied bij Zwarte Haan 65
4.5.1 Het scenario 65
4.5.2 Sedimentatie en slib in de bodem 65
4.5.3 Veranderingen in hydrodynamica 67
4.6 Resultaat gevoeligheidsscenario 3: afgraving binnendijks gebied bij Harlingen 69
4.6.1 Het scenario 69
4.6.2 Slibsedimentatie en slib in de bodem 70
4.6.3 Slib in de waterkolom 73
4.6.4 Veranderingen in hydrodynamica 74
4.7 Discussie gevoeligheidsscenario's i.r.t. grootschalige slibdynamiek 76
4.8 Gevolgen van slibvangen 78

5 Conclusies en aanbevelingen 79
5.1 Conclusies 79
5.2 Aanbevelingen 81

6 Referenties 82

A Implementatie microfytobenthos in D-Water Quality 84
A.1 Introduction 84
A.2 Implementation 84
A.2.1 Formulations 84
A.2.2 Implementation in D-Water Quality 86
A.3 Application 88
A.3.1 Description of test case 88
A.3.2 Results of test case and sensitivity to the maximum biofilm growth rate 91
A.3.3 Additional model tests 97
A.4 Concluding remarks 101
A.5 References 101
A.6 Additional model results 102
A.6.1 Spatial pattern of biofilm development 102
A.6.2 Timeseries of sediment mass in layer S1 106

Begrippenlijst

Veelvoorkomende begrippen zijn in deze rapportage als volgt gedefinieerd:

Term	Parameter	Definitie
Depositie-efficiëntie [-]	depeff	Fractie van de bruto depositieflux van de waterkolom naar de bodem die in de bodemlagen terecht komt.
Slibfractie in de waterkolom	IM1	*Inorganic Matter*; Eerste slibfractie in het buffermodel
Slibfractie in de waterkolom	IM2	*Inorganic Matter*; Tweede slibfractie in het buffermodel
Intra-getijvariatie		Variatie die terug te zien is op een tijdschaal van een getijperiode
Flufflaag		Zie S1. Kan in havens en vaargeulen zich manifesteren als 'fluffy' materiaal.
Bodemlaag S1	S1	Gemakkelijk erodeerbare bodemlaag van het zgn. tweelagen of buffermodel; heeft in het model alleen massa en geen dikte en ligt op de onderlaag S2.
Bodemlaag S2	S2	Bufferlaag van het buffermodel. Bestaat uit een zandige matrix waarin slib wordt gebufferd of geconsolideerd slib met hogere erosieweerstand.
SPM		*Suspended Particulate Matter*; deeltjes die in de waterkolom zitten. Ook wel aangeduid met zwevende stof in de waterkolom
Residuele stroming		Netto stroming [m/s] over een bepaalde periode
Residueel transport		Netto transport [m^3/s] over een bepaalde periode
Restdebiet		Netto debiet [m^3/s] over een bepaalde periode
Strijklengte		De ononderbroken afstand waarover de wind over het water kan waaien tot hij een zeker punt bereikt. Deze lengte is bepalend voor de hoogte van golven.
τ_{flow} [Pa]	$\boldsymbol{\tau_{flow}}$	Bodemschuifspanning ten gevolge van stroming
τ_{wave} [Pa]	$\boldsymbol{\tau_{wave}}$	Bodemschuifspanning ten gevolge van golven
Valsnelheid	w_s	Snelheid waarmee deeltjes in stilstaand water door de waterkolom naar de bodem zakken
Verblijftijd in de bodem		Gemiddelde duur dat slib in de bodem verblijft

1 Introductie

1.1 Achtergrond

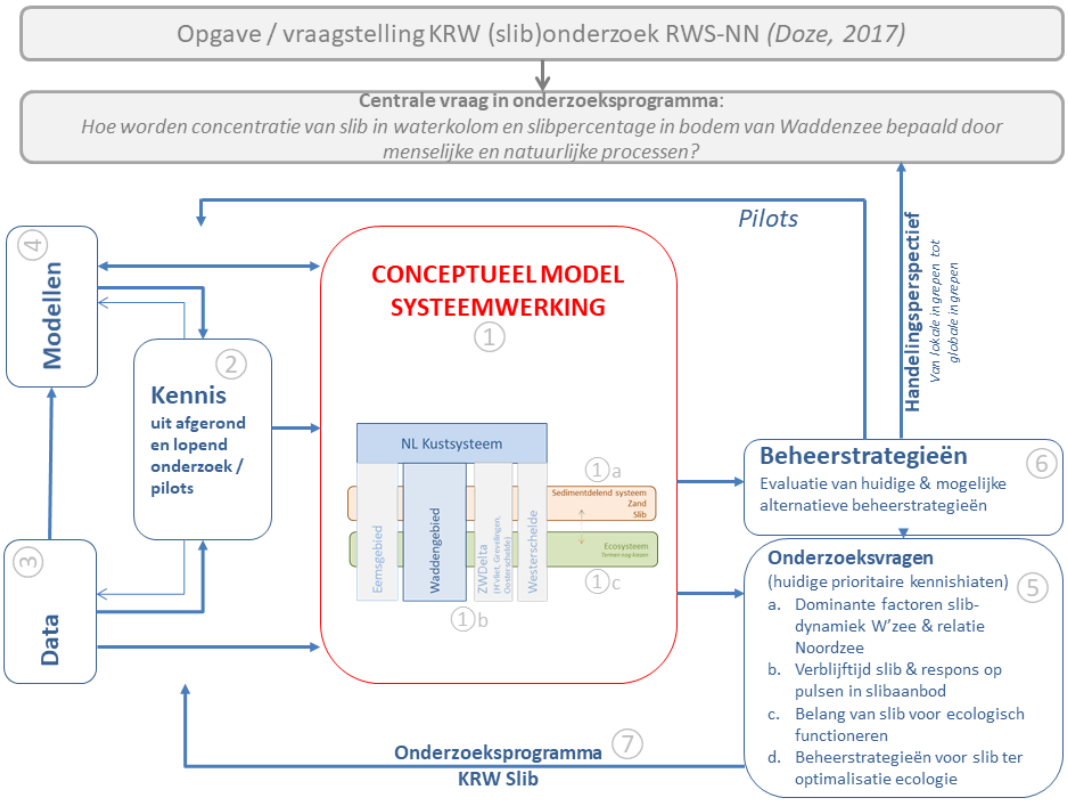
Rijkswaterstaat is in 2016 gestart met een programma voor de ontwikkeling van kennis over de morfologie van de Nederlandse Waddenzee en voor het inbedden hiervan in beleid en beheer. In het programma wordt morfologische kennis op een structurele manier verzameld, geanalyseerd, geordend en geborgd. Daarnaast wordt de kennis toegankelijk gemaakt voor beleids- en beheervraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad.

Het voorliggende rapport wordt uitgebracht als onderdeel van het onderzoek naar de slibhuishouding van de Waddenzee voor het project Kaderrichtlijn Water Waddenzee, in opdracht van Rijkswaterstaat Noord-Nederland.

Het beleid en beheer van het Waddengebied is erop gericht om belangrijke functies (bereikbaarheid, veiligheid en natuurlijkheid) te kunnen waarborgen. Het beleid en beheer kan invloed hebben op de slibdynamiek, bijvoorbeeld omdat slibrijk sediment wordt gebaggerd uit vaargeulen en havens en de baggerspecie elders wordt verspreid. Dit kan daar leiden tot extra vertroebeling van het water, en lokaal gevolgen hebben voor o.a. de primaire productie. Om het beleid en beheer van de Waddenzee, en daarmee de menselijke ingrepen te kunnen optimaliseren op bijvoorbeeld effecten op de natuur, kosten of CO_2-uitstoot, is het van belang te begrijpen hoe het natuurlijke systeem werkt en reageert op ingrepen.

Om de relevante actuele kennis over de slibdynamiek in de Waddenzee bij elkaar te brengen, is in 2019 een conceptueel denkmodel van de systeemwerking opgezet, dat gebaseerd is op analyse van data, numerieke modelresultaten en aanwezige kennis (Figuur 1.1). Dit conceptueel denkmodel wordt verder ingevuld en verfijnd door nieuwe data-analyses en modelresultaten, zodat kennisvragen over het systeem (zie paragraaf 1.3) beter beantwoord kunnen worden. Het conceptuele denkmodel moet het uitgangspunt vormen voor beleid en beheer, waarbij de impact van (mogelijke) ingrepen vooraf kan worden ingeschat en de monitoring na uitvoering van ingrepen weer kan zorgen voor een vergroting van het systeembegrip.

In 2018 zijn er data-analyses uitgevoerd om bij te dragen aan het conceptuele denkmodel. Daarnaast is er geput uit kennis van eerder uitgevoerde modelleringsstudies. Het conceptuele model is gerapporteerd in Herman et al. (2018). In 2019 is er gestart met de opzet van een numeriek model (Van Weerdenburg en Zijl, 2019) om kennisvragen te kunnen beantwoorden die niet met data-analyse alleen kunnen worden beantwoord. Bovendien kan met een numeriek model de invloed van mogelijke beheermaatregelen worden onderzocht. De meetdata van zwevend stof (SPM, *suspended particulate matter*) in de Waddenzee zijn namelijk beperkt in de ruimte en frequentie waardoor de slibdynamiek in grote gebieden niet goed in beeld is met alleen deze metingen. . In 2020 is de kalibratie van het bovengenoemde slibmodel afgerond (Vroom et al. 2020). Het numeriek model biedt de mogelijkheid het effect van sturende factoren afzonderlijk te onderzoeken, door deze modelmatig aan of uit te zetten. Verder wordt het numerieke model ingezet om potentiële ingrepen door te rekenen om de speelruimte voor het beïnvloeden van de slibdynamiek te kunnen onderzoeken.



Figuur 1.1 Schematisch overzicht van het KRW Slib project. Het conceptueel model over de systeemwerking (1) staat centraal. Deze wordt ondersteund door kennis (2) op basis van data (3) en modellen (4). Uiteindelijk helpt dit conceptueel model om inzicht te verkrijgen in onderzoeksvragen (5) en beheerstrategieën (6).

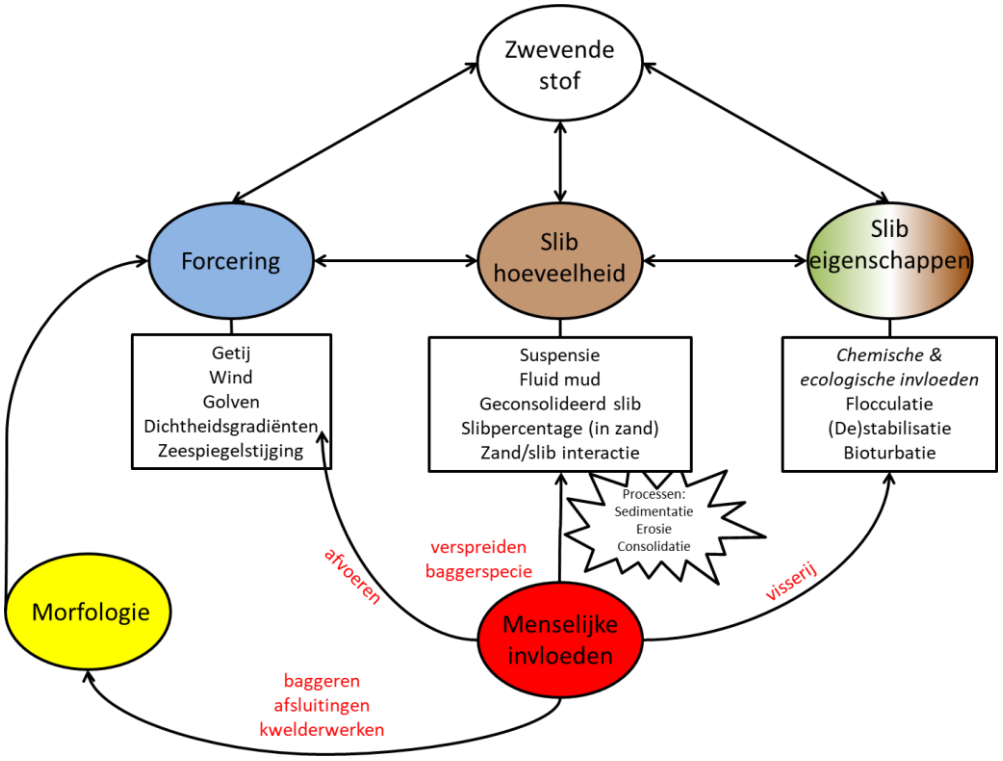
1.2 Het conceptuele model[1]

1.2.1 Slibdynamiek op verschillende tijdschalen

Het conceptueel model heeft drie tijdschalen (kort, middel en lang) en drie invloedsfactoren (hoeveelheid slib, slibeigenschappen en hydrodynamica) voor de slibdynamiek (Figuur 1.2). Op de korte tijdschaal (uren tot dagen) wordt de slibdynamiek gedomineerd door de hydrodynamica, gegeven de aanwezige hoeveelheid slib en de eigenschappen hiervan. Op de middellange tijdschaal (weken tot enkele jaren) kunnen de hoeveelheid en eigenschappen van slib gaan variëren door fysische en biologische invloeden en hierdoor neemt de complexiteit van de slibdynamiek toe. Op de lange tijdschaal (vele jaren) komt bovenop bovenstaande invloedsfactoren nog de interactie met morfologische ontwikkeling erbij.

De slibconcentratie in de waterkolom en de slibfractie in de bodem worden bepaald door de interactie van deze invloedsfactoren op verschillende tijdschalen. De gemiddelde verblijftijd van slib in de Waddenzee bepaalt op welke tijdschaal de dynamische hoeveelheid slib wezenlijk varieert en deze gemiddelde verblijftijd is vermoedelijk meerdere jaren. Het belang van slib voor ecologische doelen is nog niet verder uitgewerkt, maar uit het conceptueel denkmodel blijkt dat lichtklimaat en bodemsamenstelling in ieder geval twee belangrijke, aan slib gerelateerde factoren zijn.

[1] Deze paragraaf is ontleend (Herman et al., 2018; 2020)



Figuur 1.2 Sturende factoren voor slibdynamiek (zwevend stof)

1.2.2 Bijdrage van bodemslib aan morfologische veranderingen

In meer detail is aangetoond dat slib een belangrijke rol speelt in de morfologische processen op langere termijn in de Waddenzee (Cleveringa, 2018; Colina Alonso, 2020). In bodems met relatief hoog slibgehalte draagt slib aanzienlijk bij tot het totale sedimentvolume omdat deze gebieden ook sedimenteren. De tweedeling in de sedimenttypes suggereert dat hiervoor alleen de zeer slibrijke afzettingen echt van belang zijn. Dit is het geval in tientallen procenten van het totale intertidale areaal van de Waddenzee, nog exclusief de kwelders. Slibsedimenten zetten zich op andere plaatsen af dan zand, en ook om die reden is het meenemen van slib in de morfologische evolutie op langere termijn van groot belang. Uit de studies van Cleveringa (2018) en Colina Alonso (2020) blijkt dat in de westelijke Waddenzee (bekkens van Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie) de slibsedimentatie ongeveer even groot is als in de oostelijke bekkens (bekkens van het Zeegat van Ameland, Friesche Zeegat) en in totaal ca. 2,5 miljoen m^3/jaar voor alle bekkens tezamen. Daarbij is opvallend dat in de oostelijke Waddenzee ongeveer de helft van de slibsedimentatie plaatsvindt op de kwelders. Daarnaast suggereren modelresultaten dat slibafzettingen bij de vastelandskust, deels als gevolg van kwelderwerken, ook een effect hebben op de aangrenzende zone van de Waddenzee en op de wantijen, omdat zij komberging reduceren en daardoor via de hydrodynamiek weer de dynamiek van slib beïnvloeden.

1.2.3 Meerjarige fluctuaties in gesuspendeerd slib (SPM)

Het onderzoek (Herman et al. 2018, De Vries et al. 2018) heeft verder het belang aangetoond van de mesoschaal in de slibdynamiek, tussen de tijdschaal van het getij en die van de langjarige morfodynamiek. Het systeem beschikt over aanzienlijk langer geheugen, bv. in de SPM-gehaltes , dan op basis van getijdendynamiek verwacht zou worden. De suggestie is dat belangrijke buffers, misschien via fysisch-ecologische interactie en beïnvloed door relatief grootschalige processen als het weer, deze mesoschaal dynamiek bepalen. Het beter begrijpen van deze dynamiek is noodzakelijk als men de fluctuaties in zwevende stof over meerdere jaren beter wil evalueren op hun belang voor het beleid. In dit rapport worden hiervoor enkele inzichtelijke analyses uitgevoerd met het eerder ontwikkelde numerieke model.

Er is geen duidelijk causaal verband aangetoond tussen trends in het SPM van de Noordzee, en trends in de Waddenzee. Binnen beide afzonderlijke systemen is er wel samenhang, wat suggereert dat er ruimtelijk grootschalige fenomenen aan ten grondslag liggen, maar tussen beide systemen zijn de fluctuaties verschillend. Ook is geen duidelijk verband gevonden met gedocumenteerde slibbronnen zoals zandwinning, storten van havenslib en dergelijke. Voorlopig zijn hier geen voor de hand liggende aanwijzingen voor directe menselijke invloed gevonden.

1.2.4 Interactie met ecologie

Zoals genoemd is binnen KRW geen aandacht besteed aan effecten van slib, zowel SPM als slibgehalte in het sediment, op ecologische processen. Het omgekeerde effect van ecologische processen op slibdynamiek, heeft aandacht gekregen in de vorm van onderzoek naar tijdsdynamiek van microfytobenthos in relatie tot de dynamiek van SPM en van slibgehalte in het sediment. De biomassa van het microfytobenthos correleert ruimtelijk zeer sterk met het slibgehalte in het sediment. Ook correleert de dynamiek van microfytobenthos in de tijd, zeker op seizoens-schaal, zeer sterk met de dynamiek van SPM. Of dit op de langere tijdschaal ook zo is, blijft relatief onduidelijk omdat de tijdserie van microfytobenthos daarvoor te kort is. Daarom wordt momenteel een langere tijdreeks van microfytobenthos gegenereerd door het NIOZ, om met meer zekerheid uitspraak te doen over de correlatie met SPM. Het microfytobenthos is een belangrijke kandidaat voor de veronderstelde ‘bufferfunctie’ die verantwoordelijk is voor het lange geheugen in het SPM (korte termijnfluctuaties die op langere termijn doorwerken).

1.2.5 Link met beleid en beheer

Het belang van slib voor de morfologische evolutie op langere termijn, en zeker ook het belang van de ‘kwelderwerken’ daarin, kan helpen om de context van praktische problemen zoals het stijgende onderhoud van vaarwegen beter te begrijpen. Het kan ook aanleiding zijn om de doelstellingen van het beleid aan te passen, zoals het zoeken naar oplossingen op basis van gebruik van slib buiten het systeem. Vanwege de fluctuaties in SPM met een periode van enkele jaren, moet de analyse van de slibdynamiek en de implicaties voor KRW-doelen tenminste op deze tijdschaal plaatsvinden. Het lange geheugen van SPM in het systeem kan ook van belang zijn bij het bepalen van optimale strategieën voor het behandelen van baggerslib. Het terugstorten van dit slib kan aanleiding geven tot een verhoogde massa van SPM die lang in het systeem blijft hangen, wat reden zou kunnen zijn om te zoeken naar alternatieve verspreidingsstrategieën. Dit wordt in deelproject ‘Vaargeul Holwerd-Ameland’ onder dit KPP project in meer detail opgepakt (o.a. Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020). Het numerieke model dat in deze rapportage wordt beschreven zal bijdragen aan verder begrip van het effect van beleid en beheer op de slibdynamiek (o.a. in paragraaf 3.9 en hoofdstuk 4).

1.3 Onderzoeksvragen

In de vorige alinea’s worden al enkele onderzoeks- en beheervragen opgeworpen. Met de numerieke modellering worden de kennishiaten a (Dominante factoren slibdynamiek Waddenzee en relatie Noordzee) en b (Verblijftijd slib en respons op pulsen in slibaanbod) uit Figuur 1.1 onderzocht. Daarvoor worden de volgende onderzoeksvragen gespecificeerd:

1) **Wat veroorzaakt de korte en middellange termijnfluctuaties (dagen, seizoenen, jaren) in SPM?**
   Natuurlijke oorzaken:
   a) Golven
   b) Meteorologie (wind, luchtdruk)
   c) Microfytobenthos
   d) Watertemperatuur
   e) Verticale menging

f) Veranderingen in eigenschappen van slib (zoals bodemstabiliteit, -samenstelling of vlokvorming, waardoor gevoelige modelparameters als kritische schuifspanning en valsnelheid veranderd zijn)

Deels natuurlijke en deels door de mens beïnvloede oorzaken:
g) Zoetwaterafvoer
h) SPM variaties op de Noordzee

Volledige door de mens gestuurde oorzaken:
i) Baggeren en verspreiden

2) Wat veroorzaakt de lange termijn fluctuaties in SPM en bodemslibgehalte?
Deels natuurlijke en deels door de mens beïnvloede oorzaken:
a) Aanbod vanaf land en vanaf de Noordzee
b) Kwelderwerken

3) Wat is de verblijftijd van slib in de Waddenzee en hoe groot is de 'dynamische pool' van slib dat beschikbaar is voor resuspensie en transport?

4) Hoe reageert het systeem op ingrepen?

1.4 Aanpak

Vraag 1 betreft de aandrijvende krachten achter de korte en middellange termijn variaties in SPM. In de data zijn deze variaties zichtbaar als enkele jaren met verhoogd SPM-gehalte (zie figuur 6 uit Herman et al (2018)). Op kortere termijn (≤1 jaar) is het inzichtelijk in hoeverre de aandrijvende krachten impact hebben op het SPM-gehalte. Is het effect van fluctuaties in de aandrijvende kracht op korte termijn klein, dan zal het effect op langere termijn (orde jaren) ook beperkt zijn. Bijvoorbeeld, als golven een sterke variatie laten zien met hogere golven in de winter en rustiger condities in de zomer, maar het effect hiervan op het SPM-gehalte is klein, dan zal het verschil tussen stormachtige en kalme jaren ook leiden tot kleine verschillen in SPM op die tijdschaal. Het effect van golven, meteorologie, zoetwaterafvoer, watertemperatuur, menselijke ingrepen (baggeren en verspreiden), SPM variaties op de Noordzee en de verticale verdeling kunnen met het grootschalige model van de Waddenzee worden onderzocht. Door SPM op de Noordzee modelmatig te variëren, kan de relatie met de Noordzee worden onderzocht en kan de respons van het systeem op pulsen in het slibaanbod worden bestudeerd (kennishiaat a en b).

Het effect van verspreiden van gebaggerd slib is ook onderzocht in een eerdere KRW slib studie (van Kessel et al. 2015), maar toen was er nog geen duidelijk beeld van de middellange termijn fluctuaties in het SPM-gehalte en dat werd modelmatig ook nog niet gereproduceerd. In een andere KPP studie voor de Vaargeul Holwerd-Ameland, is het binnen KRW-slib ontwikkelde model verder verfijnd en ingezet om bagger- en stortstrategieën door te rekenen. Aangezien de vaargeul nabij Holwerd een van de grootste baggervolumes in de Waddenzee genereert, is het erg inzichtelijk om de resultaten van deze modelstudie (Grasmeijer en Van Weerdenburg 2020) hier te beschouwen vanuit de eerder gestelde onderzoeksvraag over baggeren en storten.

Het effect van microfytobenthos is toegevoegd aan de modelformuleringen en onderzocht met een kleiner model van één bekken. De resultaten van deze exercitie geven deels antwoord op de onderzoeksvraag 1c over het effect van microfytobenthos.

Zoals in de beschrijving van het conceptuele model ook wordt aangegeven, kunnen op de langere termijn, orde decennia, morfologische veranderingen leiden tot veranderingen in SPM (vraag 2). Het effect van kwelders op de hydrodynamica (verkleining van de komberging) en SPM is onderzocht in de vorm van een maximale beheeringreep waarbij een vastelandskwelder volledig is

verwijderd. Het effect van een ander aanbod vanaf de Noordzee zal worden onderzocht door het model meerdere opeenvolgende jaren te laten simuleren.

Met het ingespeelde model is ook een inschatting gemaakt van de gemiddelde verblijftijd van slib in de Waddenzee en de dynamische buffers (vraag 3 en kennishiaat b).

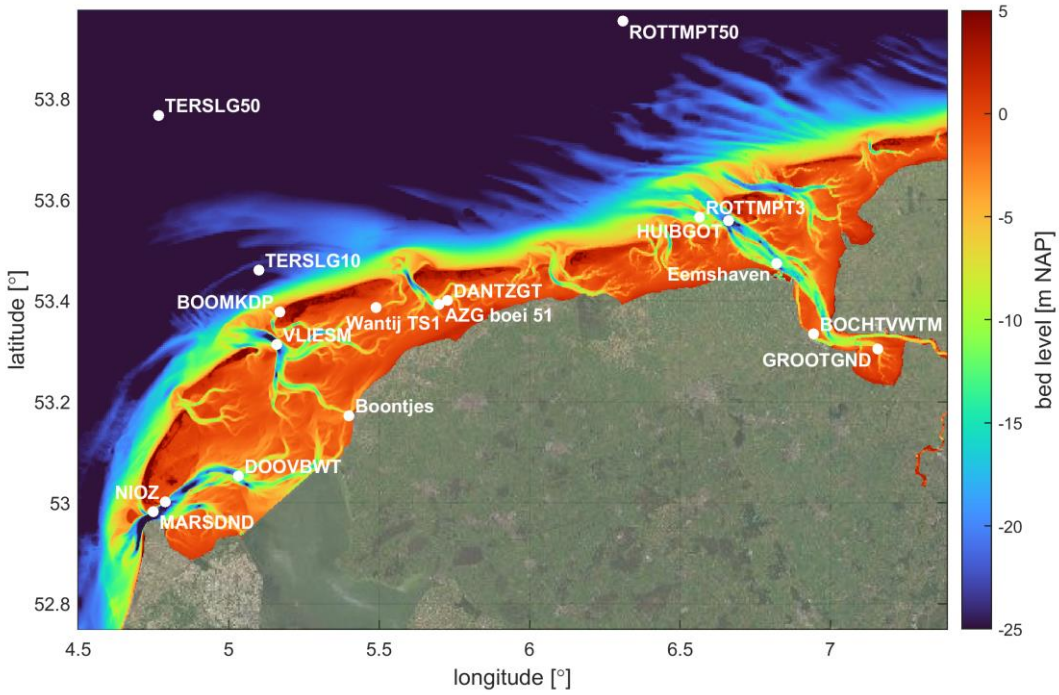
1.5 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt een zeer beknopte samenvatting gegeven van het Dutch Wadden Sea Model (DWSM) wat voor deze studie is ingezet. Voor een uitgebreidere beschrijving wordt verwezen naar het kalibratierapport (Vroom et al., 2020). In hoofdstuk 3 wordt de impact van verschillende fysische processen beschreven. In hoofdstuk 4 zal de maximale gevoeligheid van de slibdynamiek voor ingrepen inzichtelijk worden gemaakt en in hoofdstuk 5 zullen conclusies en aanbevelingen worden opgenomen.

2 Beknopte beschrijving numeriek model (DWSM)

De opzet en kalibratie van een numeriek model voor de slibdynamiek in de Nederlandse Waddenzee is beschreven door Vroom et al. (2020). Het model maakt gebruik van de DFLOW-Flexible Mesh software. Het modeldomein van dit model omvat de Waddenzee, het Eems-Dollard estuarium en het nabijgelegen deel van de Noordzee (zie Figuur 2.1). Het slibmodel gebruikt een rekenrooster met een maximale resolutie van 200 m x 200 m in het interessegebied en 10 verticale σ-lagen. De waterbeweging in het model wordt geforceerd met een waterstandsvariatie op de modelrand (inclusief het effect van wind op- en afzet). Daarnaast worden randvoorwaarden opgelegd voor de watertemperatuur, de saliniteit en de slibconcentraties. Meteorologische forcering is gebaseerd op HirLAM modelsimulaties door het KNMI.

Voor het modelleren van golfgedreven resuspensie wordt gebruik gemaakt van een strijklengteaanpak voor het berekenen van golfcondities. Op basis van die golfcondities wordt een bodemschuifspanning door golven bepaald, welke samen met de bodemschuifspanning door stroming de totale bodemschuifspanning vormt. De totale bodemschuifspanning wordt vervolgens gebruikt voor de resuspensie van sediment.



Figuur 2.1 Weergave van het ruimtelijke domein van DWSM en de gebruikte bodemhoogte in het slibmodel op basis van de meest actuele Vaklodingen data en de belangrijkste observatiestations.

De kalibratie van het slibmodel heeft geleid tot de modelinstellingen zoals die zijn opgenomen in Tabel 2.1. Bij de kalibratie is gebruik gemaakt van (i) periodiek gemeten concentraties Zwevende Stof (SPM) bij observatiepunten in het MWTL meetnet in de Waddenzee en in de Noordzee, (ii) tijdseries van de gemeten concentraties SPM bij Eemshaven en tijdseries van de troebelheid bij Boontjes en (iii) ruimtelijke patronen van slib in de bodem uit de Sedimentatlas.

Tabel 2.1 Instellingen van de erosie- en sedimentatieparameters van het slibmodel na kalibratie.

Slibeigenschap	**Fractie 1 (IM1)**	**Fractie 2 (IM2)**
Valsnelheid [mm s^{-1}]	1,5	0,4
Depositie-efficiëntie [-]	0,25	
Percentage van sedimentatie-flux naar bodemlaag S2 [-]	0,05	
Kritische schuifspanning voor erosie uit bodemlaag S1 [Pa]	0,10	
0^e orde erosiesnelheid van bodemlaag S1 [kg m^{-2} s^{-1}]	$6,9*10^{-5}$	
1^e orde erosiesnelheid van bodemlaag S1 [s^{-1}]	$5,8*10^{-6}$	
Kritische schuifspanning voor erosie uit bodemlaag S2 [Pa]	0,80	
Erosiesnelheid van bodemlaag S2 [kg m^{-2} s^{-1}]	$1,5 * 10^{-4}$	
Dikte van bodemlaag S2 [m]	0,10	

Voor meer details over de opzet van het model dat in deze studie wordt gebruikt en de geschiktheid om de slibdynamiek in de Waddenzee te modelleren wordt verwezen naar het kalibratierapport door Vroom et al. (2020).

3 Analyse fysische processen

3.1 Introductie

De seizoensdynamiek in zwevend stof in de referentiesimulatie kan als representatief worden gesteld voor de daadwerkelijk optredende seizoensfluctuaties in het SPM-gehalte (Vroom et al, 2020). De seizoensdynamiek in het model wordt voornamelijk gestuurd door (1) meteorologische condities, (2) dichtheidsgradiënten en (3) de randvoorwaarde voor slibconcentratie op de Noordzeeranden. Echter, (4) biologische invloeden, die vermoedelijk ook een reden zijn voor seizoensfluctuaties in het SPM-gehalte, ontbreken in de referentiesimulatie.

Paragrafen 3.2 en 3.3 bevatten analyses van (1) meteorologische condities, waarbij de eerste ingaat op het effect van golven en de laatste op de invloed van wind. Belangrijke processen m.b.t. (2) dichtheidsgradiënten zijn watertemperatuur, verticale menging en zoetwaterafvoer, welke respectievelijk worden behandeld in paraaf 3.4, 3.5 en 3.6. Paragraaf 3.7 gaat nader in op de randvoorwaarden voor de slibconcentratie op de Noordzeeranden (3). Het effect van biologische invloeden (4) komt in paragraaf 3.8 aan bod. Vervolgens wordt het effect van baggeren en verspreiden beschreven in paragraaf 3.9. Tot slot wordt de verblijftijd van slib in de Waddenzee en de grootte van dynamische buffers van slib geanalyseerd in paragraaf 3.10 om meer grip te krijgen op meerjarige variaties van het SPM-gehalte.

3.2 Invloed van golven op seizoensfluctuaties SPM gehalte

In deze paragraaf wordt nader ingegaan op het effect van golven op de seizoensfluctuaties in SPM. Om de modelrespons op golven beter te begrijpen en het belang van verschillende aspecten te kunnen afschatten, is er een aanvullende analyse gedaan op de referentiesom. Er zijn meerdere hypothesen over de manier waarop golven kunnen bijdragen aan de seizoensdynamiek (en de SPM fluctuaties tussen verschillende jaren):

- Over het algemeen treden er in de winter **meer stormen** op dan in de zomer, wat een verhoogde SPM in de winter tot gevolg kan hebben. Als stormen het dominante mechanisme hiervoor zijn, betekent dit dat de resuspensie van relatief grote hoeveelheden slib vanuit de bodem relatief lang aanwezig blijven in de waterkolom en beschikbaar blijven voor resuspensie vanuit de bodem in de periode tussen stormen in.
- **Bovengemiddeld hoge golven in de winter** (stormen niet meegerekend) ten opzichte van het jaargemiddelde leiden tot verhoogde SPM in de winter. Dit betekent dat incidentele stormen niet zo belangrijk zijn, maar meer de gemiddelde golfcondities per seizoen. Het na-ijleffect van stormen is dan dus minder belangrijk.
- **Ondergemiddeld lage golven in de zomer** ten opzichte van het jaargemiddelde leiden tot lage SPM in de zomer: Aangezien er geen golfpropagatiemodel (zoals SWAN) gebruikt is waarbij golven van elders zich binnen het modeldomein voortplanten, zijn de golven in het model erg gevoelig voor wind. Bij lage windsnelheden wordt de golfhoogte al snel erg laag (of zelfs nul). Dit is een mogelijke oorzaak voor het lage SPM-gehalte in de zomer en draagt daarmee ook bij aan een relatief sterke seizoensdynamiek in het model (zelfs bij afwezige biologische invloeden). Aangezien er momenteel geen gekoppeld golfpropagatiemodel beschikbaar is, kan de invloed van dit proces moeilijk worden afgeschat.

3.2.1 Onderscheid effect van stormen en normale condities

Om te onderzoeken hoe golven bijdragen aan SPM fluctuaties binnen het jaar en tussen de jaren, maken we een onderscheid tussen het effect van stormen en ‘normale’ condities. De gemiddelde golfhoogte buiten stormen is bepaald per seizoen, waarbij de hoogste 5% golven gedurende het

jaar als stormen zijn gedefinieerd[2] (en dus buiten beschouwing zijn gelaten). Hieruit bleek dat de gemiddelde golfhoogte op de meeste locaties aanzienlijk varieert gedurende het jaar. Voor de MWTL stations in de Waddenzee (BOOMKDP, DANTZGT, DOOVBWT, HUIBGOT, MARSDND en VLIESM) is een significant verschil tussen de seizoenen waarneembaar, waarbij de gemiddelde golfhoogte met name in het najaar zo'n 30-50% hoger is dan in de rest van het jaar (zie Tabel 3.1). Bij de stations in de Eems (BOCHTVWTM, GROOTGND) is het verschil in golfhoogte tussen de seizoenen verwaarloosbaar, mogelijk als gevolg van een kleinere strijklengte. In de Waddenzee is dus sprake van een duidelijk seizoensverschil in de *dagelijkse* golfcondities, dat ook direct effect heeft op het SPM-gehalte.

Tabel 3.1: Gemiddelde dagelijkse golfhoogte op MWTL stations per kwartaal, waarbij stormen niet zijn meegenomen in de bepaling van het gemiddelde

	Gemiddelde golfhoogte (excl. stormen) [m]			
Station	**Q1 2017**	**Q2 2017**	**Q3 2017**	**Q4 2017**
BOCHTVWTM	0.10	0.10	0.09	0.11
BOOMKDP	0.37	0.39	0.39	0.62
DANTZGT	0.29	0.27	0.27	0.45
DOOVBWT	0.53	0.44	0.45	0.71
GROOTGND	0.14	0.14	0.12	0.18
HUIBGOT	0.63	0.81	0.69	1.20
MARDND	0.49	0.41	0.39	0.60
VLIESM	0.61	0.67	0.65	1.25

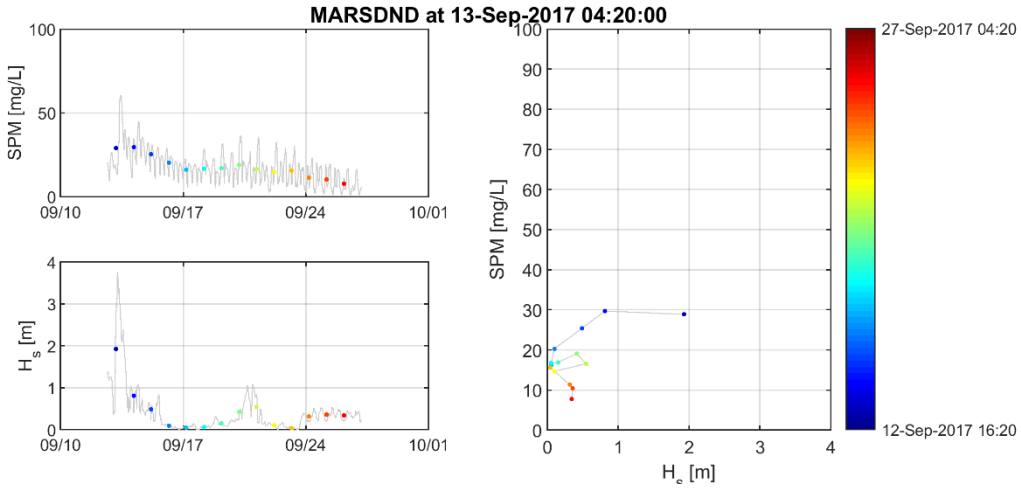
3.2.2 Effect van stormen op SPM

Daarnaast is er een analyse gedaan van het effect van stormen en de tijdschaal waarop golven en SPM dientengevolge verhoogd zijn. Door op een tijdschaal van twee weken de dagelijkse gemiddelde waarde van de golfhoogte uit te zetten tegen de concentratie op observatiepunten in het model, kunnen we dit effect inzichtelijk maken. De hypothese is dat op bepaalde momenten een 'naijl-effect' te zien is in het SPM-gehalte: de golfhoogte piekt vroeg en kort, waarna het SPM-gehalte nog gedurende langere tijd een verhoogde waarde heeft. Dit effect vertoont kenmerken van een hysterese-effect, waarbij het verband tussen oorzaak en gevolg niet alleen afhangt van de grootte van het signaal van de oorzaak, maar ook van de richting het signaal (voor of na de storm).

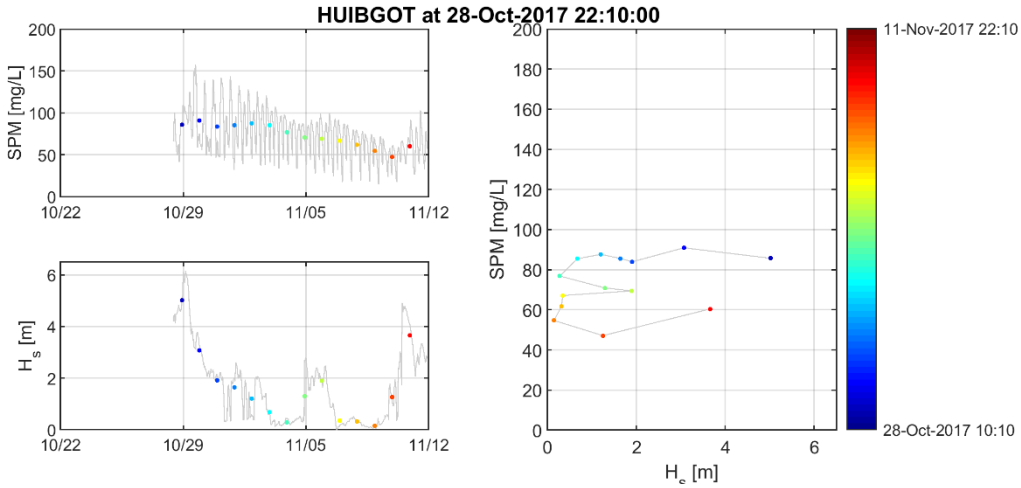
Als voorbeeld worden hier een storm op 13 september op station MARSDND (Figuur 3.1) en een storm op 28 oktober op stations HUIBGOT (Figuur 3.2) en Boontjes (Figuur 3.3) uitgelicht. Het 'naijl-effect' lijkt duidelijk aanwezig op stations MARSDND en HUIBGOT, waarbij de golfhoogte eerst piekt en het SPM-gehalte daarna langere tijd een verhoogde waarde heeft (herkenbaar aan de niet-lineaire respons in de rechterpanelen). Uit Figuur 3.3 blijkt echter dat het SPM-gehalte na de storm van 28 oktober (dezelfde storm als hierboven geanalyseerd voor station HUIBGOT) bij station Boontjes vrij snel, binnen 48 uur, weer terugzakt naar het niveau van voor de storm (herkenbaar aan de lineaire respons in het rechterpaneel). Ditzelfde gedrag is kenmerkend voor andere stations die dichterbij de vastelandskust liggen. Uit analyse van andere observatiepunten blijkt het 'naijl-effect' duidelijk aanwezig te zijn op een aantal observatiepunten (bijvoorbeeld MARSDND, DOOVBWT, DANTZGT, HUIBGOT), op andere stations is dit effect minder duidelijk (VLIESM, GROOTGND) of speelt het geen rol (Boontjes, BOOMKDP, EEMSHVN, BOCHTVWTM).

[2] De officiële definitie van storm is bij een windsnelheid van 24,5 m/s of hoger. Dergelijke windsnelheden treden echter alleen op de Noordzee op en niet lokaal bij stations in de Waddenzee. De weggefilterde 5% hoogste golven is daarmee een schatting van de stormen.

Bovendien is het ‘naijl-effect’ voor bepaalde stormen duidelijk waarneembaar, zoals bij MARSDND (Figuur 3.1) en bij HUIBGOT (Figuur 3.2), maar voor andere stormen minder duidelijk, bijvoorbeeld doordat er alweer een nieuwe storm opkomt of omdat SPM een piek vertoont zonder dat de golfhoogte (lokaal) groot is. Dit laatste wijst op een piek in SPM vanwege advectief transport, in plaats van lokale resuspensie van slib. De invloed van een storm uit het zuidwesten (medio september) lijkt hierin niet wezenlijk te verschillen van een storm uit het noordwesten (begin oktober). Het belangrijkste verschil is dat de golfhoogte na de storm in oktober alweer sneller toeneemt (vermoedelijk doordat bij toeval een nieuwe storm optreedt), waardoor het nog ongeconsolideerde materiaal opnieuw in suspensie wordt gebracht (in het model zit er dan dus nog vrij veel slib in de makkelijk erodeerbare bodemlaag S1, wat pas na meerdere getijcycli weer langzaam in de moeilijker erodeerbare S2-laag wordt gebracht).

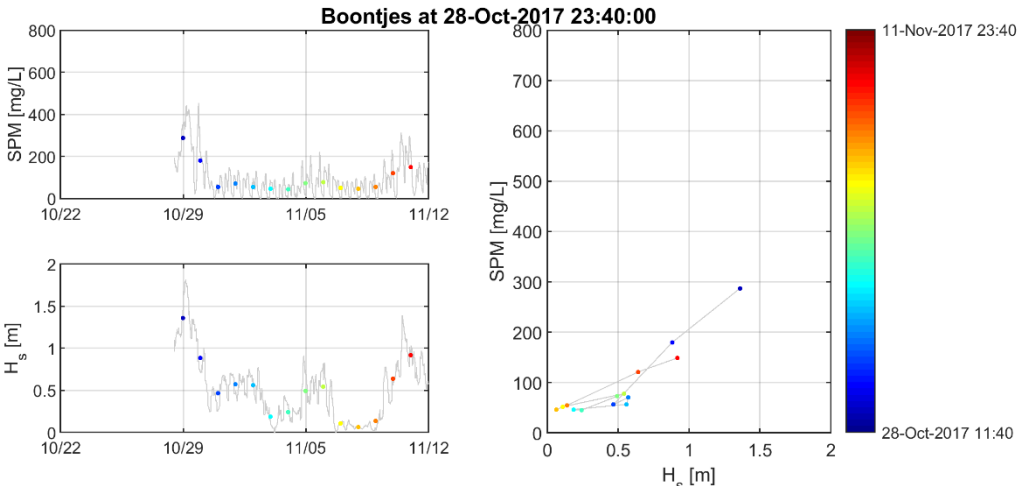


Figuur 3.1 Tijdseries van gesimuleerde SPM-gehalte (linksboven) en goflhoogte (linksonder) bij station MARSDND op een tijdschaal van twee weken in september 2017. Het rechterpaneel toont het verloop van de dagelijkse gemiddelde waardes van de golfhoogte en van het SPM-gehalte als scatterplot.



Figuur 3.2 Tijdseries van gesimuleerde SPM-gehalte (linksboven) en golfhoogte (linksonder) bij station HUIBGOT op een tijdschaal van twee weken in oktober 2017. Het rechterpaneel toont het verloop van de dagelijkse gemiddelde waardes van de golfhoogte en van het SPM-gehalte als scatterplot

.



Figuur 3.3 Tijdseries van gesimuleerde SPM-gehalte (linksboven) en golfhoogte (linksonder) bij station Boontjes op een tijdschaal van twee weken in oktober 2017. Het rechterpaneel toont het verloop van de dagelijkse gemiddelde waardes van de golfhoogte en van het SPM-gehalte als scatterplot.

De verschillen van het 'naijl-effect' per station lijken samen te hangen met de locatie van de stations in combinatie met de windrichting en met de lokale waterdiepte. Het valt op dat de locaties waar het 'naijl-effect' duidelijk uit de modelresultaten naar voren komt dichter bij de zeegaten liggen, terwijl het na-ijleffect op locaties verder landwaarts niet duidelijk aanwezig is. Individuele stormen lijken voor deze stations dus niet de drijvende kracht achter langdurige verhoging van het SPM. Het verschillende effect van de afzonderlijke stormen lijkt vooral gestuurd te worden door de meteorologische condities (bijv. opeenvolging van meerdere stormen).

Uit bovenstaande analyse blijkt dat in het model het na-ijl effect van sommige stormen aanwezig is en een paar dagen een verhoogde SPM concentratie geeft, en dat dit voornamelijk geldt voor de stations nabij de zeegaten. Vanwege afwezigheid van hoogfrequente SPM metingen, kan geen vergelijking tussen model en meting worden gemaakt onder en vlak na stormcondities. Omdat tijdens de najaars- (en winter)periode ook de lagere golven (niet stormcondities) gemiddeld hoger zijn (zie sectie 3.2.1), leidt dit ook tot hogere (getijgemiddelde) SPM. Waarschijnlijk is dit effect belangrijker dan de incidentele stormen, met name op locaties dichter bij de vastelandskust. Dit sluit aan bij observaties van het slibmotor project (Colosimo et al., 2020), die hebben aangetoond dat het SPM-gehalte lokaal sterk kan toenemen bij kleine waterdieptes en gemiddelde windsterkte.

3.3 Meteorologie

In deze paragraaf worden variaties in SPM en in slibtransporten besproken aan de hand van de windcondities (d.w.z. windsnelheid en windrichting).

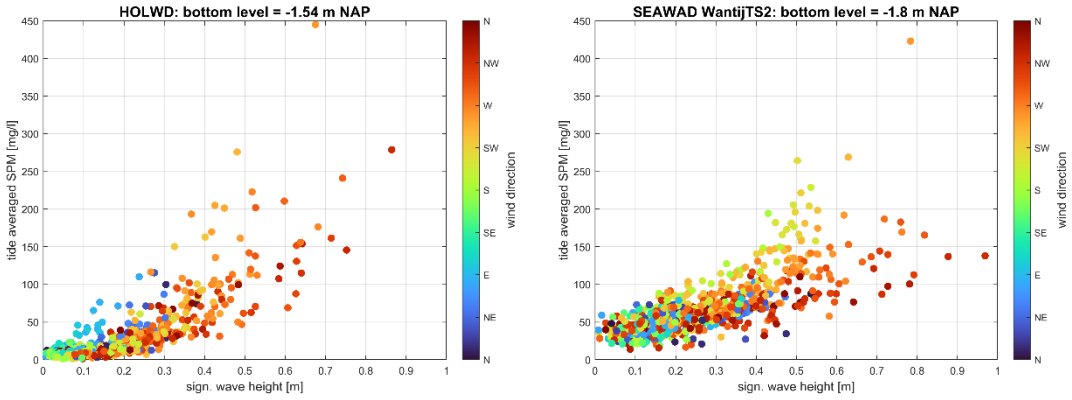
Het numerieke model is gekalibreerd met bodemschuifspanningen die veroorzaakt worden door (getij)stroming en golven. Als het hard waait treden ook hoge golven, wat leidt tot hoge bodemschuifspanningen en relatief veel resuspensie. Als we alleen naar het effect van wind-gedreven residuele stroming willen kijken, zouden we de golf-gedreven resuspensie eigenlijk uit moeten zetten. Echter, zonder golven is er te weinig resuspensie op ondiepe delen, waardoor de slibtransporten erg laag zijn en de slibverdeling in het model niet meer klopt met de hydrodynamische forcering. De golven uitzetten om het individuele effect van wind-gedreven residuele stroming te bekijken is dus niet mogelijk. Het effect van windsnelheid is dus altijd gekoppeld aan de golfhoogte. Wel is het zo, dat bij een bepaalde richting op een bepaalde locatie lagere golven optreden door een beperkte strijklengte, terwijl er wel significante wind-gedreven stroming optreedt. Verschillende effecten bij wind uit een andere richting kan daarmee toch inzicht

geven in wind-gedreven stroming en advectief transport van slib dat elders opgewoeld is van de bodem.

In Paragraaf 3.3.1 kijken we naar lokale variaties in SPM-waarden. In Paragraaf 3.3.2 wordt het effect van meteorologische condities op de slibbalans van de Waddenzee besproken. In Paragraaf 3.3.3 volgt het effect van de meteorologische forcering op maandgemiddelde SPM.

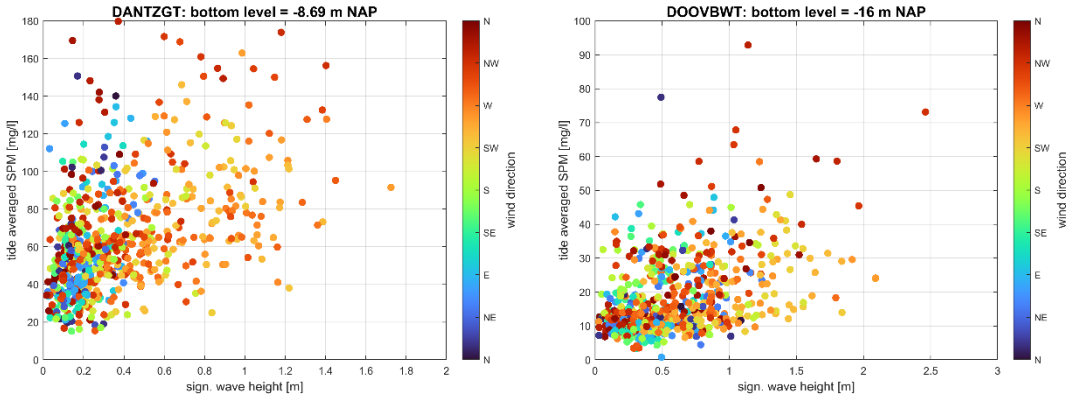
3.3.1 Lokale variaties in SPM per getijperiode

Op ondiepe locaties, zoals bij Holwerd (zie Figuur 3.4), zijn het niet alleen de golven die leiden tot hoge SPM waarden. Hoge golven tijdens wind uit het westen (SW/W/NW) leiden tot hoge SPM waarden. Wind uit het oosten leidt echter niet tot hoge golven, maar wel tot relatief hoge SPM waarden bij Holwerd. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat wind-gedreven stroming vanaf het wantij van Ameland over ondiepe slibrijke gebieden zorgt voor resuspensie van slib en advectief transport van slib richting Holwerd. Op een ander observatiepunt, op het wantij van Terschelling (zie Figuur 3.4), treden de hoogste SPM waarden op bij wind uit het zuidwesten. Dit is niet de richting waarbij de hoogste golven optreden. Bij wind uit het noorden tot noordwesten treden namelijk de hoogste golven op. Ook hier lijkt wind-gedreven stroming vanaf het wantij (over slibrijke platen) dus bij te dragen aan hoge SPM waarden.



Figuur 3.4 Relatie tussen de gemiddelde SPM per M2 getijperiode (verticale as), de significante golfhoogte (horizontale as) en de windrichting (kleurenschaal) in modelresultaten voor observatiepunten bij Holwerd (links) en op het wantij van Terschelling (rechts).

Op diepere locaties, zoals bij Dantziggat en Doovebalg West (zie Figuur 3.5), hebben windcondities en golven een minder duidelijk effect op SPM waarden. Variaties in SPM worden daar minder dominant door de golfhoogte bepaald, maar zijn meer een samenspel van verschillende processen zoals o.a. golfhoogte, getij- en wind-gedreven stroming. Dit sluit aan bij de invloed van stormen, die nabij de zeegaten/diepe gebieden een na-ijleffect laat zien, dus een minder duidelijke relatie tussen golfhoogte en SPM. Dit na-ijleffect kwam op ondiepere stations minder duidelijk naar voren, terwijl de relatie tussen SPM, golfhoogte en windrichting daar juist sterker is.



Figuur 3.5 Relatie tussen de gemiddelde SPM per M2 getijperiode (verticale as), de significante golfhoogte (horizontale as) en de windrichting (kleurenschaal) in modelresultaten voor observatiepunten bij Dantziggat (links) en Doovebalg West (rechts).

3.3.2 Variaties in de slibbalans van de Waddenzee

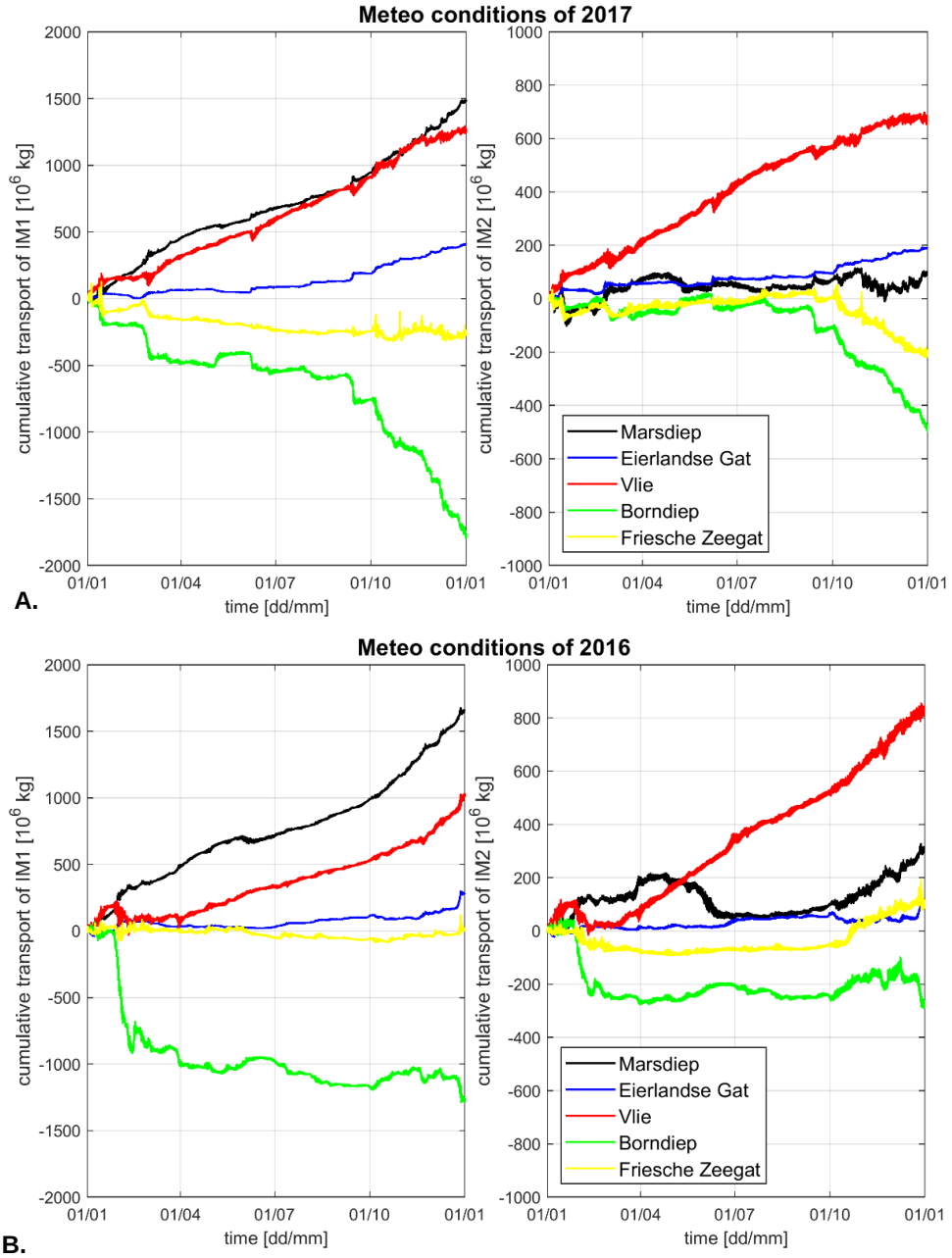
Het slibtransport door de zeegaten is in het kalibratierapport (Vroom et al, 2020) al toegelicht als maat voor het dynamisch evenwicht van de hoeveelheid slib in de Waddenzee. Alle modelforceringen, en zo ook de meteorologische condities, zijn daarbij gebaseerd op het jaar 2017. De modelberekeningen laten een netto import van slib zien via de zeegaten Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie en een netto export via de zeegaten Borndiep en Friesche Zeegat (zie Figuur 3.6A en Tabel 3.2). Desalniettemin treedt wel sedimentatie in alle bekkens op, omdat er ook grote transporten over de wantijen optreden. In de tijdseries die zijn weergegeven in Figuur 3.6 is een seizoensvariatie zichtbaar, waarbij residuele transporten door de zeegaten gewoonlijk groter zijn in de herfst- en wintermaanden.

Om variaties tussen jaren te bekijken is een modelsimulatie gedraaid waarbij de meteorologische forcering uit 2016 is gebruikt. De enige verschillen met de modelsimulatie die als referentie wordt gebruikt zijn dan de opgelegde velden voor windsnelheid, windrichting en atmosferische druk. Figuur 3.6B laat de resultaten van deze modelsimulatie zien wat betreft de cumulatieve transporten door de zeegaten. Tabel 3.2 toont de verschillen ten gevolge van de andere meteorologische forcering.

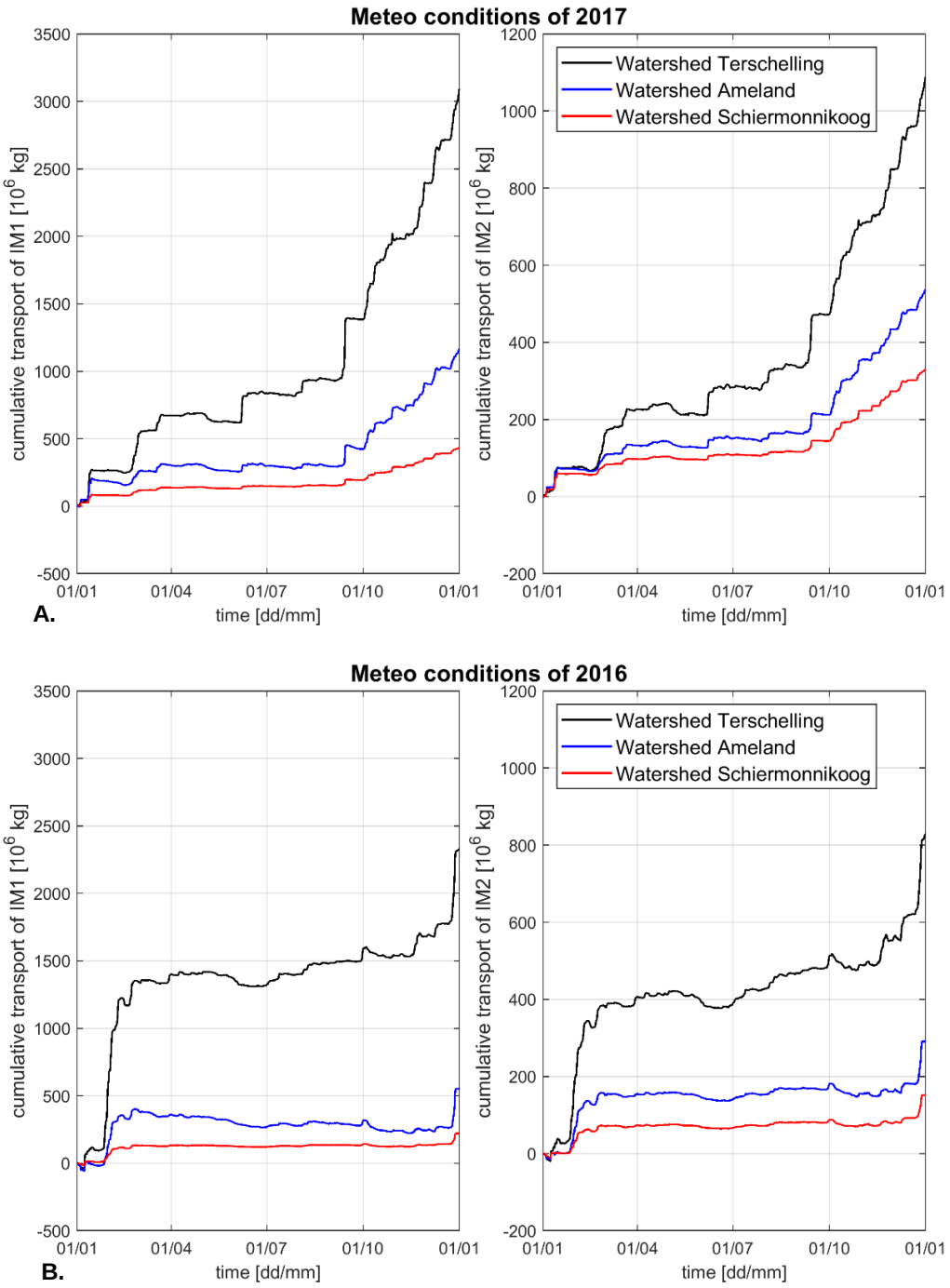
Met de meteorologische forcering uit 2016 veranderen de residuele transporten significant. Zo is de import van slib door het Marsdiep groter en de import door het Eierlandse Gat en het Vlie is kleiner. De export door het Amelander Zeegat wordt kleiner en de export door het Friesche Zeegat verandert in een import. In 2017 kwam de wind relatief vaak uit het westen (zie Figuur 3.9). Als dit leidt tot een andere saliniteitsverdeling kan dit leiden tot minder import van slib in 2017 t.o.v. 2016. Daarnaast verklaart een groot oostwaarts transport over het wantij in 2017 (zie Figuur 3.7) mogelijk het export door het Borndiep en het Friesche Zeegat. Met de meteorologische forcering uit 2016 is het oostwaartse transport over het wantij kleiner, en zo ook de export door de zeegaten Borndiep en Friesche Zeegat (d.w.z. Friesche Zeegat wordt importerend). De meteorologische forcering leidt dus tot grote verschillen in netto sedimentatie in de bekkens, van 0,81 miljoen ton/jaar voor de gehele Waddenzee tot 2,5 miljoen ton/jaar voor 2016 (Tabel 3.3). Daarmee ontstaan er (dynamische) buffers van slib (zie ook paragraaf 3.10.1). Op termijn van enkele jaren kan dit leiden tot verschillen in SPM, omdat er meer of minder slib beschikbaar is voor resuspensie. Dit is een belangrijke bevinding met betrekking tot de variatie in SPM op de middellange termijn (jaren).

Naast het totale transport over een jaar verandert ook het verloop van het residuele transport in het jaar. Dit is het duidelijkste zichtbaar in Figuur 3.6 voor het Borndiep: met meteo-forcering uit 2017 vindt het grootste deel van de export in het najaar (oktober, november en december) plaats, terwijl dat met de meteorologische forcering uit 2016 in het begin van het jaar is (januari en februari). Op

basis van de maandgemiddelde windcondities (zie Figuur 3.10) blijkt dat de gemiddelde windsnelheid in de eerste maanden van 2016 en in het najaar van 2017 relatief hoog is. De gemiddelde windrichting was in deze maanden grofweg gelijk aan de jaargemiddelde windrichting, namelijk west-zuidwest. De hoge windsnelheden dragen dus bij aan grote resttransporten en variaties in de windcondities verklaren voor een groot deel de variaties in het verloop van het residuele transport in het jaar. Indien we jaargemiddeldes of totalen bekijken, betekent dat dat het ook belangrijk is wanneer de periodes met de grote exporten optreden: in het begin van het jaar (2016) of aan het einde van het jaar. Een analyse van de windkarakteristieken gekoppeld met de residuele transporten kan meer inzicht geven welke windcondities of welk jaarklimaat nu precies leidt tot export (welke combinatie van windsterkte, -richting en volgorde van condities).



Figuur 3.6 Tijdseries van het gemodelleerde cumulatieve slibtransport door de zeegaten (slibfracties IM1 (links) en IM2 (rechts)) met verschillende meteorologische forceringen; 2017 (A. boven) en 2016 (B. onder).



Figuur 3.7 Tijdseries van het gemodelleerde cumulatieve slibtransport over de wantij (slibfracties IM1 (links) en IM2 (rechts)) met verschillende meteorologische forceringen; 2017 (A. boven) en 2016 (B. onder).

Tabel 3.2 Cumulatief slibtransport door zeegaten en over de wantijen voor twee modelsimulaties waarbij meteorologische condities van een verschillend jaar worden gebruikt.

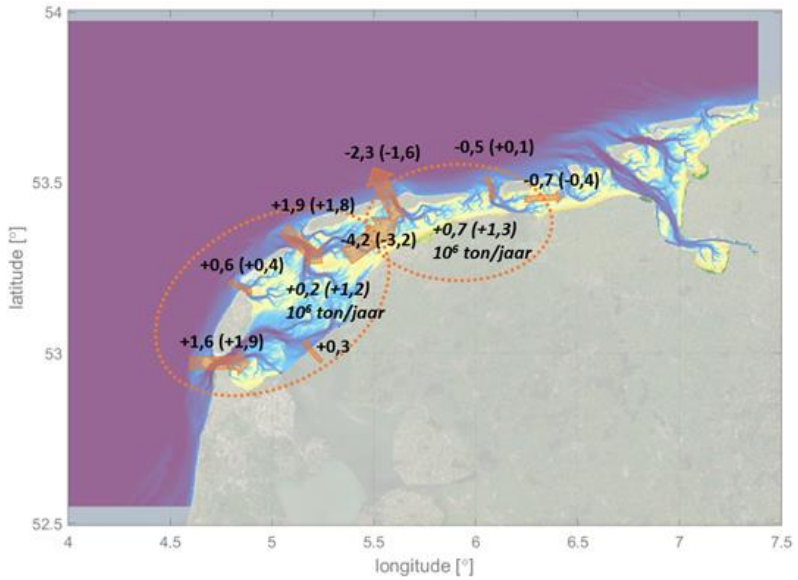
Cumulatief slibtransport door zeegaten en over wantijen in een jaar (in miljoen ton). Positief naar binnen (zeegaten) of naar het oosten (wantijen).			
	Meteo 2017	Meteo 2016	Verschil (2016 – 2017)
Marsdiep	+1,57	+1,9	+0,3 = 19%
Eierlandse Gat	+0,60	+0,4	-0,2 = 33%
Vlie	+1,89	+1,8	-0,1 = 5%
Borndiep	-2,29	-1,6	+0,7 = 30%
Friesche Zeegat	-0,49	+0,1	+0,6 = 120%
Wantij Terschelling*	*-4,18*	*-3,2*	*+1 = 24%*
Wantij Ameland*	*-1,70*	*-0,8*	*+0,9 = 53%*
Wantij Schiermonnikoog	-0,77	-0,4	+0,3 = 43%
Via zoetwaterafvoer	+0,3	+0,3	n.v.t.
TOTAAL de Waddenzee in	**+0,81**	**+2,5**	**+1,6 = 178%**

* niet gebruikt in het totaal.

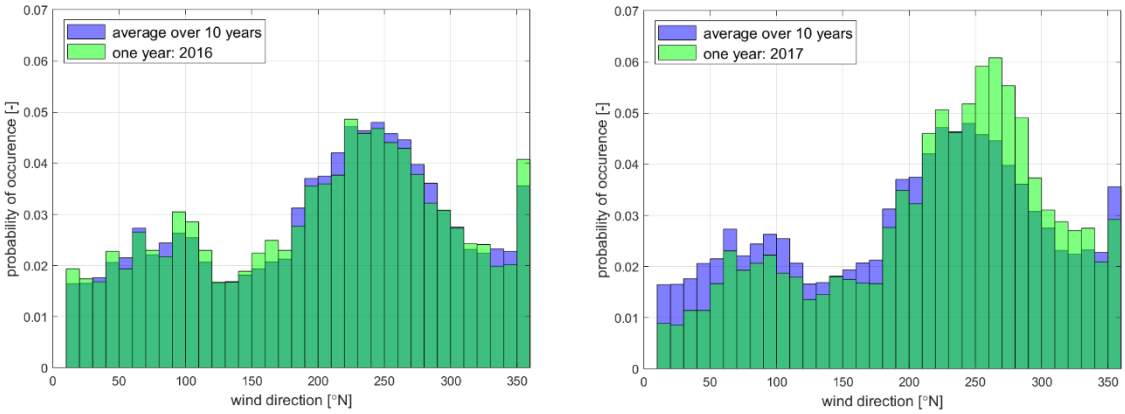
Tabel 3.3 Sedimentatie in de bekkens voor twee modelsimulaties waarbij meteorologische condities van een verschillend jaar worden gebruikt.

Netto sedimentatie in bekkens (in miljoen ton).			
	Meteo 2017	Meteo 2016	Verschil (2016 – 2017)
Marsdiep-Vlie-Eierlandse Gat*	+0,2	+1,2	+1 = 500%
Borndiep	+0,2	+0,8	+0,6 = 333%
Friesche Zeegat	+0,5	+0,5	+0 = 0%
TOTAAL	+0,9	+2,5	+1,6 = 178%

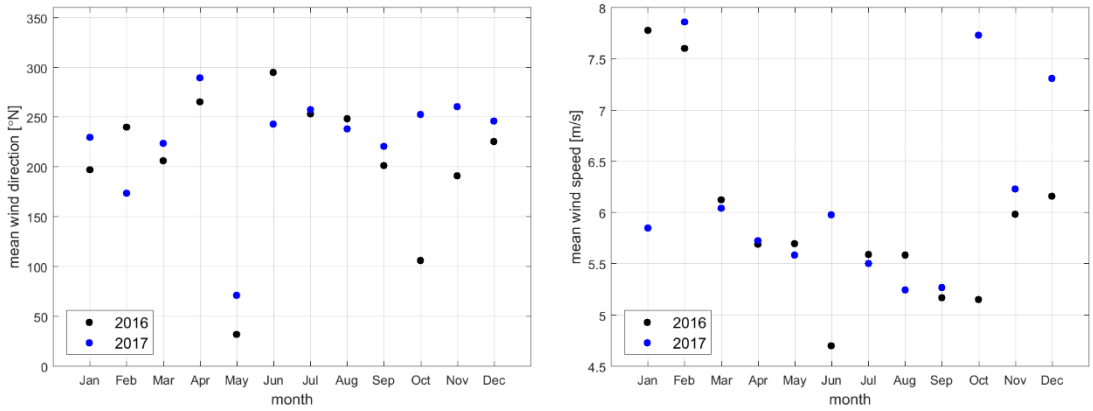
* Voor deze bekkens zijn de transporten over de wantijen niet bepaald, vanwege onduidelijkheid over de positie van het wantij tussen het Marsdiep en Vlie.



Figuur 3.8 Ruimtelijke weergave van het gemodelleerde cumulatieve slibtransport door de zeegaten



Figuur 3.9 Histogram van de gemeten windrichting bij Hoorn Terschelling; gemiddeld in de periode 2008-2017 (blauw) en voor 2016 (links) en 2017 (rechts) in groen.

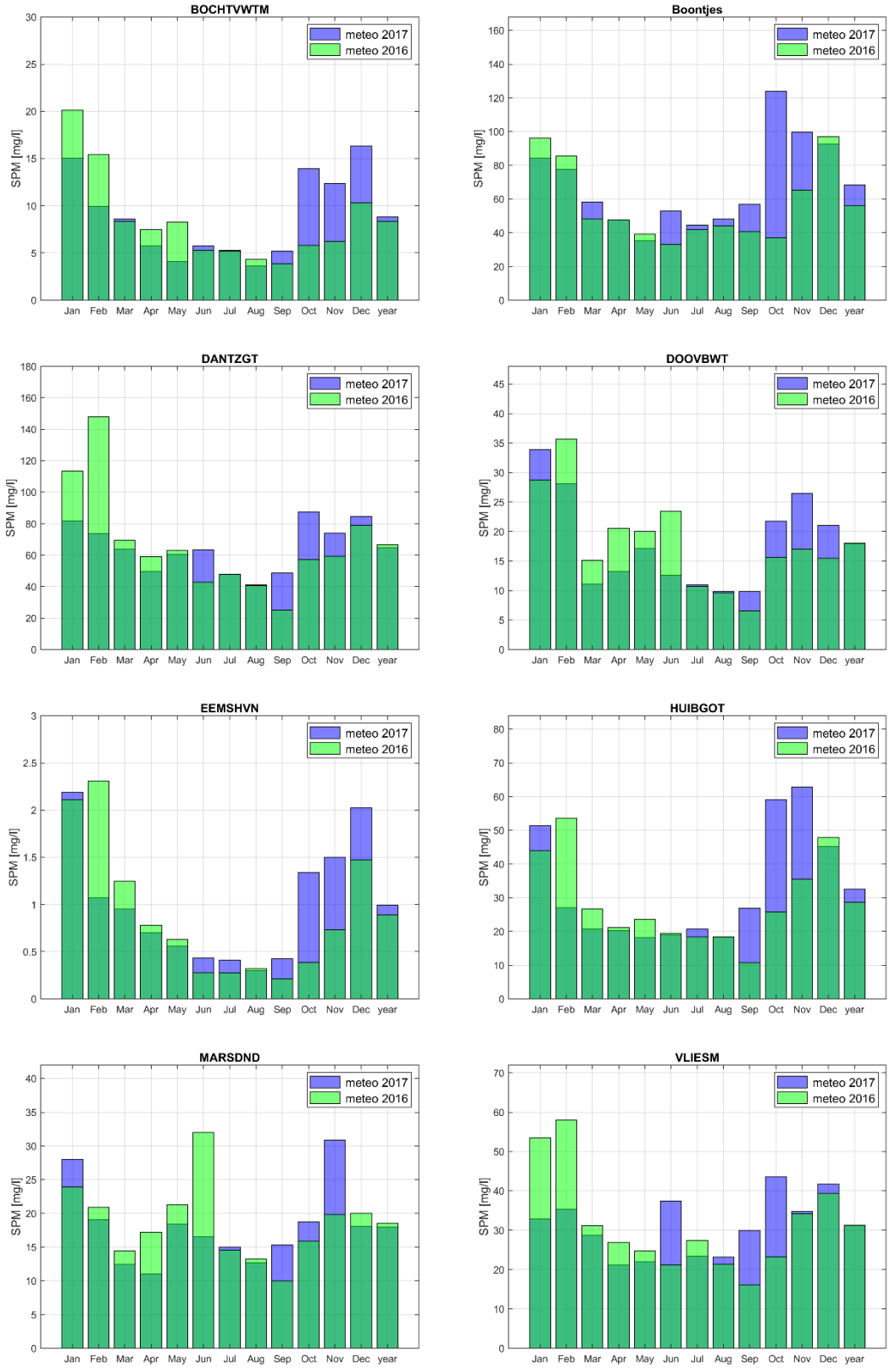


Figuur 3.10 Maandgemiddelde windcondities bij Hoorn Terschelling in 2016 en 2017: richting van de gemiddelde windvector (links) en gemiddelde windsnelheid (rechts).

3.3.3 Variaties in SPM door verschillende meteorologische condities en golven

De meteorologische condities en gekoppelde golven leiden ook tot andere SPM waarden bij de MWTL stations in de Waddenzee en bij Boontjes (Figuur 3.11). De jaargemiddelde SPM-waarde verandert door de andere forcering tot 18% voor deze acht stations. Het verloop van de SPM over het jaar is erg verschillend; door de meteorologische forcering van 2016 te gebruiken nemen SPM waarden in het voorjaar (februari tot mei) toe en in het najaar (september tot november) af. Dit sluit grotendeels aan bij variaties in de maandgemiddelde windcondities (zie Figuur 3.10).

Variaties in de meteorologische condities leiden dus tot variaties in de jaargemiddelde SPM waarden en tot variaties in het verloop van de SPM waarden in een bepaald jaar. Het is opvallend dat de maand tot maand variaties over het jaar vrijwel uitmiddelen voor de meeste stations. Echter, voor de residuele transporten geldt dit dus niet en slibsedimentatie in de bekkens. Dit komt doordat voor de residuele transporten niet alleen de resuspensie van belang is, maar ook de reststroming.

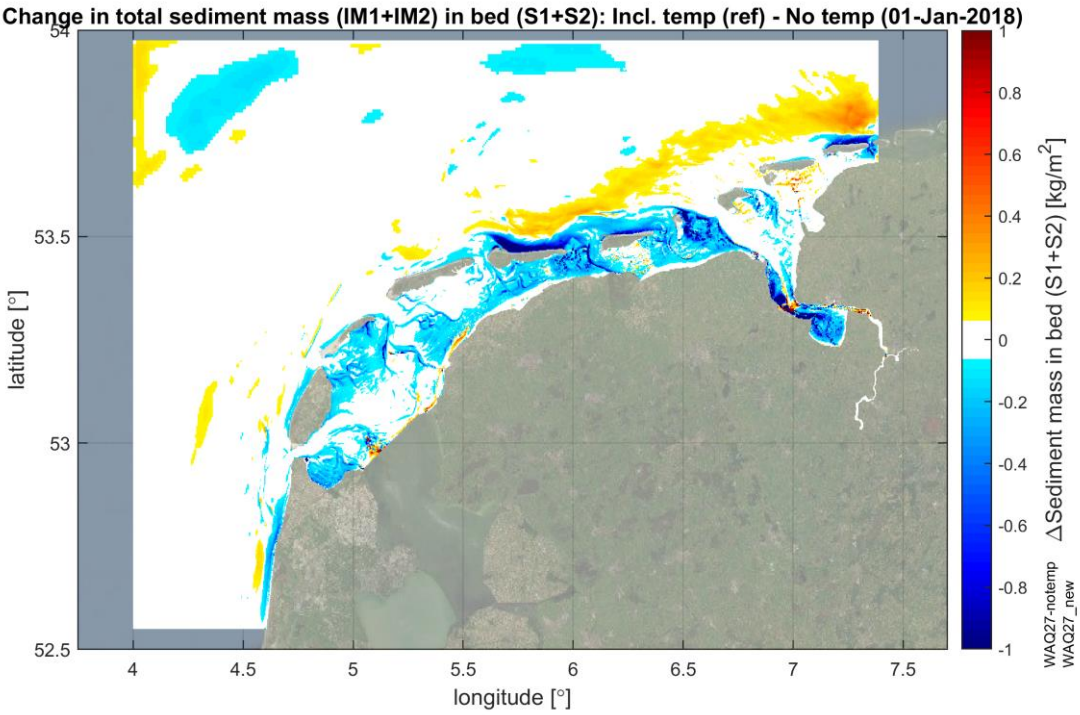


Figuur 3.11 Maand- en jaargemiddelde SPM nabij het wateroppervlak bij acht MWTL-stations en bij Boontjes voor modelsimulaties met meteorologische condities uit 2017 en 2016.

3.4 Watertemperatuur

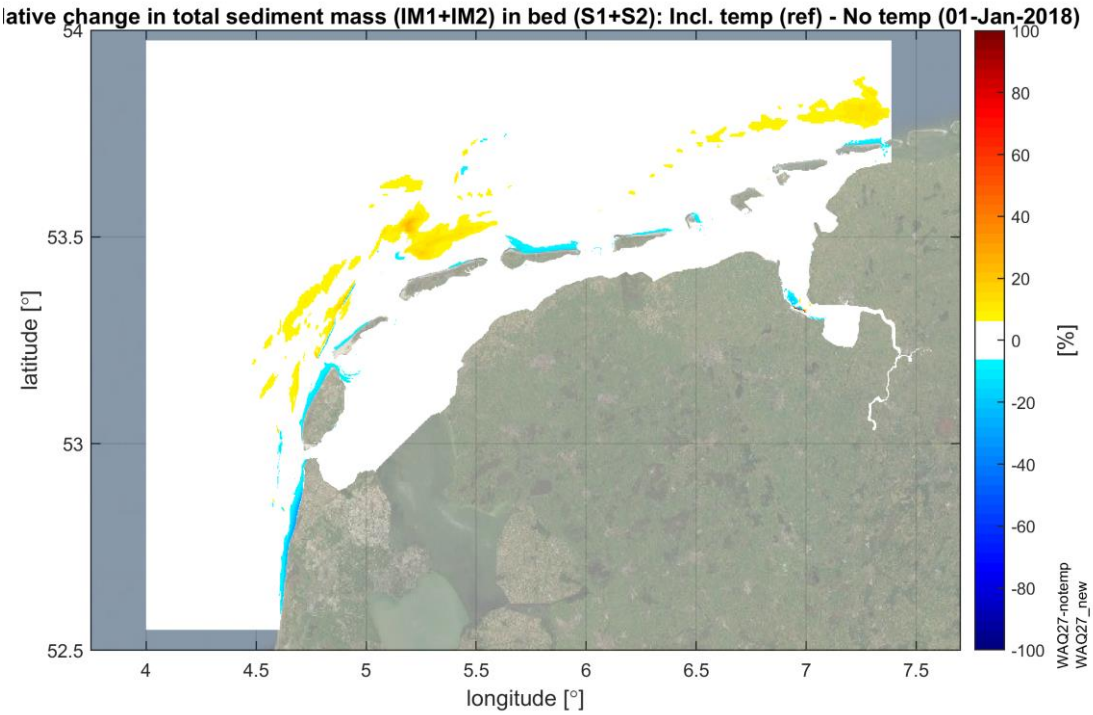
In het model is de valsnelheid van het slib niet afhankelijk van de watertemperatuur. De watertemperatuur heeft wel invloed op de dichtheid en viscositeit van het water, waarbij het eerste proces dominant is. Het effect van de watertemperatuur op het slibgehalte in de bodem is vooral van belang in de ondiepere delen van de Waddenzee (Figuur 3.12), waar de bodem iets minder slibrijk wordt door de watertemperatuur. Echter, de verschillen betreffen hele kleine massa's, die relatief gezien verwaarloosbaar zijn (Figuur 3.13).[3]

Het effect van watertemperatuur op het SPM gehalte nabij de wateroppervlakte en de seizoensafhankelijkheid is ook beperkt, en het grootste op de Noordzee (Figuur 3.14). Hier leidt temperatuur stratificatie en samenhangende residuele stroming tot een grotere seizoensafhankelijkheid in het SPM.

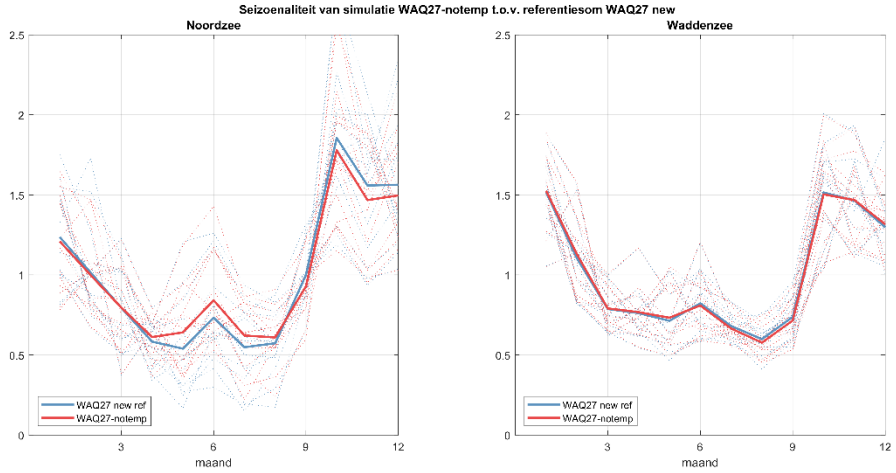


Figuur 3.12 Effect van watertemperatuur op de hoeveelheid slib in de bodem na een jaar

[3] Het meenemen van de watertemperatuur verlengt de rekentijd met ca. 3%, wat klein genoeg is om het proces mee te laten lopen.



Figuur 3.13 Relatief effect van watertemperatuur op de hoeveelheid slib in de bodem na een jaar (genormaliseerd met de hoeveelheid slib in de bodem in de som zonder temperatuur).



Figuur 3.14 Genormaliseerde SPM per maand om seizoensvariatie te tonen voor de referentiesimulatie en de simulatie zonder temperatuur.

3.5 Verticale menging

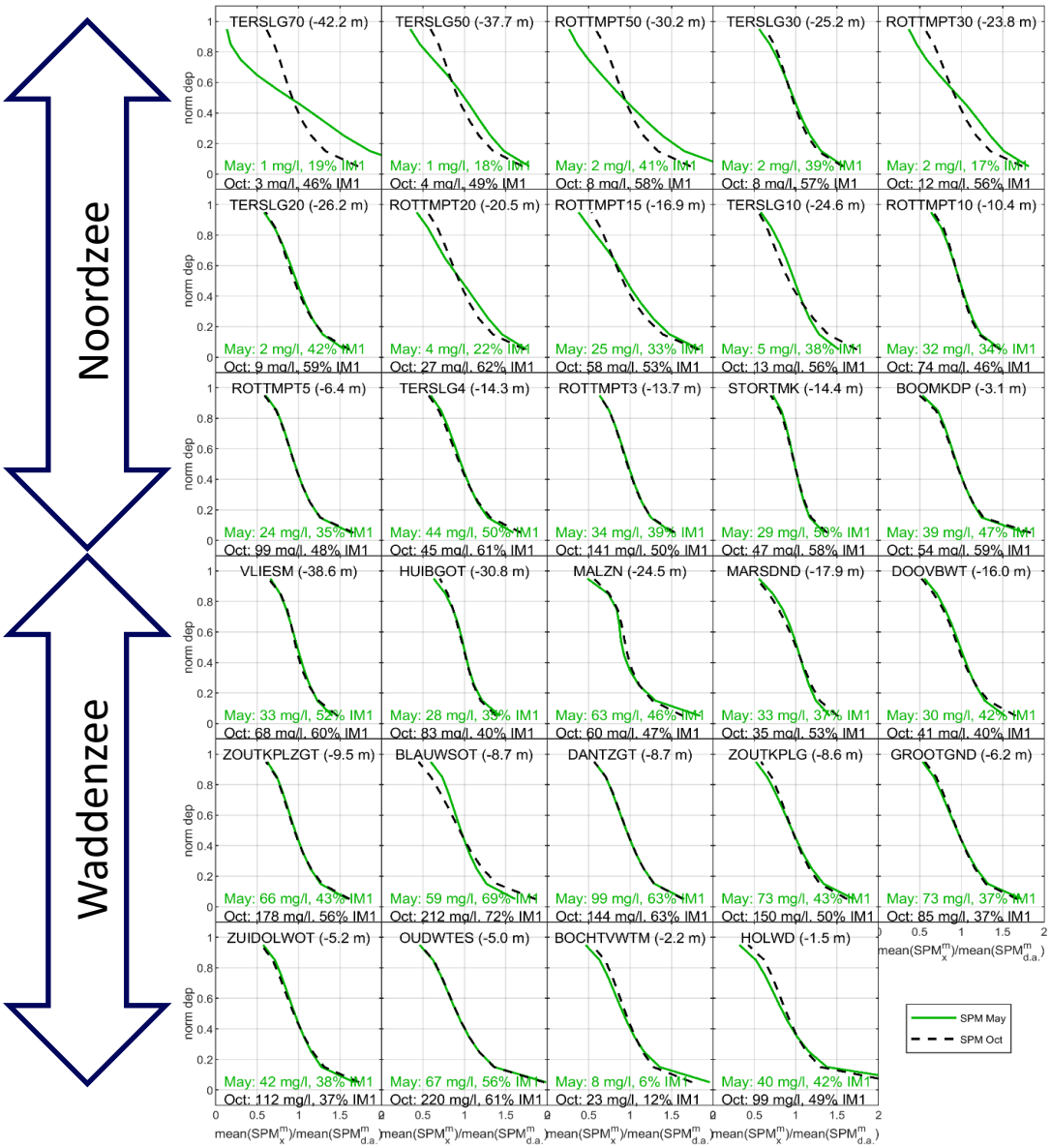
In het conceptueel denkmodel rapport (Herman et al. 2018) wordt de hypothese opgeworpen dat de gelijkaardige seizoensfluctuatie op de Waddenzee en de Noordzee (beide een factor 2) wordt veroorzaakt door verschillen in verticale menging over de seizoenen. Omdat er echter geen metingen zijn van SPM over de verticaal, wordt deze hypothese getoetst met het numerieke model. De verticale menging wordt onderzocht door voor een groot aantal stations de genormaliseerde verticale SPM profielen te tekenen (Figuur 3.15). Hierbij wordt onderscheid gemaakt tussen een maand met een steil profiel (oktober, veel golven) en een flauwe profiel (mei, geen storm). De lijnen stellen de maandgemiddelde SPM per waterlaag voor, gedeeld door het maandgemiddelde van het dieptegemiddelde SPM. Dat geeft waardes tussen 0 en 2 op de x-as. De diepte is genormaliseerd

op de y-as. De stations zijn gesorteerd: bovenste 3 rijen zijn de Noordzee, van linksboven het verst van de Waddenzee en rechtsonder het dichtstbij. Onderste 3 rijen zijn de Waddenzee, van linksboven het diepste station naar rechtsonder het meest ondiepe station.

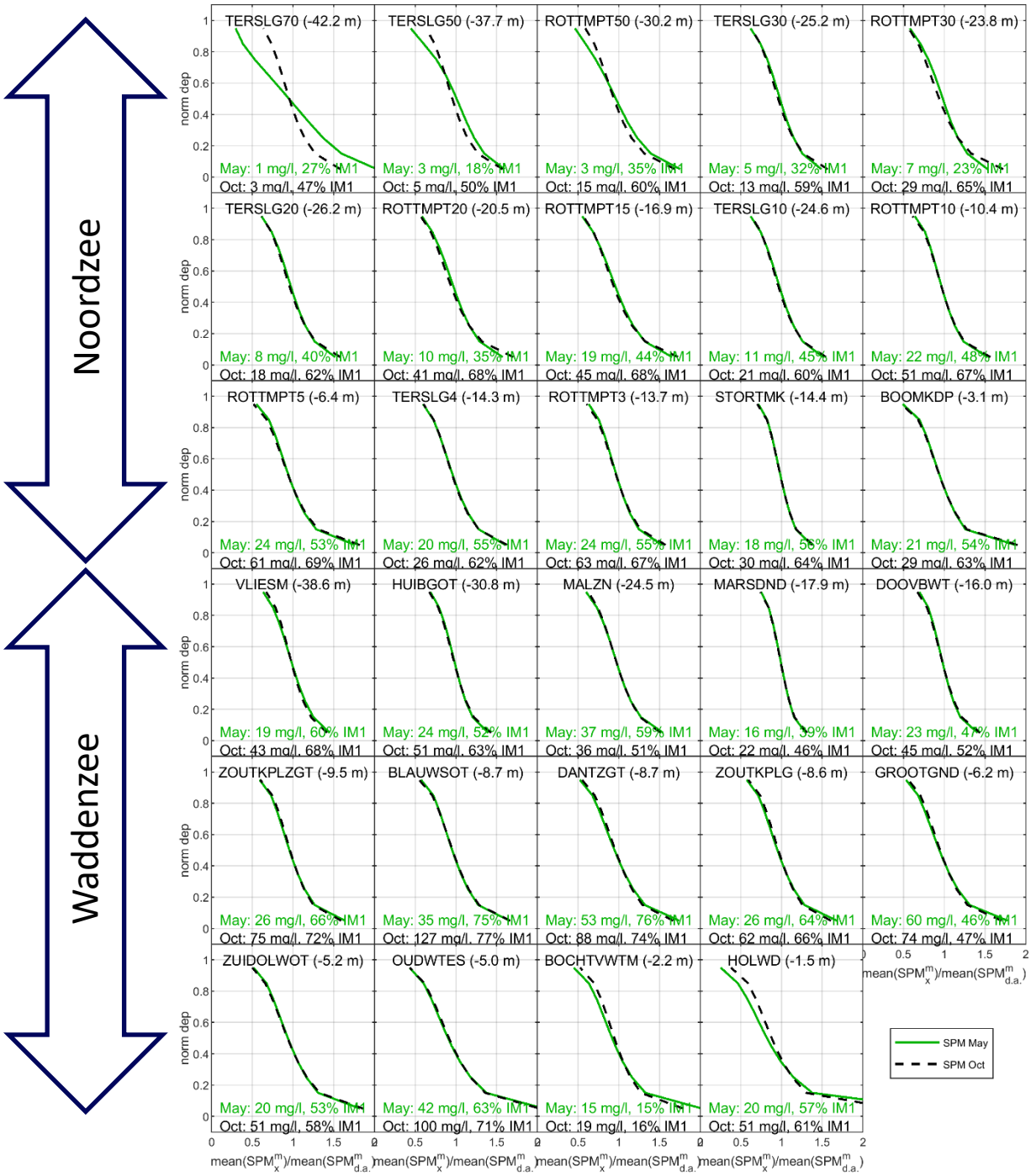
Er blijkt dat voor de meeste Waddenstations er geen of nauwelijks verschil is tussen het genormaliseerde sedimentconcentratieprofiel in mei en oktober. De verticale menging is dus altijd vergelijkbaar, ook als het SPM-gehalte en de verhouding tussen de hoeveelheid IM1 en IM2 verschillend is. In de Noordzee daarentegen, zijn er wel verschillen tussen de profielen in mei en oktober, vooral voor de stations die verder op de Noordzee liggen (indien aanwezig geeft het cijfer in de stationsnaam de afstand tot de kust aan). Dit wordt niet veroorzaakt door een andere verhouding tussen de sedimentfracties. Een fractie met een grotere valsnelheid (IM1) heeft in principe een flauwer profiel omdat deze meer uitzakt en een fijne fractie (IM2) heeft juist een steiler profiel omdat deze beter gemengd kan worden over de verticaal. In oktober is er in verhouding (en absoluut) meer IM1 in suspensie dan in mei, en toch is het profiel steiler.

Indien zout-gedreven dichtheidsstroming niet wordt meegenomen, blijkt dat op de Waddenzee het schil in verticaal SPM profiel tussen mei en oktober bijna helemaal verdwijnt. Het verschil in verticale menging tussen mei en oktober wordt in de Waddenzee dus bepaald door zout-gedreven dichtheidsstroming. Op de Noordzee wordt het verschil tussen mei en oktober wel kleiner, maar het verdwijnt niet. Het is opvallend dat de saliniteit zo ver op de Noordzee nog een relatief groot effect heeft. Ook de watertemperatuur heeft invloed op de verticale menging, blijkt uit de simulatie zonder temperatuur (Figuur 3.17). Daarnaast wordt het verschil in verticale menging op de Noordzee nog beïnvloed door andere factoren, zoals menging door golven en residuele stroming. De grote bijdrage van saliniteit en temperatuur aan de verticale verdeling van SPM op de Noordzee, onderschrijft het belang van 3D randvoorwaarden voor saliniteit en temperatuur, die in het huidige model zijn geïmplementeerd.

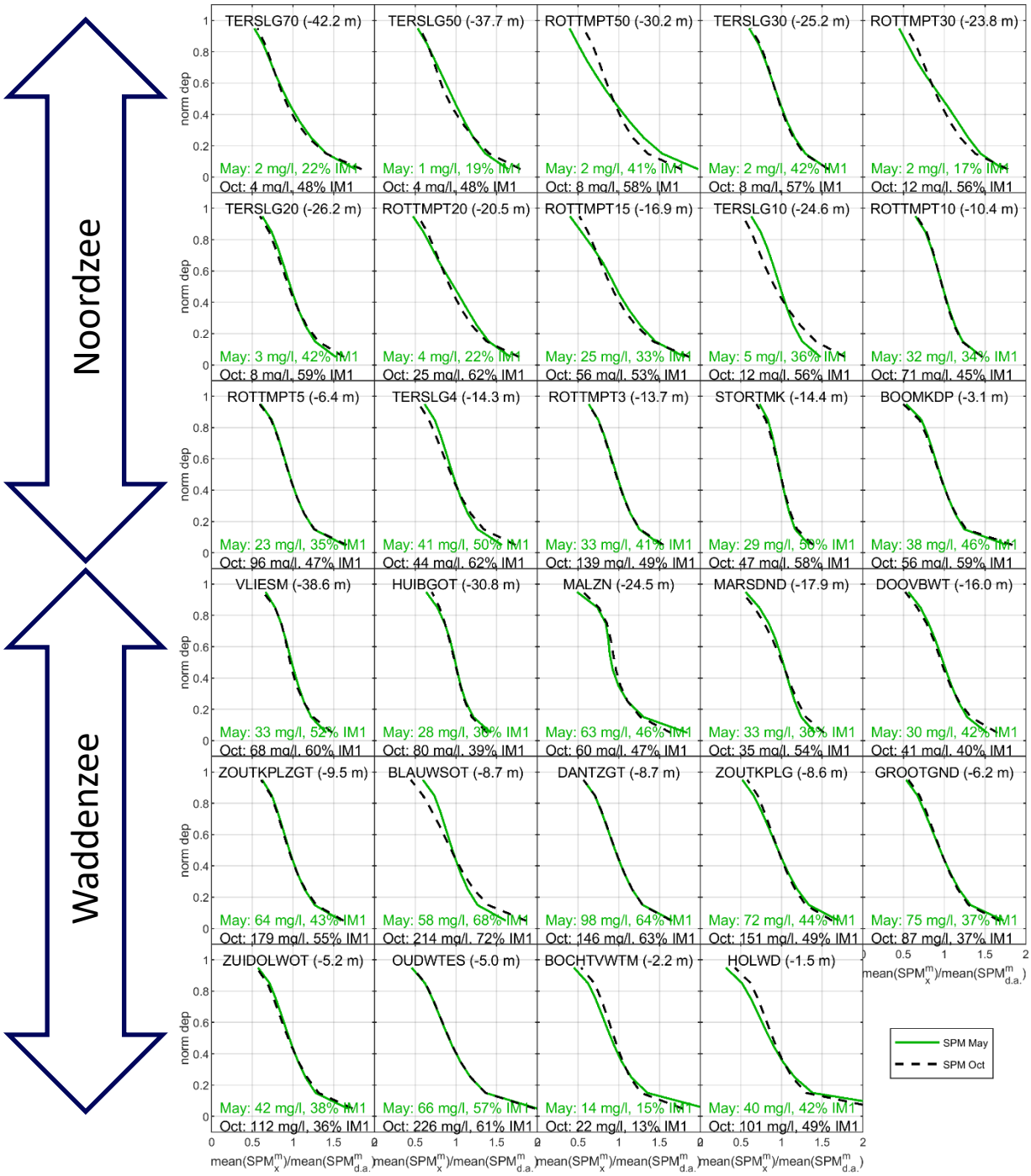
Hoewel er verschillen tussen de sezioenen zijn in de verticale profielen van SPM op de Noordzee, wordt dit effect overschaduwd door de resuspensie van golven. Ook op de Noordzee is de golfwerking voldoende groot om een seizoenssignaal te veroorzaken. Dit is aangetoond in Figuur 3.18, waar de seizoensfluctuatie in SPM voor de bodem en de oppervlakte is getoond. Als het seizoenssignaal volledig bepaald zou worden door verschillen in verticale menging, zou het bodem en oppervlakte signaal voor de Noordzee precies uit fase moeten lopen.



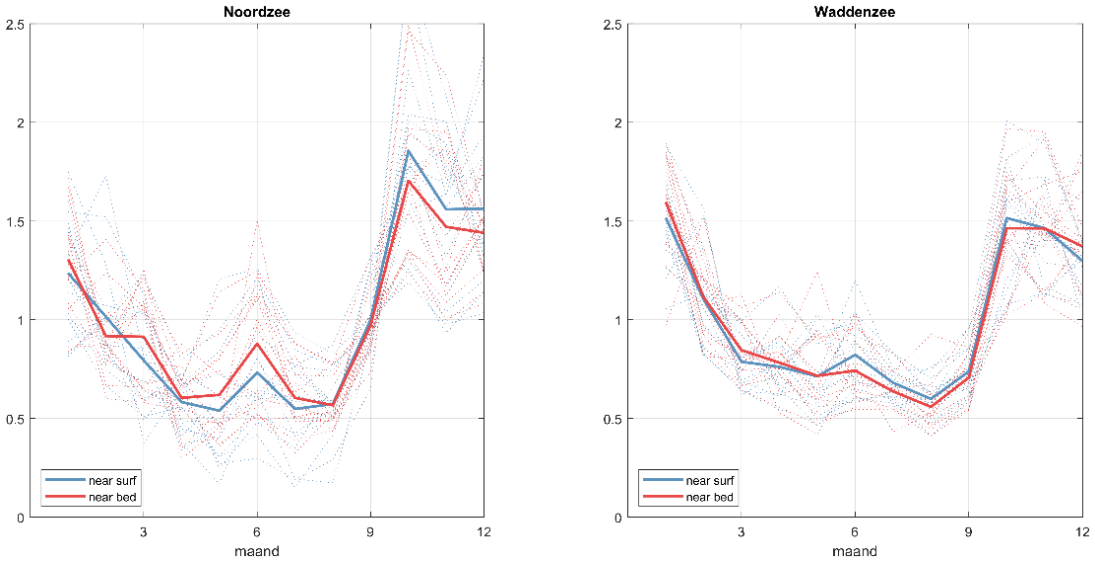
Figuur 3.15 Verticale SPM profielen voor verschillende stations (zie titel per subfiguur met tussen haakjes de diepteligging van het station) voor de referentiesimulatie. Het SPM profiel is berekend het gemiddelde SPM voor een bepaald maand, gedeeld door het dieptegemiddelde SPM voor die maand. Doorgetrokken groene lijn geeft resultaat voor de maand mei, gestippelde zwarte lijn voor de maand oktober. Onderaan elk subfiguur staat het maandgemiddeld, dieptegemiddeld SPM gehalte weergeven, met daarachter welk aandeel van het SPM gehalte bestaat uit IM1 (slib met valsnelheid van 1,5 mm/s), de rest is IM2 (slib met valsnelheid van 0,4 mm/s).



Figuur 3.16 Verticale SPM profielen voor verschillende stations (zie titel per subfiguur met tussen haakjes de diepteligging van het station) voor de simulatie zonder saliniteit. Het SPM profiel is berekend het gemiddelde SPM voor een bepaald maand, gedeeld door het dieptegemiddelde SPM voor die maand. Doorgetrokken groene lijn geeft resultaat voor de maand mei, gestippelde zwarte lijn voor de maand oktober. Onderaan elk subfiguur staat het maandgemiddeld, dieptegemiddeld SPM gehalte weergeven, met daarachter welk aandeel van het SPM gehalte bestaat uit IM1 (slib met valsnelheid van 1,5 mm/s), de rest is IM2 (slib met valsnelheid van 0,4 mm/s).



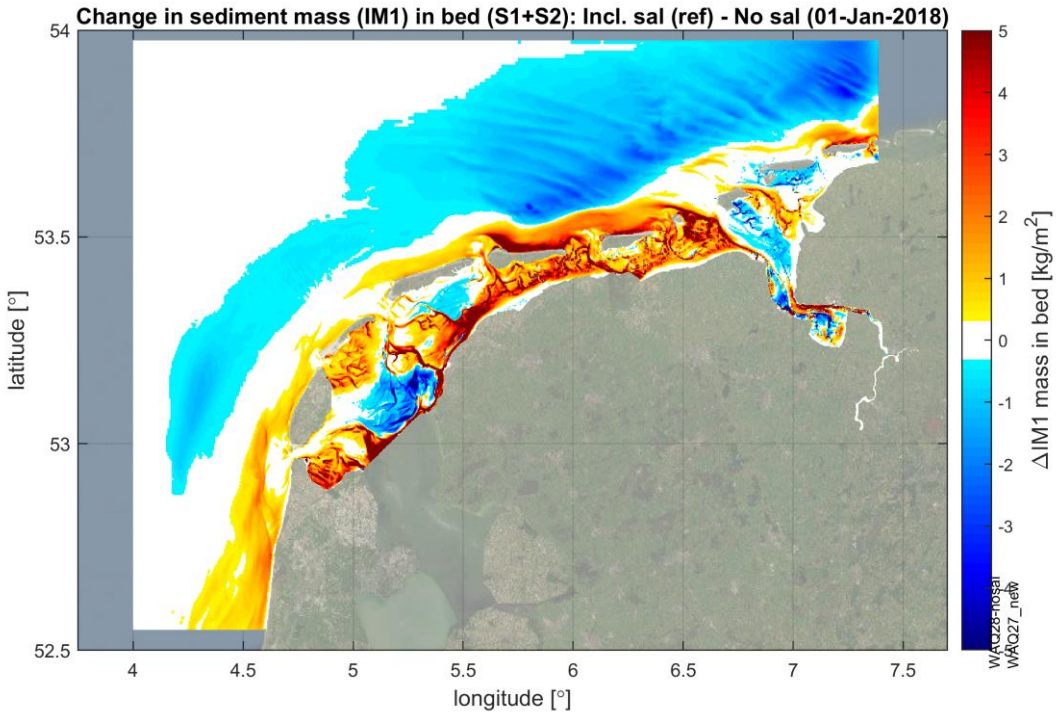
Figuur 3.17 Verticale SPM profielen voor verschillende stations (zie titel per subfiguur met tussen haakjes de diepteligging van het station) voor de simulatie zonder temperatuur. Het SPM profiel is berekend het gemiddelde SPM voor een bepaald maand, gedeeld door het dieptegemiddelde SPM voor die maand. Doorgetrokken groene lijn geeft resultaat voor de maand mei, gestippelde zwarte lijn voor de maand oktober. Onderaan elk subfiguur staat het maandgemiddeld, dieptegemiddeld SPM gehalte weergeven, met daarachter welk aandeel van het SPM gehalte bestaat uit IM1 (slib met valsnelheid van 1,5 mm/s), de rest is IM2 (slib met valsnelheid van 0,4 mm/s).



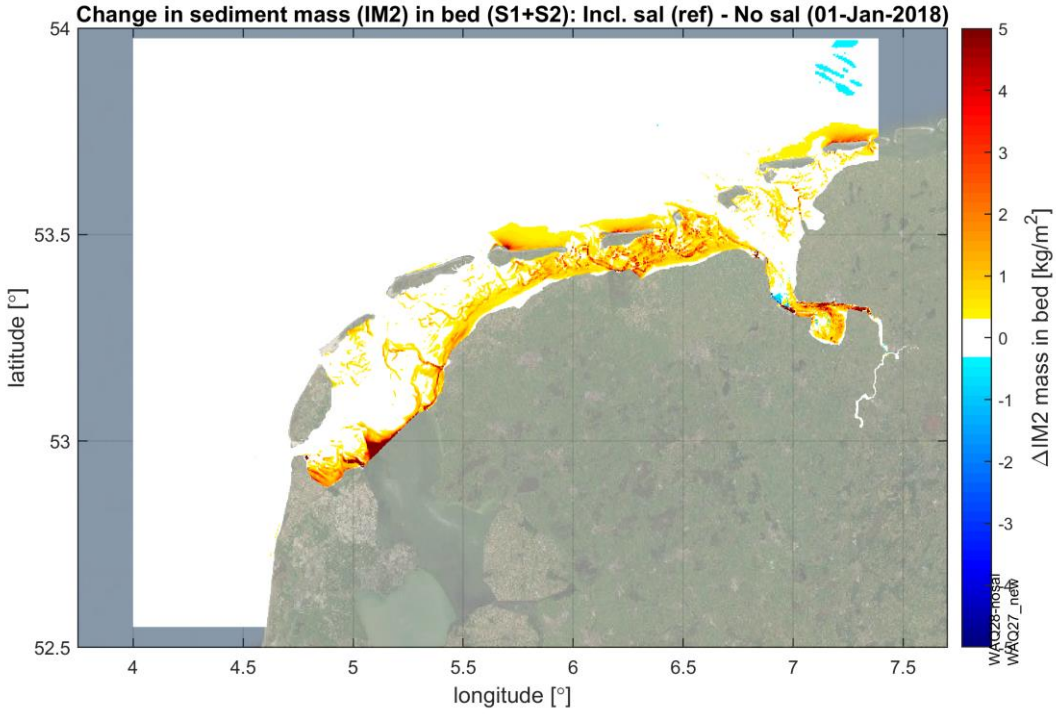
Figuur 3.18 Seizoenssignaal nabij de oppervlakte (blauw) en nabij de bodem (rood), beide voor de referentiesimulatie voor de Noordzee (links) en de Waddenzee (rechts).

3.6 Zoetwaterafvoer

Om de invloed van zoetwaterafvoer te onderzoeken, is er een extra modelsimulatie uitgevoerd zonder saliniteit waarbij er nog wel water wordt gespuid maar er geen saliniteitsgradiënten aanwezig zijn. De Waddenzee en de Noordzee zijn hierbij dus volledig zoete wateren. Door zout-gedreven gravitatiecirculatie wordt nabij de bodem, waar de sedimentconcentraties het grootste zijn, zout Noordzeewater netto de Waddenzee binnen getransporteerd, terwijl aan de oppervlakte lichter water, met lagere sedimentconcentratie, de Waddenzee uitstroomt. Dit proces zorgt voor netto import van sediment. In het model neemt de hoeveelheid van de grove fractie IM1 in de bodem toe bijna overal in de Waddenzee en in de kustzone en af verder op de Noordzee (Figuur 3.19) als gevolg van saliniteitsgradiënten. De toename van slib is het grootste in de geulen en de luwe gebieden. Achterin het Zeegat van Texel en op het wantij van Terschelling neemt het bodemslibgehalte juist af door gravitatiecirculatie. Dit is mogelijk het gevolg van veranderde residuele stroming in combinatie met een langere verblijftijd in het geval saliniteit wordt meegenomen. De lichtere fractie IM2 laat overal in de Wadbodem een toename zien, zonder dat er een afname optreedt in de Noordzee. De veranderingen zijn groot ten opzichte van de hoeveelheid slib die in de bodem zit, in de Waddenzee bedraagt het voor het merendeel van de gebieden 30 tot meer dan 50%. Op gebieden waar weinig slib in de bodem zit, is het effect relatief nog groter.



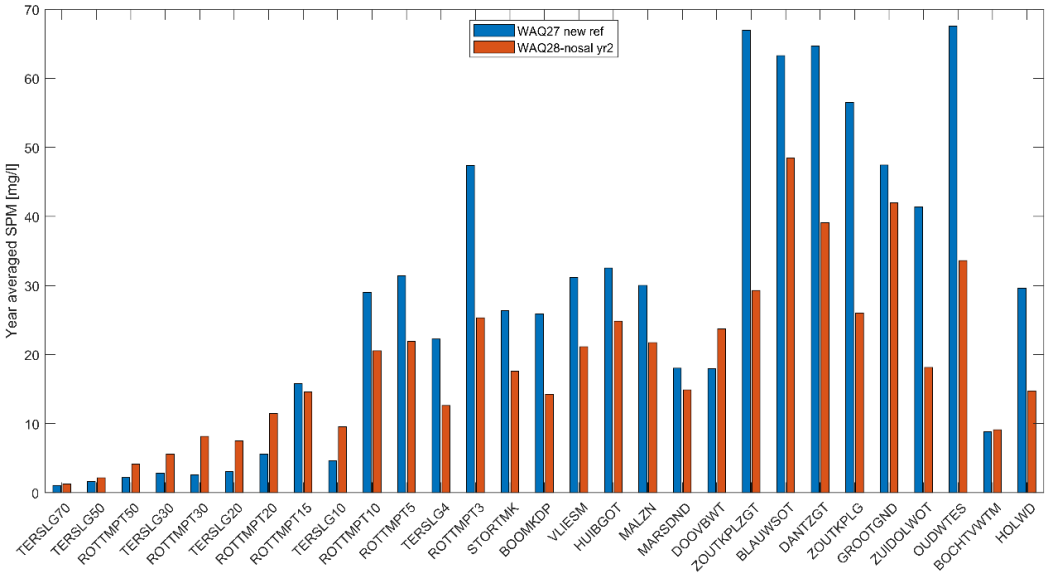
Figuur 3.19 Effect van het meenemen van saliniteit op de massa IM1 in de Wadbodem. Verschil na een jaar simuleren.



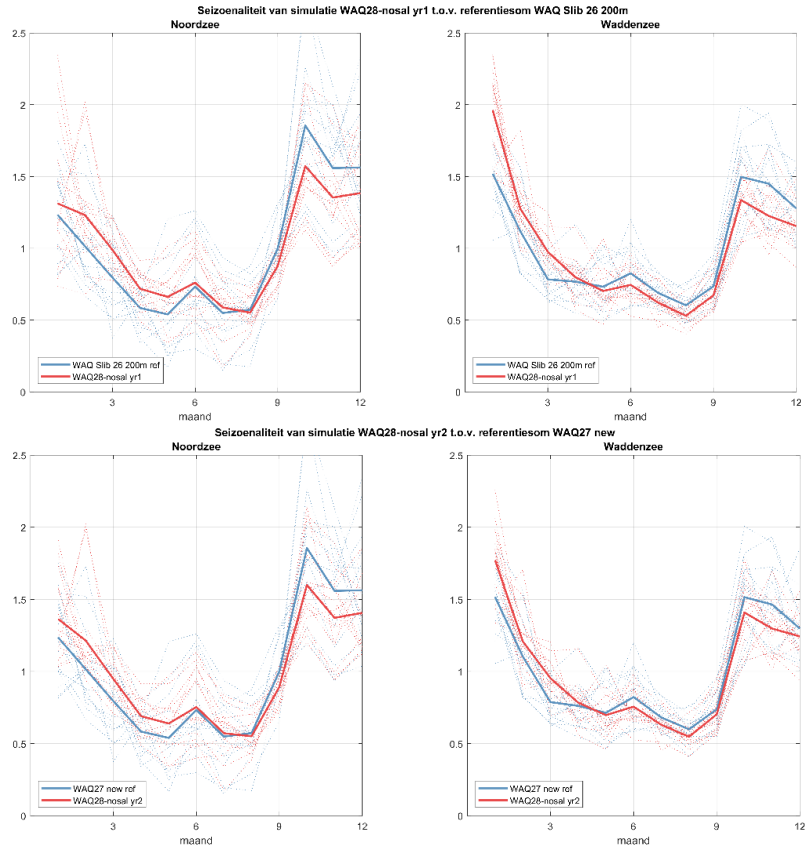
Figuur 3.20 Effect van het meenemen van saliniteit op de massa IM2 in de Wadbodem. Verschil na een jaar simuleren.

De zout-gedreven dichtheidsstroming resulteert ook in een hogere SPM in de Waddenzee en de kustzone en lagere SPM in de Noordzee (Figuur 3.21). Het effect van de saliniteit op de seizoensafhankelijkheid is veel kleiner dan het effect op absoluut SPM gehalte (Figuur 3.22). Variaties in zoetwaterafvoer hebben dus maar een klein effect op variaties in SPM, en dit komt omdat het relatief lang duurt voordat het systeem is aangepast aan de veranderende afvoer. Zoet

water blijft relatief lang hangen in de Waddenzee en de saliniteitsgradiënt blijft voor grote delen van de Waddenzee vergelijkbaar tijdens de zomer (weinig zoetwaterafvoer) en de winter (veel zoetwaterafvoer). Alleen lokaal, nabij de afsluitdijk, treden grotere verschillen op. Gegeven de opgetreden variaties in afvoeren lijkt het onwaarschijnlijk dat deze de fluctuaties in SPM tussen de jaren kan verklaren.

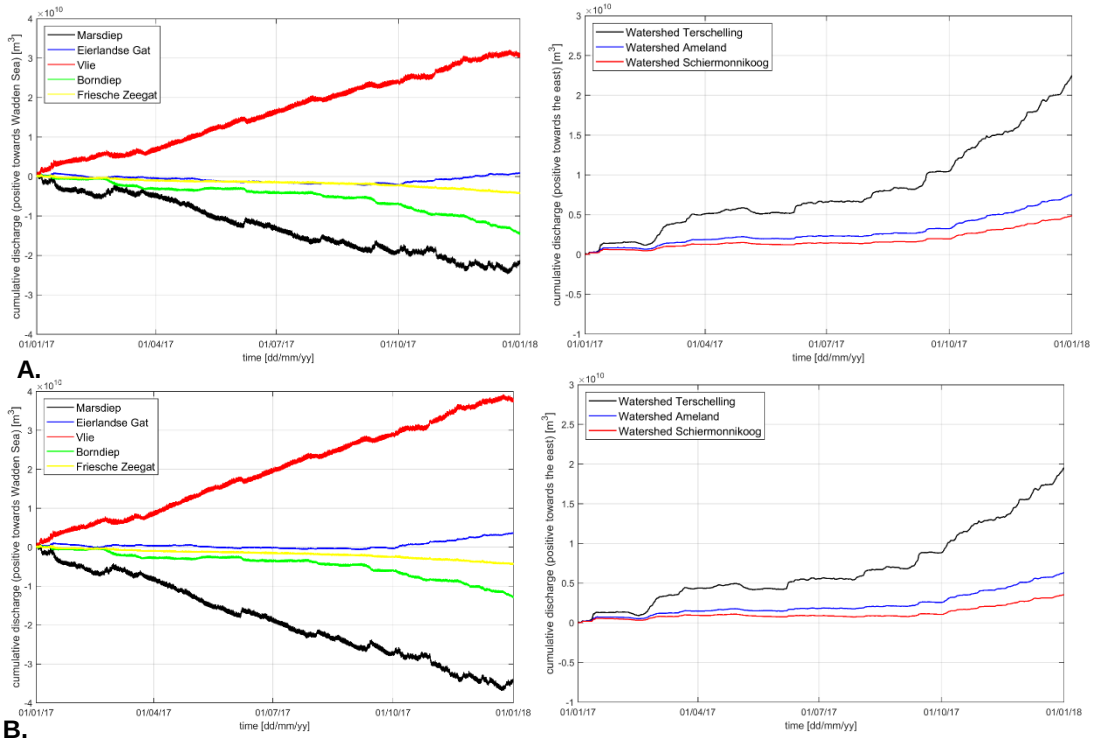


Figuur 3.21 Maandgemiddeld SPM op de Noordzee (bovenste 3 rijen) en in de Waddenzee (onderste 3 rijen) voor de referentiesimulatie incl. saliniteit (blauw) en de simulatie zonder saliniteit (rood).



Figuur 3.22 Genormaliseerde SPM per maand om seizoensvariatie te tonen voor de referentiesimulatie (blauw) en de simulatie zonder saliniteit (rood), voor het eerste jaar zonder saliniteit (boven) en een doorstart voor een 2e jaar (onder).

Zout-gedreven dichtheidsstromen verkleinen het residuele debiet dat naar binnen komt bij het Vlie en naar buiten gaat door het Marsdiep en daarmee ook het residuele debiet tussen het Vlie en het Marsdiep. Het zeewaartse restdebiet door het Marsdiep wordt kleiner, omdat zout-gedreven stroming een netto landwaarts debiet nabij de bodem aandrijft. Het landwaartse debiet door het Vlie wordt daardoor ook verkleind. De oostwaartse reststroming over de wantijen in de oostelijke Waddenzee wordt juist groter als gevolg van zout-gedreven dichtheidsstroming.



Figuur 3.23 Tijdseries van het gemodelleerde cumulatieve debiet door de zeegaten (links) en over de wantijen (rechts) voor de referentiesimulatie met saliniteit (A. boven) en de simulatie zonder saliniteit (B. onder).

Het effect van zout-gedreven dichtheidsstroming op de resttransporten is groot (Tabel 3.4). Indien saliniteit niet wordt meegenomen, verdwijnt het slib uit de Waddenzee. Alleen de zeegaten van het Vlie en het Eierlandse Gat laten nog een kleine import zien. Het effect van de zout-gedreven dichtheidsstroming is een extra import van 4,3 miljoen ton slib voor het jaar 2017. Als de simulatie zonder saliniteit nog vaker zou worden doorgestart, zal dit getal kleiner worden omdat er dan steeds minder slib in de Waddenzee aanwezig is.

Tabel 3.4 Cumulatief slibtransport door zeegaten en over de wantijen voor twee modelsimulaties met en zonder saliniteit.

Cumulatief slibtransport door zeegaten en over wantijen in een jaar (in miljoen ton). Positief naar binnen (zeegaten) of naar het oosten (wantijen).

	Met saliniteit	Zonder saliniteit	Verschil (met – zonder)
Marsdiep	+1,6	-0,5	2,1
Eierlandse Gat	+0,6	+0,2	0,4
Vlie	+1,9	+0,4	1,5
Borndiep	-2,3	-2,2	0,1
Friesche Zeegat	-0,5	-1,2	0,7
Wantij Terschelling*	*-4,2*	*-2,7*	*-1,5*
Wantij Ameland*	*-1,7*	*-1,1*	*-0,6*
Wantij Schiermonnikoog	-0,7	-0,4	-0,3
Via zoetwaterafvoer	+0,3	+0,3	-
TOTAAL de Waddenzee in	**+0,9**	**-3,4**	**4,3**

* niet gebruikt in het totaal.

Tabel 3.5 Sedimentatie in de bekkens voor twee modelsimulaties met en zonder saliniteit.

Netto sedimentatie in bekkens (in miljoen ton).			
	Met saliniteit	Zonder saliniteit	Verschil (met – zonder)
Marsdiep-Vlie-Eierlandse Gat*	+0,2	-2,3	2,5
Borndiep	+0,2	-0,6	0,8
Friesche Zeegat	+0,5	-0,5	1
TOTAAL	+0,9	-3,4	4,3

* Voor deze bekkens zijn de transporten over de wantijen niet bepaald, vanwege onduidelijkheid over de positie van het wantij tussen het Marsdiep en Vlie.

3.6.1 Validatie

Na de modelkalibratie en -validatie is er nieuwe velddata beschikbaar gekomen van de gemeten saliniteit in het Amelander Zeegat (Van Prooijen et al., 2020). Tijdens de modelkalibratie zijn gemeten tijdseries bij de NIOZ steiger (nabij het Marsdiep) en periodieke metingen op MWTL punten gebruikt. De gemeten tijdseries op de buitendelta van het Amelander Zeegat geven de mogelijkheid om de modelresultaten op hoge temporele resolutie te vergelijken met velddata, om zo de nauwkeurigheid van de reproductie door het model te bepalen. Deze metingen geven belangrijk inzicht over de debieten (transport van de zoetwaterafvoer/-bel vanaf de Afsluitdijk) over de wantijen en bij vergelijking met het model kan belangrijk inzicht worden verkregen of de berekende residuele stromingen en daarmee samenhangende residuele transporten realistisch zijn.

Tijdseries van de gemeten en de berekende saliniteit in september 2017 zijn weergegeven in Figuur 3.24. In de periode tot 10 september komt de berekende saliniteit goed overeen met de gemeten saliniteit. Over het algemeen is de saliniteit in de modelresultaten tijdens de hele getijcyclus ongeveer 1 PSU te hoog. De variatie over de getijperiodes (d.w.z. afstand tussen piek en dal) is ongeveer gelijk met de gemeten variatie.

Door een zuidwesterstorm op 13 september neemt de saliniteit in het Amelander Zeegat tijdens eb af (de dalen in de tijdseries worden lager). Waarschijnlijk wordt deze afname veroorzaakt door een groot debiet over het wantij van Terschelling tijdens de storm. Hierdoor stroomt relatief zoet water afkomstig van de spuisluizen in de Afsluitdijk naar het oosten, richting het Amelander Zeegat. De lage saliniteit tijdens eb in de periode na de storm wordt goed gereproduceerd door het model. De tijdschaal waarmee de saliniteit tijdens eb weer op het niveau komt van voor de storm is vergelijkbaar in het model en in de data.

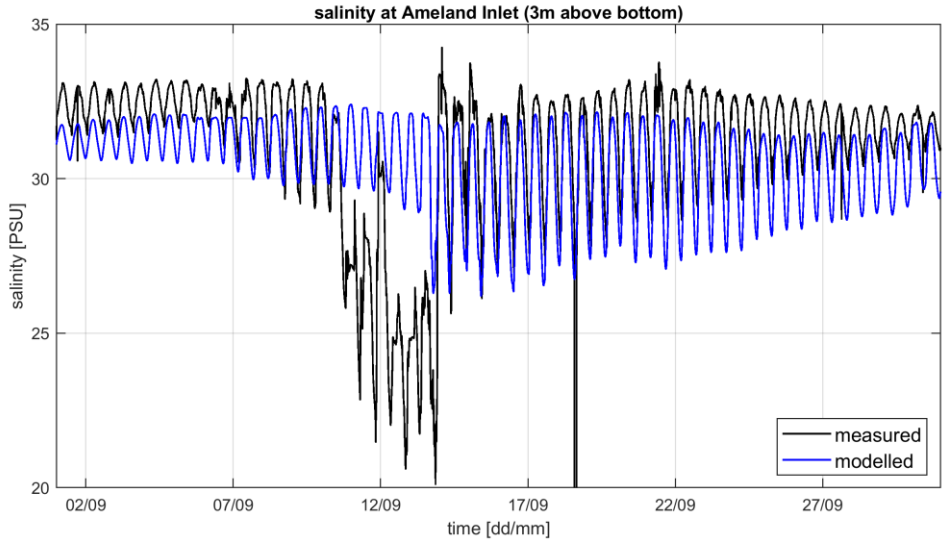
Tussen 11 en 13 september is in de metingen een afname in de saliniteit terug te zien van ruim 5 PSU. Het is nog niet duidelijk waar die afname door veroorzaakt wordt, maar het is wel duidelijk dat de afname niet door het model gereproduceerd wordt. Er is een aantal mogelijke verklaringen te bedenken voor de afname in de saliniteit in de metingen:

- Door regenval zal de saliniteit afnemen. Regenval is niet in het model opgenomen. Een vergelijking met gemeten regenval laat zien dat de afname in saliniteit inderdaad tegelijk optreedt met een periode met regen. Echter, omdat er geen sprake is van extreme regenval is het niet aannemelijk dat de regenval de afname van ongeveer 5 PSU kan veroorzaken, zeker niet in een dynamisch gebied als de buitendelta van Ameland.
- Door een combinatie van hoge afvoeren bij de spuisluizen in de Afsluitdijk en wind vanuit het westen/zuidwesten kan relatief zoet water richting het Amelander Zeegat gestuwd worden. Een vergelijking met meetdata laat zien dat er inderdaad relatief veel gespuid werd in de dagen vanaf 11 september. Dit zou kunnen verklaren waarom de saliniteit in het Amelander Zeegat tijdens eb afneemt, maar het verklaart niet waarom de saliniteit ook

tijdens vloed ver afneemt. De saliniteit van water dat vanaf de Noordzee tijdens vloed door het Amelander Zeegat stroomt zal nauwelijks beïnvloed worden door spuidebieten.

- Door meetfouten, bijvoorbeeld door vervuiling van de sensor, kan het zijn dat de afname in de meting niet representatief is voor de werkelijke saliniteit in het Amelander Zeegat tijdens deze periode. Tijdens de storm op 13 september kan de vervuiling van het instrument gespoeld zijn.

Veel van de variaties in de gemeten saliniteit worden dus goed gereproduceerd door het model. Om te weten waarom de periode met lage saliniteit niet goed in de modelresultaten is opgenomen is het nodig om de precieze oorzaak van de lage saliniteit te onderzoeken. Als dat een fysische oorzaak heeft, kunnen modelinstellingen eventueel worden aangepast of processen aan het model worden toegevoegd zodat het model de metingen beter gaat reproduceren.



Figuur 3.24 Tijdseries van de gemeten (zwart) en berekende (blauw) saliniteit in september 2017 bij een observatiepunt in het Amelander Zeegat, op 3 meter vanaf de bodem.

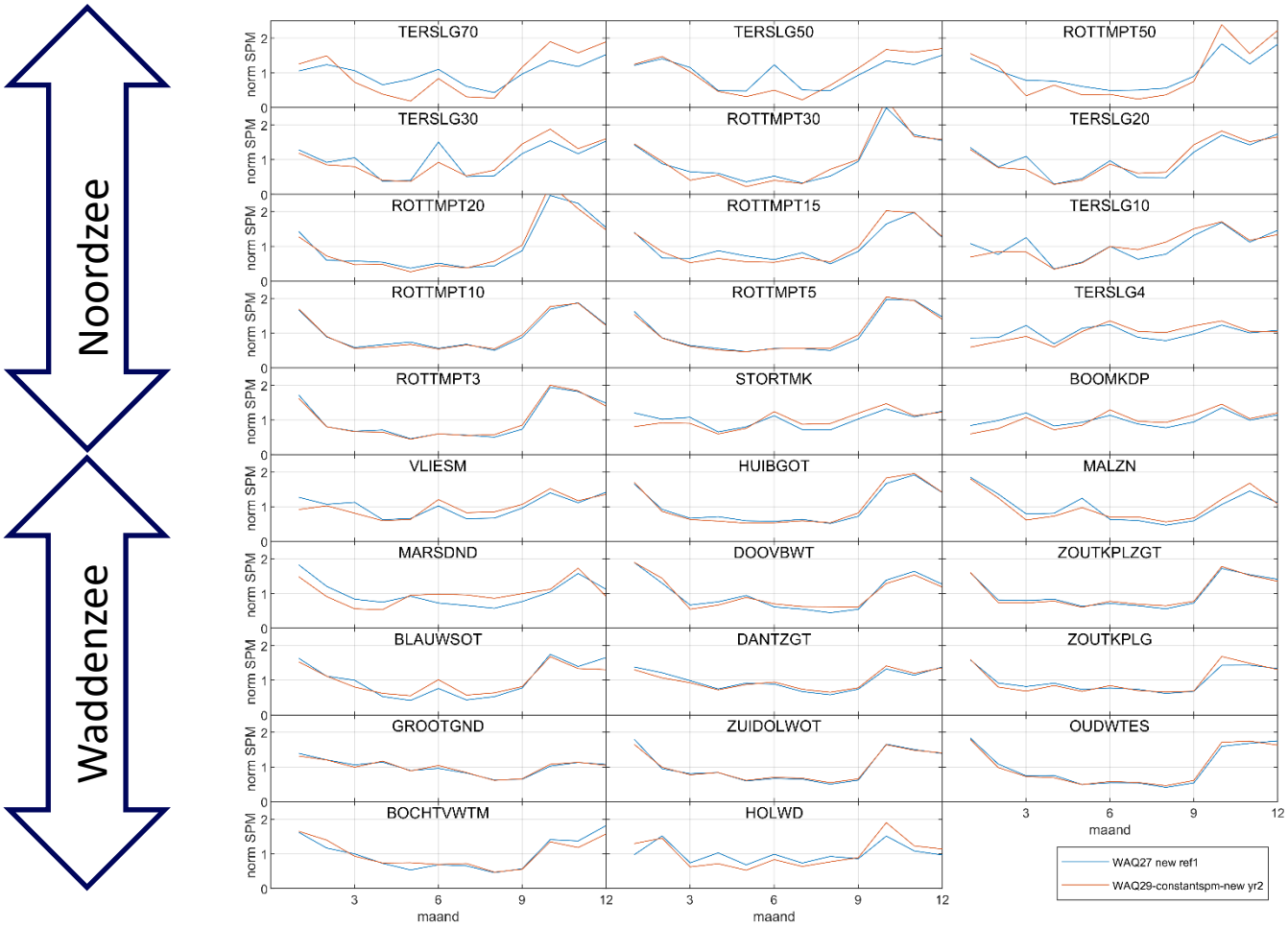
3.7 SPM variaties op de Noordzee

In de bestaande modelsimulaties is gebruik gemaakt van een tijdsafhankelijke randvoorwaarde voor de sedimentconcentratie, aangezien de slibconcentratie in de Noordzee schommelt over de seizoenen. Om de invloed van deze randvoorwaarde op de resultaten te begrijpen, zijn er extra modelsimulaties uitgevoerd met een constante sedimentconcentratie op de rand.

De randen van het model liggen op een aanzienlijke afstand van het interessegebied, de Waddenzee. Om een goed beeld te krijgen van invloed van gewijzigde SPM-randvoorwaarde op de Waddenzee moet het model voor meerdere jaren worden gedraaid om een nieuw dynamisch evenwicht te bereiken in de Waddenzee.

Figuur 3.25 toont de seizoensfluctuatie in het maandgemiddelde SPM-gehalte op verschillende stations in de Noordzee en in de Waddenzee voor de referentiesimulatie (blauwe lijn) en na twee jaar met constante SPM-randvoorwaarde op de Noordzee (rode lijn). Na twee jaar is de invloed van de gewijzigde SPM-randvoorwaarde op de stations in de Waddenzee nog altijd zeer beperkt. De seizoensdynamiek is voor deze stations niet wezenlijk veranderd. Dat wil zeggen dat de seizoensfluctuatie in het model niet lijkt te worden geforceerd door de gekozen randvoorwaarde. De verandering van de SPM-randvoorwaarde heeft wel een klein effect op de gemiddelde concentraties, maar dit effect is marginaal. Zelfs het effect op de Noordzee is heel klein. Dit sluit

aan bij eerdere observaties dat de seizoensdynamiek op de Noordzee grotendeels wordt veroorzaakt door interne processen, zoals effect van meteorologie en golven (meer resuspensie in de winter dan in de zomer), en dus nauwelijks afhankelijk is van het seizoenssignaal op de modelrand.



Figuur 3.25 Seizoensfluctuatie in maandgemiddelde SPM-gehalte voor verschillende stations op de Noordzee (bovenste panelen) en Waddenzee (onderste panelen). De blauwe lijn toont de referentiesimulatie en de rode lijn de simulatie met constante SPM-randvoorwaarde op de Noordzee.

3.8 Microfytobenthos

Microfytobenthos beïnvloedt de slibdynamiek in de gehele Waddenzee door het vastleggen van slib op platen. De groei van microfytobenthos is sterk afhankelijk van o.a. de vertroebeling en de lichtinstraling en varieert per seizoen en per jaar. Onder invloed van microfytobenthos wordt het slib in de zomerperiode vastgelegd op de platen door het creëren van een biofilm, waardoor de weerstand tegen erosie wordt verhoogd. Dit heeft een seizoenseffect op de sedimentconcentratie in de gehele Waddenzee, maar kan ook verschillen tussen jaren veroorzaken. In Herman et al. (2018) wordt op basis van SPM metingen en biomassa gedetecteerd satellieten voor een aantal jaren een verband gevonden tussen SPM en biomassa. In standaard Delft3D wordt dit proces niet berekend, waardoor de seizoensvariatie mogelijk wordt onderschat of de seizoensvariatie door andere processen (golven, meteorologie) wordt overschat. Daarom is de invloed van microfytobenthos op de slibdynamiek nu als proces toegevoegd aan de modelcode en toegepast in een geïdealiseerd model van een getijdebekken.

Door het ontstaan van microfytobenthos te laten berekenen aan de hand van de vertroebeling en lichtinstraling, kunnen ook seizoens- en jaarvariaties hierin worden meegenomen waardoor onze voorspellingen verbeteren. Het effect op slib is meegenomen via een verhoging van de kritische schuifspanning voor resuspensie van slib, afhankelijk van de massa van de biofilm. Zie bijlage A voor een gedetailleerde omschrijving van deze implementatie in de software. Dit leidt tot een verbetering in bijvoorbeeld het berekend doorzicht (impact op ecologie) maar ook baggerbezwaar.

De resultaten in bijlage A laten zien dat de biofilm in het voorjaar groeit en in de zomer haar maximale omvang kent, waarna de biofilm in het najaar weer afbreekt. Dit zorgt ervoor dat de weerstand tegen erosie in de zomer maximaal is, en leidt dus tot een verlaging van de slibconcentratie in de waterkolom in de zomer. Dit alles lijkt globaal in lijn met veldmetingen en analyse van satellietbeelden. Een kwantitatieve vergelijking met observaties moet nog worden uitgevoerd.

Er is dus een wezenlijk effect van het microfytobenthos op de slibdynamiek, waarbij de omvang en reikwijdte van het effect afhankelijk zijn van de gekozen parameterinstellingen. Het reducerende effect van de microfytobenthos op het SPM-gehalte is het grootst in de zomer, waarbij in het 2D testmodel maximaal tussen de 30% en 70% verlaging van de SPM-gehaltes plaatsvond voor verschillende groeisnelheden. Ook deze parameterinstellingen moeten gekalibreerd worden om een realistisch effect op de slibconcentratie te krijgen. Het betreft instellingen als de groeisnelheid van de biofilm, de extinctiecoëfficiënt en de mate waarin de biofilm bijdraagt aan verhoging van de kritische schuifspanning voor erosie. De groeisnelheid beïnvloedt de omvang van het effect en ook de fasering wanneer de biofilm een rol van betekenis gaat spelen in het jaar. De extinctiecoëfficiënt bepaalt de mate van uitdemping van licht in de waterkolom en heeft daarmee vooral invloed op de ruimtelijke verdeling (bijvoorbeeld op welke diepte de biofilm kan ontwikkelen). Met een geschikte dataset om dit deel te kalibreren kan de nieuwe software-implementatie toegepast gaan worden op de Waddenzee.

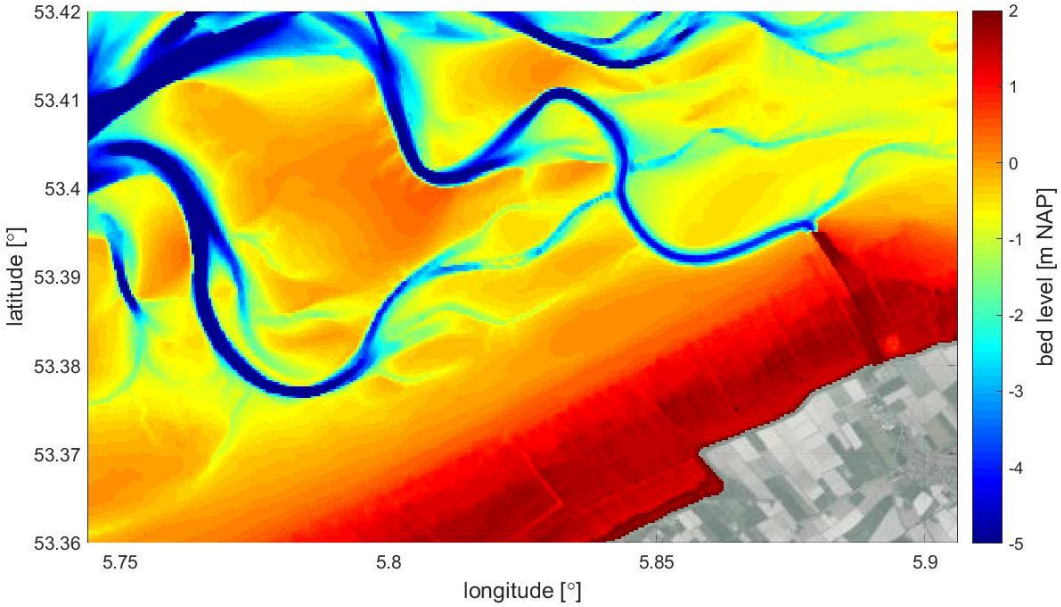
3.9 Baggeren en verspreiden

In het kalibratierapport (Vroom et al, 2020) was de invloed van baggeren en storten op de gesimuleerde sedimentconcentraties nog niet meegenomen. Het effect van baggeren en storten op SPM wordt hier besproken aan de hand van berekeningen die zijn gedaan voor een modelstudie naar het baggeronderhoud in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020). In die berekeningen is de resolutie van het model lokaal verhoogd, om aanslibbing in de geulen beter te kunnen berekenen. Een deel van de resultaten is in deze paragraaf overgenomen.

3.9.1 Modelopzet en modelsimulaties

Het Delft3D-FM WQ model is in de Waddenzee bij Ameland in drie stappen verfijnd tot een maximale horizontale resolutie van ongeveer 25 m x 25 m. Hierdoor is de vaargeul tussen Ameland en Holwerd nauwkeurig in het model opgenomen (zie Figuur 3.26). Door de hogere modelresolutie wordt de waterbeweging in dit deel van de Waddenzee in meer detail berekend, zodat de processen die bijdragen aan de uitwisseling van slib tussen geulen en platen nauwkeuriger gemodelleerd worden.

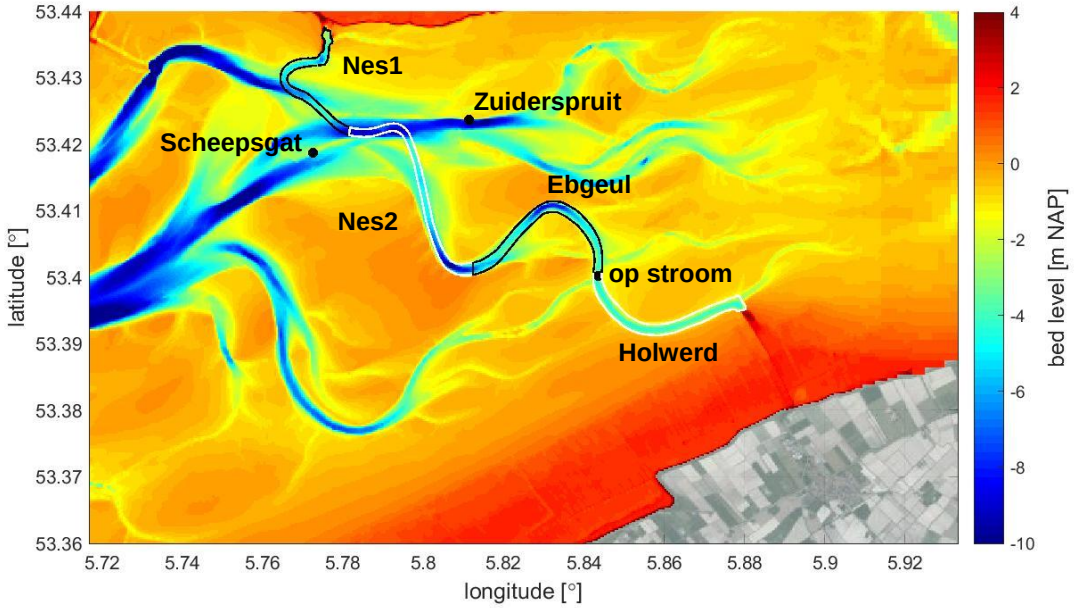
Door de lokale verfijning van het model neemt de rekentijd toe. Enerzijds is dit het gevolg van een groter aantal cellen in het rekenrooster (factor 2) en anderzijds is dit het gevolg van de kleinere tijdstap van berekeningen (factor 5). Door de toename in rekentijd (factor 10) is de simulatieperiode ingekort naar enkele maanden. Door de beschikbaarheid van velddata is gekozen voor de eerste drie maanden van 2019 (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020).



Figuur 3.26 Modelbodem in de Waddenzee bij Ameland met een roosterresolutie van 25 m x 25 m op basis van vaklodingen, LiDAR data en projectmetingen (van september 2018) in de vaargeul.

In de modelberekeningen wordt het baggeren geschematiseerd door in de vaargeul het slib uit de bufferlaag (S2) te halen als deze een waarde van 5 kg/m^2 overschrijd (equivalent aan 1 cm slib). De vaargeul is opgesplitst in vier delen (zie Figuur 3.27). Het grootste deel van het baggeronderhoud vindt plaats in het deel van de vaargeul bij Holwerd. Elke getijperiode wordt gecontroleerd of de hoeveelheid slib in de bufferlaag in de vaargeul dikker is dan 1 cm. Als dat het geval is wordt het overtollige slib uit de bufferlaag verwijderd en afhankelijk van de modelsimulatie eventueel teruggestort op een vooraf aangewezen stortlocatie:

1. In Scenario 1 wordt het slib wel uit de vaargeul gebaggerd, maar niet teruggestort. Hierdoor wordt slib onttrokken uit het model.
2. In Scenario 2 wordt het slib gebaggerd en teruggestort op een stortlocatie die hoort bij het baggervak (zie Figuur 3.27). Slib dat wordt gebaggerd bij Holwerd wordt tijdens eb op stroom gezet. Dit houdt in dat het slib tijdens eb in de omgeving van het baggergebied in de geul wordt losgelaten. Slib dat wordt gebaggerd in de Ebgeul wordt tijdens vloed gestort bij Zuiderspruit. Slib dat wordt gebaggerd in baggervakken Nes1 en Nes2 wordt tijdens eb gestort bij Scheepsgat.



Figuur 3.27 Ligging en naamgeving van vier baggervakken in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland en de drie stortlocaties in het model.

3.9.2 Resultaten

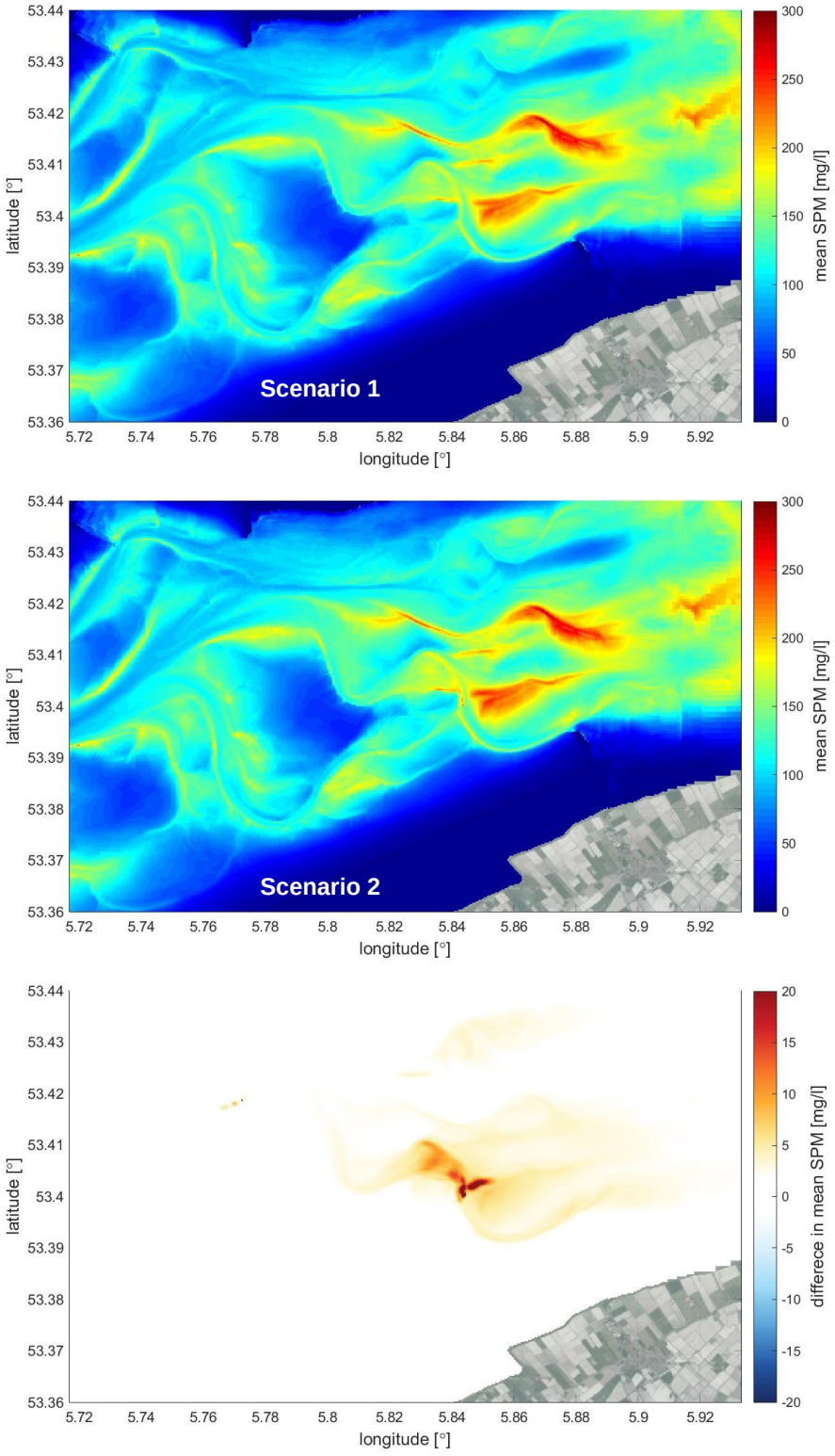
Zonder het terugstorten van het slib (Scenario 1) wordt er in het model in de eerste drie maanden van 2019 ongeveer 27 duizend ton slib uit de vaargeul onttrokken. 80% daarvan komt uit het deel van de vaargeul bij Holwerd of uit de Ebgeul. Wanneer het slib wordt teruggestort (Scenario 2) neemt het baggervolume over de eerste twee maanden van 2019 met ongeveer 5% toe.

Het baggeronderhoud dat in het model wordt berekend komt nog niet goed overeen met het baggeronderhoud dat daadwerkelijk wordt uitgevoerd in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland. In het model werd ongeveer 28 duizend ton slib gebaggerd in een periode van drie maanden (in Scenario 2). 80% daarvan werd gebaggerd in de baggervakken bij Holwerd en in de Ebgeul (d.w.z. ongeveer 23 duizend ton slib in twee maanden). In werkelijkheid werd in dit baggervak gemiddeld over 2018 en 2019 ongeveer 100 duizend ton per twee maanden gebaggerd (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020). Het gebaggerde materiaal bevat zand en slib. Bij Holwerd is de fractie zand klein. Het berekende baggervolume is dus ongeveer een factor 4 tot 5 lager dan het werkelijke baggervolume. Er loopt momenteel nog een herkalibratie om de berekende baggervolumes te laten toenemen richting de gemeten waarden.

In Scenario 1 wordt ten opzichte van Scenario 2 dus ongeveer 27 duizend ton slib uit het model onttrokken. De vraag die hier centraal staat is hoe het baggeren en terugstorten de slibconcentraties in de waterkolom beïnvloedt. Figuur 3.28 toont de gemiddelde slibconcentratie in de waterkolom (dieptegemiddeld en tijdsgemiddeld over de simulatieperiode) in het bekken in Scenario 1 en in Scenario 2, en het verschil in de gemiddelde slibconcentratie tussen de twee scenario's. Bij de stortlocaties neemt de slibconcentratie lokaal sterk toe. Dit is logisch, omdat hier elke getijperiode een behoorlijke hoeveelheid slib bovenin de waterkolom wordt losgelaten.

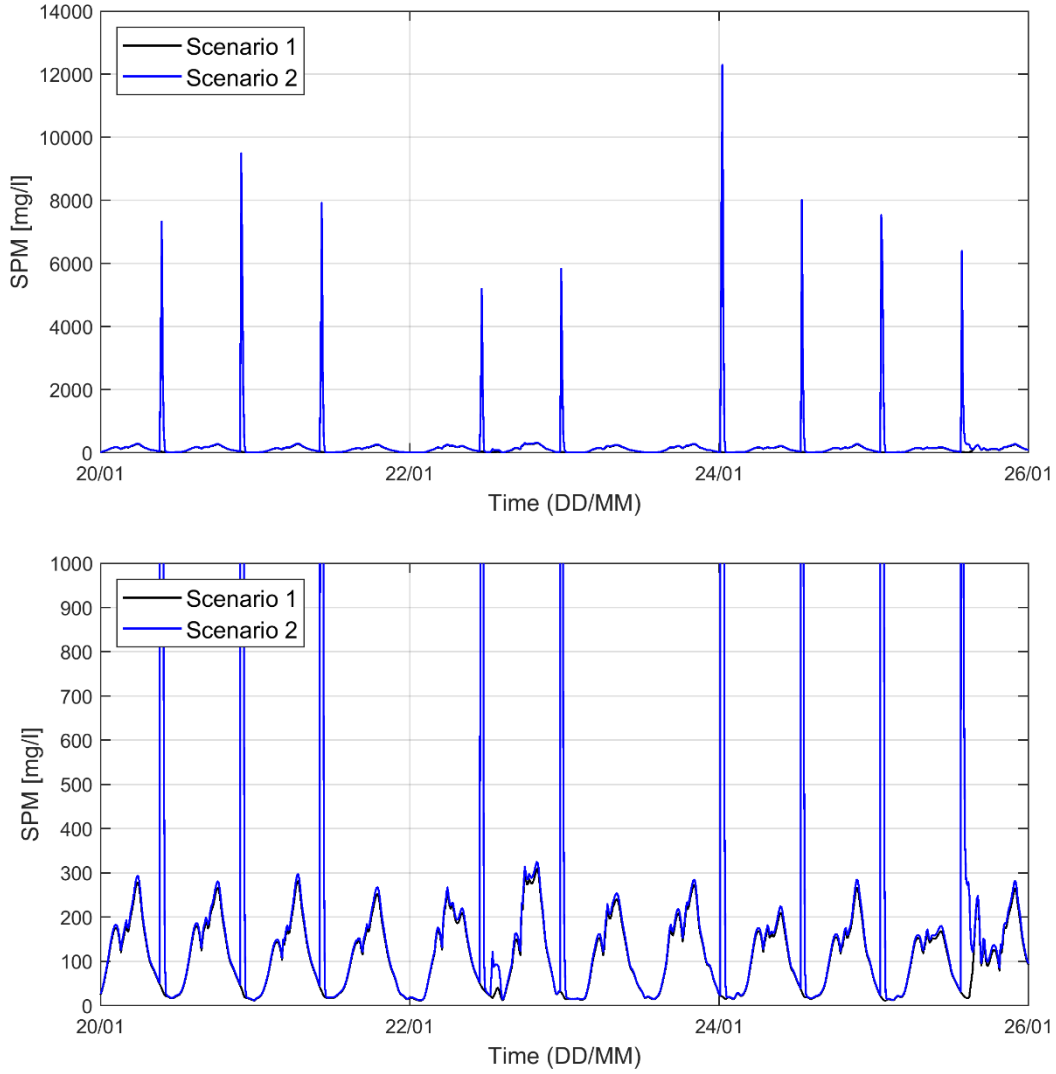
Rond de vaargeul en aan de oostkant van de vaargeul neemt de gemiddelde slibconcentratie tot 15 mg/l toe door het terugstorten van slib (zie Figuur 3.28). Dit is ongeveer 10% van de achtergrondconcentratie. Indien in het model de baggervolumes meer in overeenstemming zijn met de metingen, zal dit verschil verder toenemen. Blijkbaar verspreid het gestorte materiaal zich over de ondiepe zone ten oosten van de vaargeul. Ten westen van de vaargeul en ten oosten van het wantij van Ameland is het effect van het terugstorten van slib op slibconcentraties in de waterkolom

verwaarloosbaar klein. Het uitstralende effect van het terugstorten van slib blijft in deze simulaties dus beperkt tot de oostkant van het bekken van het Borndiep.



Figuur 3.28 Gemiddelde slibconcentratie in de waterkolom (dieptegemiddeld) over de simulatieperiode van 3 maanden voor Scenario 1 (boven) en Scenario 2 (midden), en het verschil tussen de twee scenario's (onder).

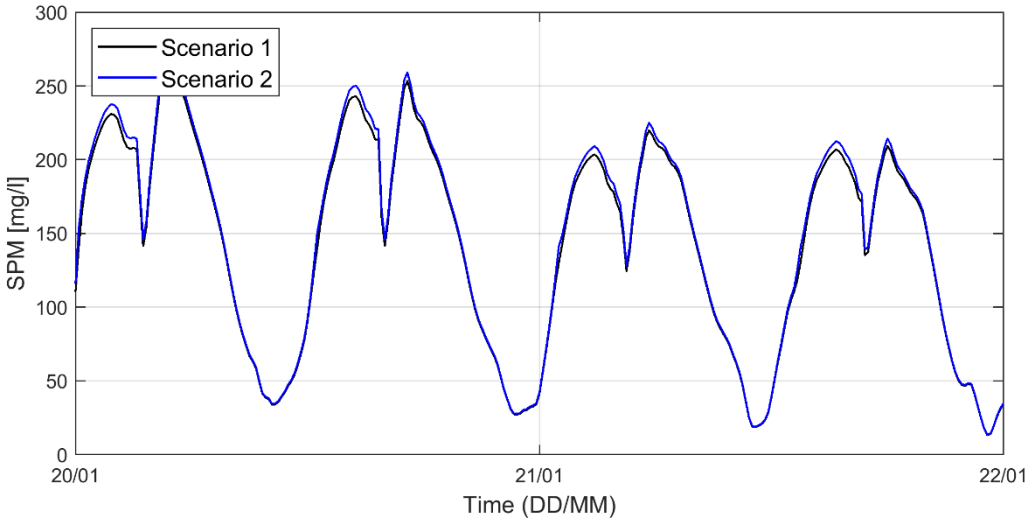
Daar waar het gebaggerde slib gestort wordt is de slibconcentratie erg hoog tijdens het storten. Dit is weergegeven in Figuur 3.29 voor de locatie waar het slib in het model op stroom wordt gezet (zie Figuur 3.27 voor de locatie). Na het storten neemt de concentratie snel weer af tot een vergelijkbare concentratie als zonder het terugstorten van slib (zie de onderste plot in Figuur 3.29). Dat de gemiddelde concentratie (Figuur 3.28) zoveel hoger is bij de stortlocatie komt dus vooral door de hoge concentraties tijdens het storten.



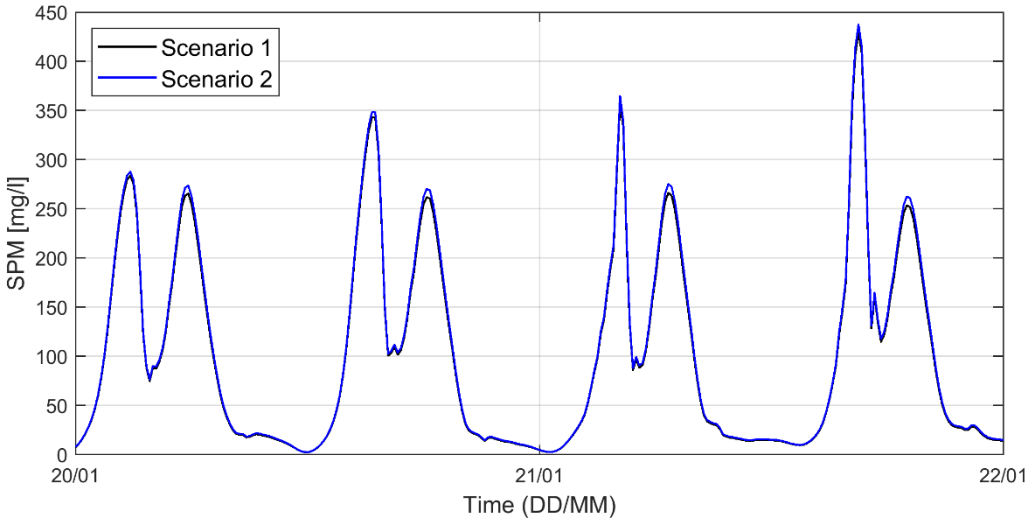
Figuur 3.29 Dieptegemiddelde slibconcentratie bij het punt waar gebaggerd slib op stroom wordt gezet, voor modelscenario's waarbij het slib niet (Scenario 1) en wel (Scenario 2) wordt teruggestort. De twee plots bevatten dezelfde informatie, alleen de verticale as verschilt.

In Figuur 3.30 en Figuur 3.31 zijn tijdseries te zien van de dieptegemiddelde slibconcentratie op twee punten in de vaargeul. Het eerste punt (Figuur 3.30) ligt in de vaargeul bij de overgang tussen baggervakken Ebgeul en Nes2 (ten westen van waar het materiaal op stroom wordt gezet, zie Figuur 3.27). Het tweede punt ligt in de vaargeul bij de veersteiger bij Holwerd. Bij het eerste punt neemt de piek in slibconcentratie tijdens eb (eerste piek in Figuur 3.30) door het terugstorten van slib meer toe dan de piek in slibconcentratie tijdens vloed. Bij het tweede punt neemt juist de piek tijdens vloed meer toe door het terugstorten. Dit is een gevolg van de gekozen verspreidingslocatie voor slib dat gebaggerd is bij Holwerd; het eerste punt ligt in ebrichting van de verspreidingslocatie en het tweede punt ligt in vloedrichting van de verspreidingslocatie. Het effect van het verspreiden

van de baggerspecie is nu nog marginaal, maar als de baggervolumes toenemen, zal het verschil ook toenemen.



Figuur 3.30 Tijdseries van de dieptegemiddelde slibconcentratie in de vaargeul bij de overgang tussen baggervakken Ebgeul en Nes2 voor modelscenario's waarbij het gebaggerde slib niet (Scenario 1) en wel (Scenario 2) wordt teruggestort.



Figuur 3.31 Tijdseries van de dieptegemiddelde slibconcentratie in de vaargeul bij de veersteiger van Holwerd voor modelscenario's waarbij het gebaggerde slib niet (Scenario 1) en wel (Scenario 2) wordt teruggestort.

3.9.3 Discussie

De modelsimulaties die hierboven zijn besproken laten een klein effect zien van het terugstorten van gebaggerd slib op de gemiddelde slibconcentraties rond de stortlocaties.

De hoeveelheid gebaggerd materiaal die wordt teruggestort op de stortlocaties is in het model een stuk kleiner (ongeveer een factor 5) dan in werkelijkheid. Hierdoor zal het berekende effect van het terugstorten op de slibconcentraties in het bekken ook een stuk lager zijn dan wat in werkelijkheid zal optreden. Kwalitatief geven de besproken resultaten dus een beeld waar het gestorte materiaal naartoe zal verspreiden. Kwantitatief is de berekende toename in slibconcentraties niet representatief voor wat in werkelijkheid verwacht mag worden als effect van het terugstorten.

Het gebruikte model is gekalibreerd op basis van slibconcentraties in de waterkolom. Daarbij zijn uniforme modelinstellingen gekozen waarmee de slibconcentraties gemiddeld over de hele Waddenzee het beste gemodelleerd kunnen worden. Bij het modelleren van bagger- en stortwerkzaamheden in een specifiek deel van het modeldomein kunnen andere modelinstellingen beter geschikt zijn. Hieronder worden een aantal mogelijke aanpassingen van de instellingen benoemd.

1. Het hier toegepaste slibmodel modelleert de zeebodem in twee lagen, namelijk een makkelijk erodeerbare S1-laag en een S2-laag of bufferlaag (Van Kessel et al., 2011). Het baggeren wordt in het model uitgevoerd vanuit de bufferlaag. De totale sedimentatieflux wordt verdeeld over de S1-laag (95%) en de bufferlaag (5%). Door de verdeling van de sedimentatieflux over de bodemlagen te veranderen, verandert de massa in de bufferlaag en dus de hoeveelheid slib die gebaggerd wordt.
2. Met de huidige instellingen erodeert er materiaal uit de S1-laag als de totale bodemschuifspanning groter is dan 0.1 N/m^2 en er erodeert materiaal uit de bufferlaag als de totale bodemschuifspanning groter is dan 0.8 N/m^2. De bodemschuifspanning in de vaargeul is bijna elke getijperiode groter dan 0.8 N/m^2, waardoor bijna elke getijperiode resuspensie optreedt vanuit de vaargeul. Dat is in werkelijkheid wellicht niet het geval. Het slib op de bodem van de vaargeul zou dan een hogere sterkte moeten hebben dan 0.8 N/m^2.
3. De slibconcentraties rond de vaarweg bij Holwerd zijn erg hoog, zeker dichtbij de bodem. Daardoor gaan processen een rol spelen die nu niet in het model zijn opgenomen (bijv. effect van slibconcentratie op de dichtheid, de vorming van *fluid mud*).

In het kader van de studie naar het baggeronderhoud in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020) zal het model voor deze toepassing geoptimaliseerd worden.

3.10 Grootte van dynamische buffers en verblijftijd

Twee vragen voorafgaande aan deze studie waren wat de verblijftijd van slib in de Waddenzee is en hoe groot de ‘dynamische pool' van slib is dat beschikbaar is voor resuspensie en transport. Deze vragen zijn bedoeld om een beter begrip te krijgen van de verdeling en dynamiek van bodemslib in de Waddenzee. De dynamische buffers geven de hoeveelheid slib weer die binnen een jaar worden afgezet en geresuspendeerd. Slibdeeltjes hebben een verblijftijd in de Waddenzee van enkele uren tot oneindig, namelijk enerzijds deeltjes die aan het einde van de vloed naar binnen worden getransporteerd en voordat ze zijn uitgezakt al weer met de eb naar buiten worden getransporteerd en anderzijds deeltjes die permanent vastgelegd worden bijvoorbeeld op kwelders. De verblijftijd is ook sterk afhankelijk van de valsnelheid van de deeltjes. Deeltjes met valsnelheid van 0 bewegen als een tracer mee in het water en hebben nabij de zeegaten een korte verblijftijd. Zwaardere deeltjes hebben meer interactie met de bodem, waardoor hun verblijftijd langer wordt.

3.10.1 Grootte van dynamische buffers van slib

De voorgaande analyses hebben al inzicht verschaft in welke processen leiden tot variaties in SPM. Zo kwam in paragraaf 3.2 naar voren dat de residuele transporten van slib in de Waddenzee sterk beïnvloed zijn door wind. Dit zou ertoe kunnen leiden dat in bepaalde periodes of jaren, meer slib in de Waddenzee accumuleert dan in andere jaren. Met het numerieke model kunnen we inzichtelijk maken waar deze tijdelijke buffers in slib zich bevinden en hoe groot deze zijn. Dit is gedaan door het moment met minimale slibhoeveelheid in de bodem af te trekken van de maximale slib hoeveelheid in de bodem. Het resultaat voor de onderlaag S2 staat in Tabel 3.6, die de maximale buffer in de twee simulaties (meteo 2016 en meteo 2017) laat zien per bekken. Voor de hele Waddenzee is de grootte van de dynamische buffer 10 tot 13 miljoen ton, gebaseerd op de twee

beschikbare jaren. Gezien de netto sedimentatie van 1 tot 2,5 miljoen ton, betekent dit dat een aantal jaren met verhoogde sedimentatie nodig zijn om een significant effect te hebben op de dynamische buffer.

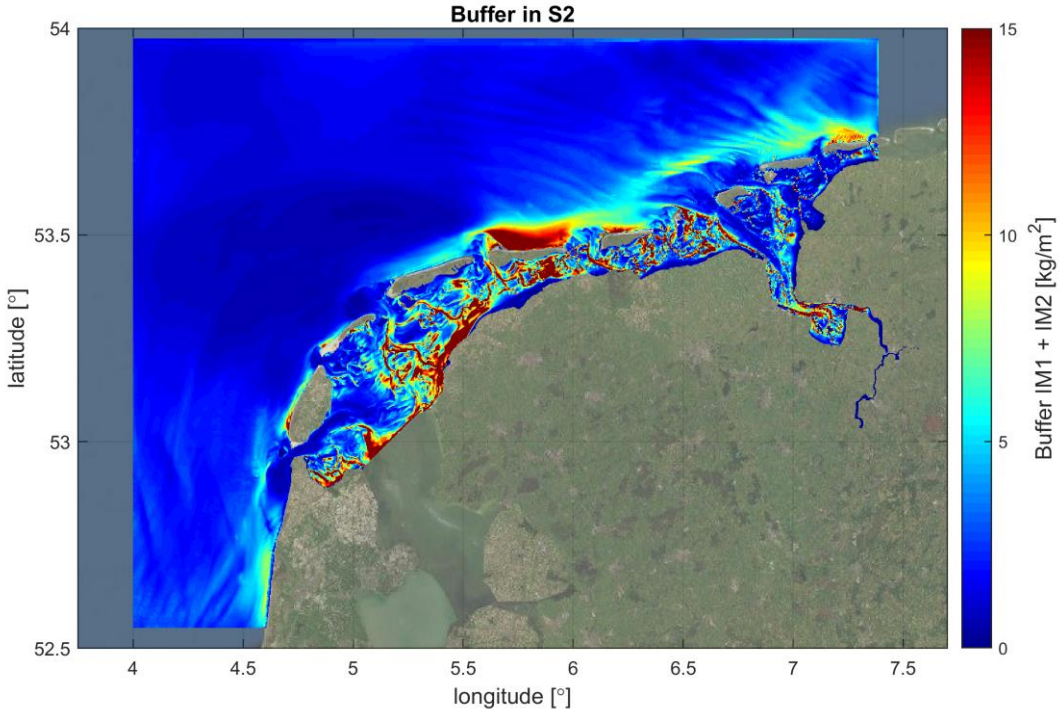
De grootte van de dynamische buffer per bekken wordt vooral bepaald door de oppervlakte van de bekkens, zo blijkt als de dynamische buffer in kg per m^2 wordt uitgedrukt. Daarbij is ook te zien dat verschil tussen de verschillende meteorologische forceringen (2016 en 2017) groter is in de oostelijke bekkens dan in het Marsdiep.

Tabel 3.6 Grootte van dynamische buffers per bekken in een periode van twee jaar met meteo van 2016 en 2017 en afzonderlijk per jaar, in totaal en per vierkante meter om het effect van de bekkenoppervlakte te verdisconteren. De grootte van tijdelijke sedimentbuffers is bepaald als het verschil tussen de maximale en de minimale hoeveelheid slib (IM1 + IM2) in de bufferlaag.

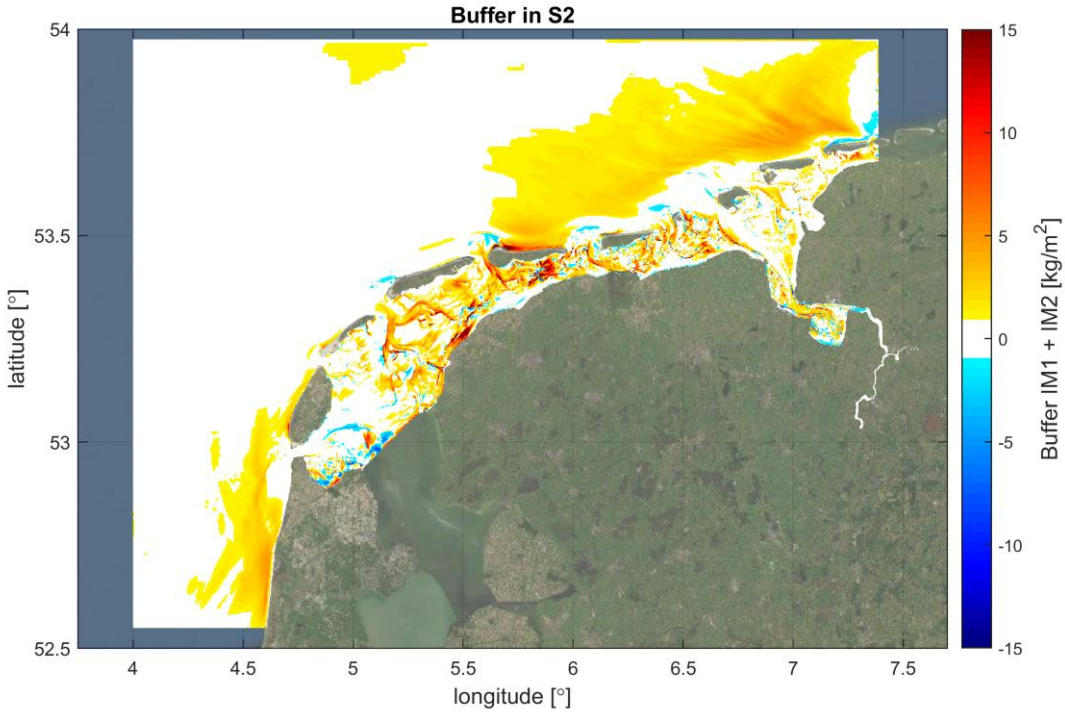
	Grootte van dynamische buffers per bekken in miljoen ton (= 1*10^9 kg)		**Grootte van dynamische buffers per bekken in kg per m^2**	
	Meteo 2016	Meteo 2017	Meteo 2016	Meteo 2017
Marsdiep	3,6	3,3	5,1	4,7
Eierlandse Gat	0,44	0,33	2,6	2,0
Vlie	5,1	3,8	7,5	5,6
Borndiep	2,5	1,7	7,5	5,1
Friesche Zeegat	1,5	1,1	7,0	5,1
Totaal	**13,1**	**10,3**		

Uit Figuur 3.32 blijkt dat veel slib wordt geborgen bij de Oude Vlieter en in het Kimstergat, ten noorden van Harlingen. Dit komt overeen met gebieden die in de data-analyse van het bodemslibgehalte (Colina Alonso, 2020) naar voren kwamen als grote slibputten, waar de afgelopen decennia veel slib is afgezet. Daarnaast zien we een grote buffer op het wantij van Ameland en de oostzijde van de buitendelta van Ameland. Zoals ook bij de modelkalibratie is aangegeven, zouden de resultaten in het bekken van Ameland ook beïnvloed kunnen zijn door de fijne geulpatronen die maar beperkt terugkomen in de relatief grove roosterresolutie. De oostzijde van buitendelta van Ameland is in het model waarschijnlijk wat meer beschermd tegen golfwerking door de strijklengteaanpak voor golven, die geen golfpropagatie berekend. Maar een tijdelijke slibbuffer hier zou in werkelijkheid ook aanwezig kunnen zijn, aangezien bij de SEAWAD meetcampagne (Pearson et al., 2020) hier slibrijk sediment is gevonden.

Als de tijdelijke buffers in de simulatie met meteo uit 2016 (waarin meer slib accumuleert dan in 2017) en de simulatie met meteo uit 2017 worden vergeleken (Figuur 3.33), blijkt dat de dynamische buffers in 2016 op veel plaatsen groter zijn. Dit volgt ook uit de totale hoeveelheden per bekken in Tabel 3.6. De grootste buffers (rode gebieden in Figuur 3.32) liggen aan het einde van het Kimstergat en op het wantij van Ameland. Als de zone rondom het wantij van Ameland inderdaad karakteristieken heeft die ertoe leiden dat hier een dynamische slibbuffer aanwezig kan zijn, heeft dit mogelijk een groot effect op het baggerbezwaar in de vaargeul Holwerd-Ameland. In de buurt van de Afsluitdijk lijkt in 2017 juist een wat grotere buffer te zijn.



Figuur 3.32 Tijdelijke sedimentbuffers in een periode van twee jaar met meteo uit 2016 en 2017. De grootte van tijdelijke sedimentbuffers is bepaald als het verschil tussen de maximale en de minimale hoeveelheid slib (IM1 + IM2) in de bufferlaag.



Figuur 3.33 Verschil tussen tijdelijke sedimentbuffers (IM1 + IM2) in een simulatie met meteo uit 2016 en een simulatie met meteo uit 2017. Positieve waarden geven aan dat de tijdelijke slibbuffers in 2016 groter zijn.

3.10.2 Verblijftijd van slib in de Waddenzee

Een eerste inschatting van de gemiddelde verblijftijd van slib in de Waddenzee kan worden gemaakt aan de hand van de verhouding tussen de slibtransporten en de hoeveelheid slib in de bodem. Het cumulatieve bruto slibtransport door de zeegaten over het jaar 2017 bedraagt 115 miljoen ton, dat is de hoeveelheid slib die elke getijcyclus de Waddenzee in stroomt geaccumuleerd over een jaar en die is bijna gelijk aan de hoeveelheid slib die de Waddenzee bij eb weer uitstroomt. De netto sedimentatie in de Waddenzee, veroorzaakt door slib vanaf zee en niet vanaf de zoetwaterafvoeren, in het jaar 2017 bedraagt 0,51 miljoen ton. Voor de bepaling van de verblijftijd kan de bruto of netto slibflux worden gehanteerd; de werkelijke verblijftijd ligt er tussenin. Ook kan de verblijftijd worden bepaald door al het slib in het model mee te nemen, of alleen de hoeveel 'dynamisch slib'. Om de bandbreedtes van de verblijftijd te bepalen worden enerzijds de bruto slibflux in combinatie met de totale hoeveelheid slib in de Waddenzee gebruikt voor een ondergrens en anderszijds de netto slibflux in combinatie met de hoeveelheid dynamisch slib in de Waddenzee voor een bovengrens.

Er is een aantal onzekerheden om rekening mee te houden bij de interpretatie van de gemiddelde verblijftijd. Ten eerste is de bepaling van de gemiddelde verblijftijd is heel gevoelig voor de gemiddelde aanwezige massa slib in de bufferlaag (bodemlaag S2). Bij een verdubbeling van de massa in de bufferlaag zal ook de verblijftijd verdubbelen. De maximale massa in de bufferlaag is afhankelijk van modelinstellingen (zoals de porositeit en de laagdikte) die ten tijden van de kalibratie zijn vastgesteld om het model in dynamisch evenwicht te krijgen. Het model is niet expliciet gekalibreerd op de verblijftijd. Daarnaast kunnen de netto slibtransporten sterk verschillen per jaar. Dit is niet zozeer een onzekerheid die voortkomt uit het model, maar een weerspiegeling van de natuurlijke fluctuaties in de Waddenzee (bijvoorbeeld als gevolg van meteorologische condities).

Op basis van de huidige modelresultaten (en dus onder voorbehoud van de aannames in de huidige modelopzet) is de ondergrens voor de gemiddelde verblijftijd van slib in de Waddenzee afgerond 166 dagen, uitgaande van de bruto slibtransporten (115 miljoen ton per jaar) en de totale hoeveelheid slib in de bufferlaag (51.9 miljoen ton). Het verschil tussen de slibfracties is groot: de zwaardere fractie (IM1) heeft een gemiddelde verblijftijd van 257 dagen, terwijl de lichtere fractie slechts gemiddeld 61 dagen in de Waddenzee verblijft. Dit komt doordat de grovere fractie veel meer interactie met de bodem heeft, en de verblijftijd van de lichte fractie veel meer richting de verblijftijd van water gaat. Als gevolg van het grote verschil tussen het bruto en het netto slibtransport, is de bovengrens voor de gemiddelde verblijftijd op basis van de netto slibtransporten (0.51 miljoen ton per jaar) en de dynamische hoeveelheid slib in de Waddenzee (10.3 miljoen ton) 20 jaar. De werkelijke verblijftijd zal tussen deze ondergrens en bovengrens in liggen. Vermoedelijk geldt op dynamische gedeeltes nabij de zeegaten een kortere verblijftijd (orde grootte één jaar) en in laagdynamische gebieden, zoals de vastelandskwelders, een verblijftijd die vele malen groter is (orde grootte tien jaar).

Ter referentie wordt de geschatte verblijftijd op basis van modelresultaten vergeleken met waarden uit literatuur. Er is niet veel bekend over de verblijftijd van slib in de Waddenzee. Wel zijn er tracerstudies gedaan die ter indicatie kunnen dienen. Een studie waarbij de verblijftijd van een loodisotoop (Pb-210) in de bodem van de Waddenzee op basis van in situmetingen als tracer voor sediment transport gaf een gemiddelde verblijftijd van 43 dagen (Eisma et al, 1989*).* Dit geeft een goede indicatie voor de orde grootte van de verblijftijd voor de lichtere fractie, aangezien Pb-210 een deeltjesgrootte heeft < 10µm. Laane et al. (1999) geeft op basis van tracerstudies van metalen (Cd, Pb, Zu en Cu), Polychloorbifenyl (PCBs) en Polycyclische Aromatische Koolwaterstoffen (PAKs) een inschatting van de mediane verblijftijd van slib (fractie < 63 µm) in de toplaag van de bodem in de Nederlandse kustzone van orde grootte 1.9 jaar. In deze studie is de Waddenzee echter niet meegenomen. Wel valt op dat de berekende verblijftijd van slib in de Waddenzee op basis van de jaarlijkse bruto slibtransporten uit het model een stuk lager ligt (166 dagen), vermoedelijk omdat er veel meer intergetijdegebied aanwezig is in de Waddenzee. Tot slot heeft Verhagen (1990) met een fysisch mengmodel de tijd bepaald die benodigd is voor een SPM-deeltje om de weg af te leggen van het meest westelijke gedeelte van de Waddenzee (kombergingsgebied

Marsdiep) naar de Oostelijke Waddenzee (kombergingsgebied Eems). Dit resulteerde in een reistijd van ongeveer 26 jaar. Dat geeft nuttige inzichten, maar aangezien er ook deeltjes via de andere zeegaten worden geëxporteerd, is het geen representatieve waarde voor de gemiddelde verblijftijd.

3.11 Conclusie

De modelstudie heeft ons belangrijke inzichten verschaft in de mogelijke oorzaken van fluctuaties in SPM op middellange termijn (jaren) en seizoenen:

- Het seizoensignaal, met hogere SPM in de winter en lage SPM in de zomer, lijkt voornamelijk te worden veroorzaakt door golfwerking, zowel in de Waddenzee als op de Noordzee. In de winter zijn de golven hoger én treden meer stormen op, waarbij het eerst effect het belangrijkst is. Op plekken nabij de zeegaten lijkt er ook een na-ijl effect te zijn van stormen van enkele dagen waarbij het SPM verhoogd blijft. Verder in de Waddenzee en op ondiepere locaties is dit effect minder sterk. Maanden met verschillende wind-/golfwerking leiden daardoor tot verschillende SPM concentraties.
- Wind heeft naast het veroorzaken van golven ook effect op de transporten in de Waddenzee. Bij wind is dus niet alleen de windsterkte, maar ook de windrichting van belang. Als de wind over slibrijk intergetijdengebied waait, kan dit tot meer transport leiden dan bij sterkere wind (en dus hogere golven) uit een richting waarbij de wind niet over slibrijk intergetijdengebied blaast. Dit sluit aan bij observaties voor de slibmotor in Colosimo et al. (2020).
- Doordat wind een groot effect heeft op de resttransporten, heeft dit ook grote impact op de netto slibsedimentatie in de bekkens. Twee simulaties die enkel verschillen in meteorologische forcering hebben na een jaar bijna een factor 3 verschil in netto slibsedimentatie over de gehele Waddenzee. Dit bleek uit de slibbalans en betekent dat er jaren zijn waarbij meer slib in de Waddenzee accumuleert dan in andere jaren. Wij stellen de hypothese dat dit gedrag op langere termijn, wanneer er enkele jaren zijn met meer import, kan leiden tot verhoogde SPM-waardes.
- De watertemperatuur heeft een verwaarloosbaar effect op de slibdynamiek in de Waddenzee, en leidt tot beperkte invloed op de verticale SPM-profielen in de Noordzee.
- Hoewel in de Noordzee er seizoenale verschillen zijn in verticale menging van het slib, wordt dit effect ook in de Noordzee overschaduwd door golf-resuspensie. Hiermee is deze hypothese uit Herman et al. (2018) gefalsificeerd.
- De zoetwaterafvoer heeft zoals bekend een groot effect op de import van slib in de Waddenzee via estuariene circulatie, maar een verwaarloosbaar effect op de seizoensfluctuatie. Dit is het gevolg van de relatief trage verandering van de saliniteitsgradienten in de Waddenzee als gevolg van seizoensveranderingen in het spuiregime (meer spuien in de winter dan in de zomer). Het modelmatige gedrag van export van brak water vanaf de Afsluitdijk tijdens events lijkt in vergelijkbare mate gemeten te zijn tijdens de SEAWAD meetcampagne.
- De variatie van SPM op de Noordzee is ook op de modelranden opgelegd, maar het effect hiervan is binnen een jaar heel klein ten opzichte van een modelsimulatie met tijdsconstante SPM. Dit onderstreept dat ook in de Noordzee de lokale golf-gedreven resuspensie dominant is. Op de langere termijn (orde jaren – decennium) kan een verandering in SPM op de Noordzee wel doorwerken in de Waddenzee, zo is in eerdere studies aangetoond (Sittoni et al., 2012).
- Microfytobenthos kan mogelijk de seizoensfluctuatie in SPM versterken. In het huidige model werd de seizoensfluctuatie redelijk goed gereproduceerd, als gevolg van de kalibratie van het slibmodel voor dit gedrag via de golf-gedreven resuspensie en dus zonder de invloed van microfytobenthos expliciet mee te nemen. Testen met een voor dit project ontwikkelde software-implementatie voor de groei van microfytobenthos en het effect op slib (volgens werk van Elena Bastianon, Universiteit van Hull en Pivato et al., 2018) gaf

voor een geschematiseerd bekkenmodel in 2D een reductie van 30-70% in SPM. Verdere toepassing van dit proces vereist velddata o.a. van de microfytobenthosgroei en haar impact op de erosieresistentie in de Waddenzee.

- Met het model zijn de dynamische buffers van slib in beeld gebracht. Deze blijken zich deels te vinden op plekken waar ook uit data-analyse blijkt dat er lange termijn slibsedimentatie is opgetreden (Colina Alonso, 2020). Ook is er een buffer bij het wantij van Ameland, wat zeer relevant kan zijn voor het slibprobleem bij de vaargeul van Holwerd-Ameland.

Daarnaast hebben we de volgende bevindingen met betrekking tot inzet van het model om het effect van baggeren en verspreiden te bepalen:

- Het referentiemodel heeft geen effect van baggeren en verspreiden berekend, omdat die functionaliteit tijdens de modelkalibratie nog niet beschikbaar was. Voor het project Evaluatie Bochtafsnijding Holwerd – Ameland (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020) is het KRW-model verfijnd en de software uitgebreid om het effect van baggeren en storten te kunnen doorrekenen. Uit die studie blijkt dat het verspreiden van slib lokaal een grote invloed heeft op het SPM. Op schaal van de Waddenzee is dit effect kleiner. Het model heeft een herkalibratie nodig om de baggervolumes bij Holwerd (en waarschijnlijk ook op andere plekken) beter te reproduceren.
- Inzet van het binnen dit project ontwikkelde model voor een andere toepassing (i.e. evaluatie stortstrategieën bij de vaargeul Holwerd-Ameland; Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020) illustreert dat herkalibratie van een model nodig kan zijn indien het model wordt vergeleken met nieuwe/andere metingen. Hoe meer veldobservaties er beschikbaar zijn, hoe kleiner de speelruimte voor de parameterinstellingen van het slibmodel. Dit onderstreept de noodzaak van metingen voor modelontwikkeling, zoals eerder ook aangegeven in het kalibratierapport (Vroom et al., 2020) en bij de microfytobenthosstudie (bijlage A).

4 Het beïnvloeden van de slibhuishouding in de Waddenzee: een gevoeligheidsanalyse

4.1 Introductie

Slib is een gegeven in de Waddenzee. Op veel plekken speelt slib een belangrijke rol in de bodemopbouw en voor de ecologie. Op andere plekken wordt echter overlast ervaren van slib. In de toekomst, met een versterkte zeespiegelstijging, kan slib een belangrijke rol spelen in het meegroeien met de zeespiegel. Tegelijkertijd willen we een gezond ecosysteem houden en willen we niet te veel overlast van slib ervaren. Het is de vraag in hoeverre de hoeveelheid slib in de verschillende delen van de Waddenzee is te sturen, bijvoorbeeld door het buiten- of binnendijks vastleggen of onttrekken van slib, of door een ander baggerbeheer.
Dergelijke scenario's zijn en worden al onderzocht voor de Eems-Dollard (bijv. Deltares 2020) waar met name in de Dollard de concentraties slib flink hoger zijn dan gemiddeld genomen in de Waddenzee.

Naast het eventuele verminderen van slib speelt er vanuit de PAGW ook de wens om de randen van het wad te verzachten. Dit kan gedaan worden aan de hand van verschillende maatregelen waarbij intergetijdengebied wordt toegevoegd aan de buitendijkse of de binnendijkse zijde. Dit type ingrepen kan mogelijk een behoorlijk effect hebben op de slibhuishouding van de Waddenzee.

Voor de Waddenzee is met gevoeligheidsscenario's onderzocht welke invloed uitgeoefend kan worden op de slibhuishouding d.m.v. verschillende grootschalige ingrepen waarbij de randen van het wad worden verzacht. Hiervoor is op voorhand de keuze gemaakt om zeer theoretische ingrepen in de modelschematisaties in te bouwen, om de gevoeligheid van het waddensysteem daarop te onderzoeken. De ingrepen zijn niet-realistisch, omdat op geen enkele manier rekening is gehouden met de aanwezige waarden en belangen in de gebieden waar de ingrepen zijn gelokaliseerd. Ze moeten dus niet worden gezien als uitvoerbare ideeën, maar puur voor het onderzoek naar de gevoeligheid van de slibhuishouding in het Waddensysteem voor dergelijke (maximale) ingrepen.

4.2 Gevoeligheidsscenario's

4.2.1 Drie scenario's

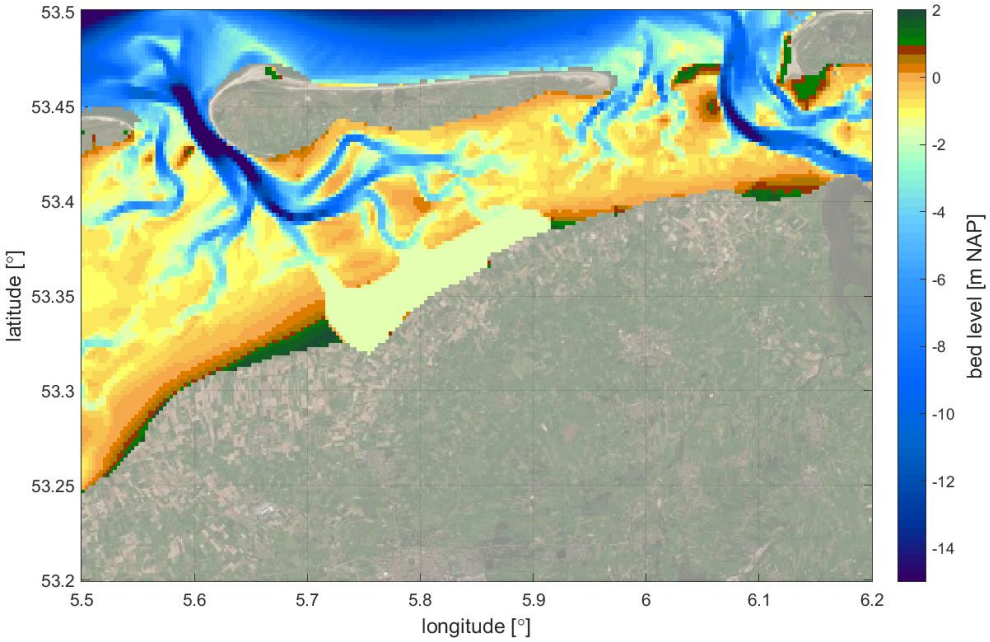
De drie gevoeligheidsscenario's die zijn onderzocht met het slibmodel zijn alle drie scenario's waarbij een grote "slibvang", in de vorm van een gebied waar netto sedimentatie van slib plaatsvindt, is toegevoegd aan de Waddenzee. De drie gevoeligheidsscenario's zijn:

1. Afgraven van kweldergebied Friesland Buitendijks bij het kombergingsgebied Borndiep, tot 0,5 m onder gemiddeld laagwater zodat er voldoende water naar binnen kan en het gebied altijd onder water staat;
2. Verbinden van binnendijks gebied, ter hoogte van de locatie zoals genoemd bij het eerste scenario, met de Waddenzee, via een toegangsgeul die aansluit op bestaande getijdegeul. De omvang van de verbindingsgeul wordt bepaald uit de evenwichtsrelaties voor getijdegeulen in het Waddengebied[4]. Binnendijkse gebied afgraven tot 0,5 m onder gemiddeld laagwater.

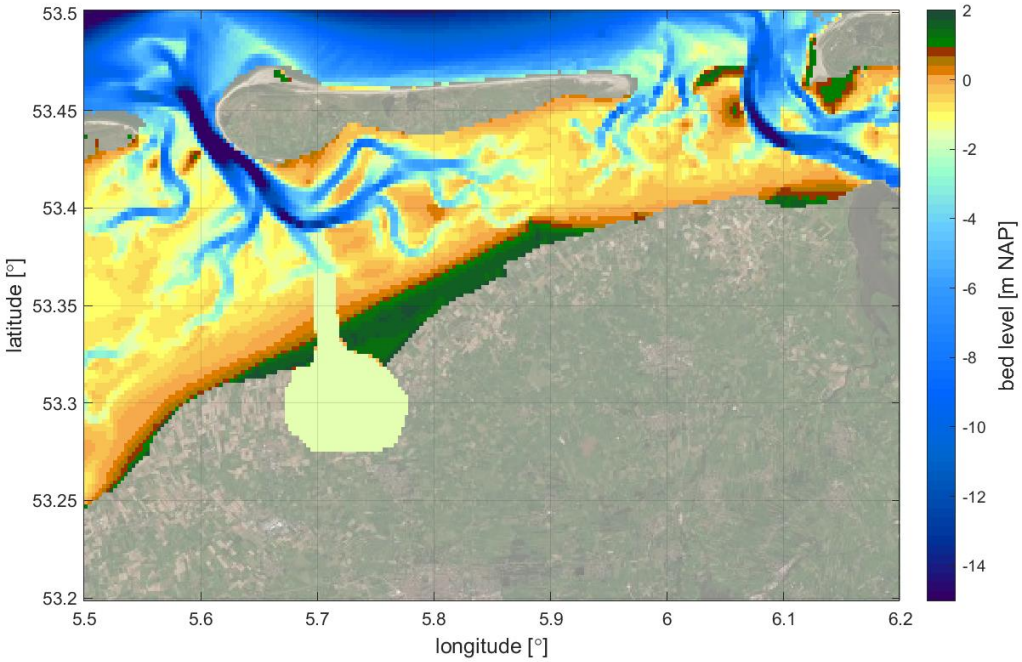
[4] Volgens Eysink (1990) is de relatie $A = a*P^m$, met A de natte doorsnede van de geul en P het getijprisma en a is voor de Waddenzee $7*10^{-5}$ en m=1. Als een ingreep een oppervlakte heeft van 25 km^2 en een getijslag van 2 m, dan wordt $A = 7*10^{-5} * 2 * 25 * 10^6 = 3500\ m^2$. Als de bodem op -0.5 m GLW ligt (ongeveer -1.7 m NAP), dan heeft de geul een breedte van ca. 2 km. Dit zijn ongeveer 10 roostercellen.

3. Verbinden van binnendijks gebied, ten zuiden van Harlingen met de Waddenzee, via een toegangsgeul die aansluit op bestaande getijdegeul. Binnendijkse gebied afgraven tot 0,5 m onder gemiddeld laagwater.

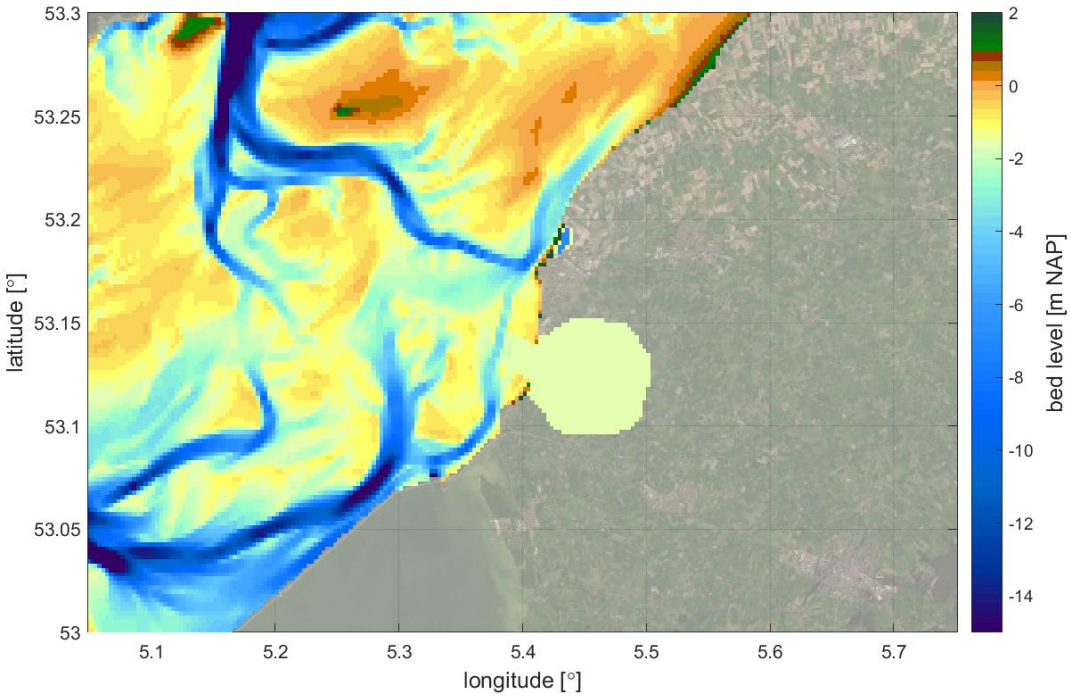
Deze scenario's zijn visueel weergegeven in Figuur 4.1 t/m 4.3.



Figuur 4.1 Bodemligging voor gevoeligheidsscenario 1: afgraven buitendijkse kwelders en wadplaat. Om in het gebied vergelijkbare getijdynamiek te laten plaatsvinden als in de rest van de Waddenzee, zijn er 3 geulen toegevoegd die het afgegraven gebied verbinden met aanwezige getijgeulen.



Figuur 4.2 Bodemligging voor gevoeligheidsscenario 2: afgraving binnendijks gebied bij Zwarte Haan. Er is een toegangsgeul toegevoegd die het afgegraven gebied verbindt met een aanwezige getijgeul.



Figuur 4.3 Bodemligging voor gevoeligheidsscenario 3: afgraving binnendijks gebied bij Harlingen. Er is een toegangsgeul toegevoegd die het afgegraven gebied verbindt met een aanwezige getijgeul.

De drie scenario's zijn gekozen met vergelijkbare omvang van het slibsedimentatiegebied. Er wordt verwacht dat bij deze omvang de slibhuishouding in de Waddenzee significant wordt beïnvloed. Er wordt in het model een gebied verlaagd tot 0,5 m. onder het niveau van laagwater. Doordat het gebied altijd onder water staat, vindt er geen droogvallen en onderstromen plaats, zodat de simulaties daar niet door worden beïnvloed. Omdat er geen morfologische veranderingen in het model worden berekend, ontstaan er in het model ook geen ophogende en daardoor droogvallende gebieden. Voor deze eerste verkenningen is het voldoende om het op deze manier op te pakken. Morfologische veranderingen zijn echter wel belangrijk en gaan de ontwikkeling van de effecten ook beïnvloeden. Een volgende stap kan daarom zijn om de morfologische effecten wel mee te nemen.

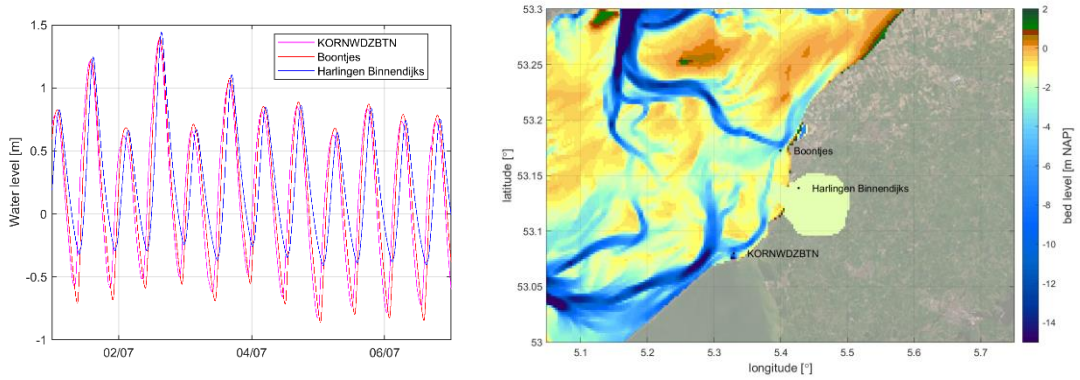
4.2.2 Verschillen tussen scenario's

Het belangrijke verschil tussen scenario 1 en 2 is dat voor het eerste scenario een verbinding door het intergetijdengebied wordt aangelegd tussen het afgegraven gebied en de Waddenzee en voor het tweede scenario een verbinding door de kwelder en de dijk omdat het af te graven gebied in scenario 2 binnendijks ligt. Het belangrijke verschil tussen scenario's 2 en 3 is dat 2 aansluit op het kombergingsgebied Borndiep en 3 op het kombergingsgebied Marsdiep. Daarnaast wordt het derde scenario in sterkere mate beïnvloed door de zoetwaterbel bij de Afsluitdijk. De slibgehaltes in de waterkolom van het Borndiep zijn gemiddeld hoger dan die in het Marsdiep. Door deze keuzes wordt onderzocht wat de gevolgen zijn van de wijze van verbinden van het slibsedimentatiegebied met de Waddenzee en wordt een eerste gevoel gekregen van het effect van de locatiekeuze.

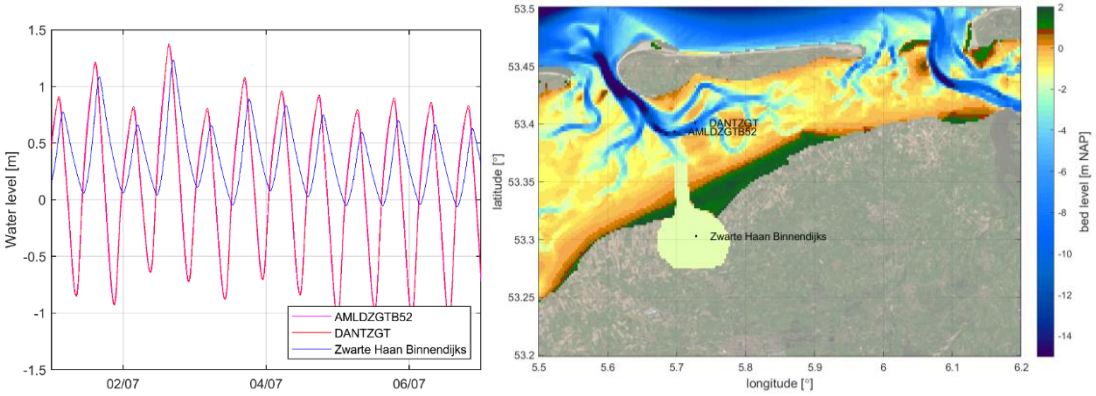
4.2.3 Omvang verbindingsgeulen

De dwarsdoorsnede van de verbindingsgeulen wordt vastgesteld op basis van de evenwichtsrelaties voor de geulen in de Wadden. Het is belangrijk dat de geulen voldoende groot zijn, zodat de aanvoer van water (met slib) ongehinderd kan plaatsvinden. Maar de geulen moeten ook niet te groot worden, omdat ze dan zelf als slibvang gaan functioneren. Om vast te stellen of de aan- en afvoer van het water goed verloopt worden de waterstanden binnen en buiten de slibvangslibvangen vergeleken. In Figuur 4.4 worden voor scenario 3 de waterstanden binnen en buiten vergeleken. Omdat de hoogwaterstanden binnen vrijwel hetzelfde zijn als buiten en omdat

slechts een kleine verschuiving in de tijd plaatsvindt van de waterstandscurves binnen en buiten wordt voor dit scenario geconcludeerd dat de verbindingsgeul voldoende groot is. Voor scenario 1 is bij check hetzelfde geconstateerd. Bij scenario 2 Zwarte Haan Binnendijks neemt de laagwaterstand in de slibvang minder af dan in de Waddenzee en ook minder dan in scenario 1, zoals zichtbaar is in Figuur 4.5. Dit betekent dat de getijvolumes van de drie slibvangen verschillend zijn, wat bij de interpretatie van de resultaten in het achterhoofd moet worden gehouden.



Figuur 4.4 Getijslag voor scenario 3 Harlingen Binnendijks (blauw), Boontjes (rood) en Kornwerderzand buiten (magenta) in de linkerfiguur. Locatie van deze stations in de rechterfiguur.



Figuur 4.5 Getijslag voor scneario 2 Zwarte Haan Binnendijks (blauw), het zeegat (rood) en de geul Dantziggat (magenta).

De uitkomsten van deze berekeningen kunnen worden gebruikt om te beredeneren wat andere ingrepen, met andere en mogelijk meer realistische dimensies en locaties, betekenen voor de slibhuishouding in de Waddenzee. Deze mogelijke ingrepen kunnen vervolgens ujteraard ook met het model worden doorgerekend om meer inzicht in de effecten te krijgen.

4.3 Type uitkomsten van modelsimulaties

De modelsimulaties van de slibsedimentatiegebieden geven als uitkomst de veranderingen in de waterbeweging en de slibdynamiek, in dit geval de hoeveelheden slib in de bodem en in het water. Het model geeft niet weer welke morfologische veranderingen zullen optreden door de ingreep, hierbij gaat het vooral om de morfologische veranderingen zoals sedimenterende of eroderende geulen en platen. Morfologische veranderingen in de Waddenzee zijn wel te verwachten, onder andere omdat de toevoeging van de slibsedimentatiegebieden betekent dat de omvang van de kombergingsvolumes toe zal nemen. Bij een groter kombergingsvolume horen grotere geulen en een afname van de platen waar de geulen groter worden. De herverdeling van sediment die hierbij optreedt kan niet met het slibmodel worden berekend. Dit kan wel worden berekend met morfologische modellen (dat kunnen modellen zijn als ASMITA, waarbij de geulen en platen worden

geaggregeerd tot enkele eenheden, maar het kan ook met Morfologische Delft3D modellen met de bestaande bodemligging).

Ook de morfologische veranderingen in de slibsedimentatiegebieden zelf, die optreden doordat slibsedimentatie plaatsvindt, worden niet met het model berekend maar omdat de hoeveelheid slib in de bodem wel wordt berekend kan er wel iets gezegd worden over de laagdikte van slib in het sedimentatiegebied . Voor de gevoeligheidsberekeningen, die betrekking hebben op de directe effecten van maatregelen op de slibhuishouding, zijn de effecten op de morfologie via het kombergingsvolume niet direct van belang. Hier spelen andere tijdschalen. Daarom wordt dit in deze studie niet nader beschouwd. Dit laat onverlet dat bij een nadere analyse deze effecten op de Waddenzee wel goed geanalyseerd moeten worden.

Vragen over de grootte van kombergingsgebieden en veranderingen daarin komen bij veel verkennende projecten aan de orde. Hoewel de morfologische veranderingen niet berekend kunnen worden met het nieuwe slibmodel, Helpen de resultaten wel bij het beantwoorden van deze vragen.

Een wijze van het invangen van slib uit de Waddenzee is het uitbreiden van de kwelderwerken. In de gevoeligheidsscenario's is echter geen uitbreiding van de kwelderwerken opgenomen, omdat de gevolgen van dit type ingreep goed kunnen worden berekend op basis van waarnemingen en metingen die al sinds lange tijd worden uitgevoerd aan kwelders. Met de gemeten opslibbingssnelheden kan het effect van nieuwe kwelderwerken op de slibhuishouding worden bepaald. Het is ook mogelijk om de sedimentatie in nieuwe kwelders voor de betreffende locatie te berekenen met een gedetailleerd model, zoals voor de plannen bij Striep op Terschelling is gedaan (Perk, 2016).

4.4 Resultaat gevoeligheidsscenario 1: afgraving buitendijkse kwelder en wadplaat bij Zwarte Haan

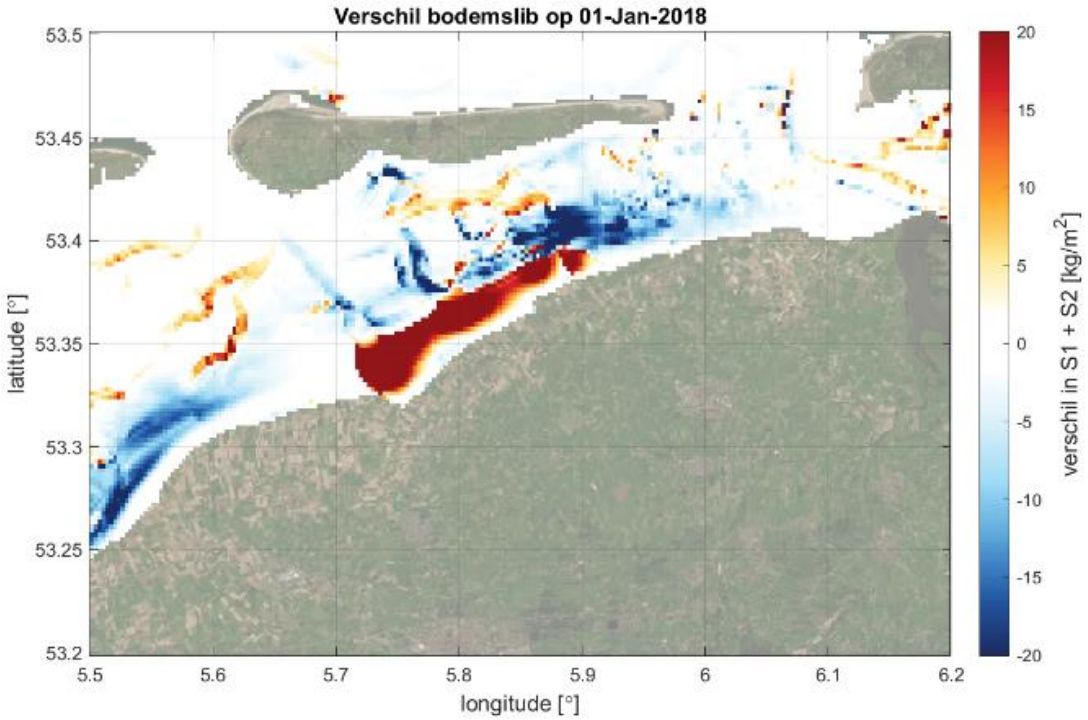
4.4.1 Het scenario

In gevoeligheidsscenario 1 is een slibvang toegevoegd aan het kombergingsgebied Borndiep. De slibvang is gecreëerd door het kweldergebied Friesland Buitendijks en delen van de voorliggende wadplaten tot 0,5 m onder gemiddeld laagwater af te graven. Deze slibvang is met drie geulen verbonden met de nabijgelegen Waddenzee. De bodem van de geulen ligt, net als het afgegraven gebied, op een hoogte van 0,5 m onder gemiddeld laagwater.

4.4.2 Sedimentatie en slib in de bodem

De resultaten van de berekeningen in Figuur 4.7 laten zowel de autonome ontwikkeling zien als het effect van de ingreep. In deze figuur is te zien dat het afgegraven gebied inderdaad functioneert als een slibvang: in grote delen van het afgegraven heeft omvangrijke slibsedimentatie plaatsgevonden. in de bovenste lagen van de bodem. De sedimentatie in de slibvang bedraagt 820 miljoen kg. De gemiddelde laagdikte van het slib in de slibvang bedraagt 5,5 cm na één jaar doorrekenen (Tabel 4.1). In Figuur 4.6 is tevens goed te zien dat de dikte van de sliblaag varieert over het gebied van de slibvang.

De grootste laagdikte is aanwezig nabij de Waddenzee en een laagdikte van nul aan de vastelandszijde. Dit betekent dat het model voorspelt dat het slib vrij snel bezinkt en sedimenteert bij het binnenkomen van het sedimentatiegebied. Het model houdt echter geen rekening met de kleinste slibfracties. In werkelijkheid verwachten we dat een deel van het slib, met name de kleinste fractie, ook in het gebied meer landwaarts zal sedimenteren.. De berekeningen zijn bedoeld om een gevoel te krijgen voor het effect van ingrepen. Bij concrete plannen voor ingrepen zou het goed zijn om hier beter naar te kijken en bijvoorbeeld meerdere slibfracties in het model te betrekken.



Figuur 4.6 Verandering in bodemslib na één jaar voor gevoeligheidsscenario 1, waarbij rood-oranje kleurtinten een toename in bodemslib (aanwezigheid van slib in de bodemlagen die in het model S1 en S2 worden genoemd) over het jaar aangeven en blauwe kleuren een afname.

Tabel 4.1 Sedimentatie en erosie na één jaar voor gevoeligheidsscenario 1 binnen de slibvang (A) en daarbuiten (1-4), vergeleken met de referentiesituatie zonder slibvang.

Grootheid	**Totale massaverschil t.o.v. referentie [miljoen kg]**	**Gem. massaverschil bodemsediment t.o.v. referentie [kg/m^2]**	**Gem. verschil bodemhoogte in afgegraven gebied [cm]**
A. Netto sedimentatie binnen slibvang	820	27,3	5,5
1. Bruto sedimentatie	1050	0,25	0,051
2. Bruto erosie	1120	0,21	0,041
3. Netto erosie (=2-1)	60	0,01	0,001
4. Netto erosie op locaties waar schuifspanning toenam	260	0,06	0,011

4.4.3 Verschil referentie en scenario

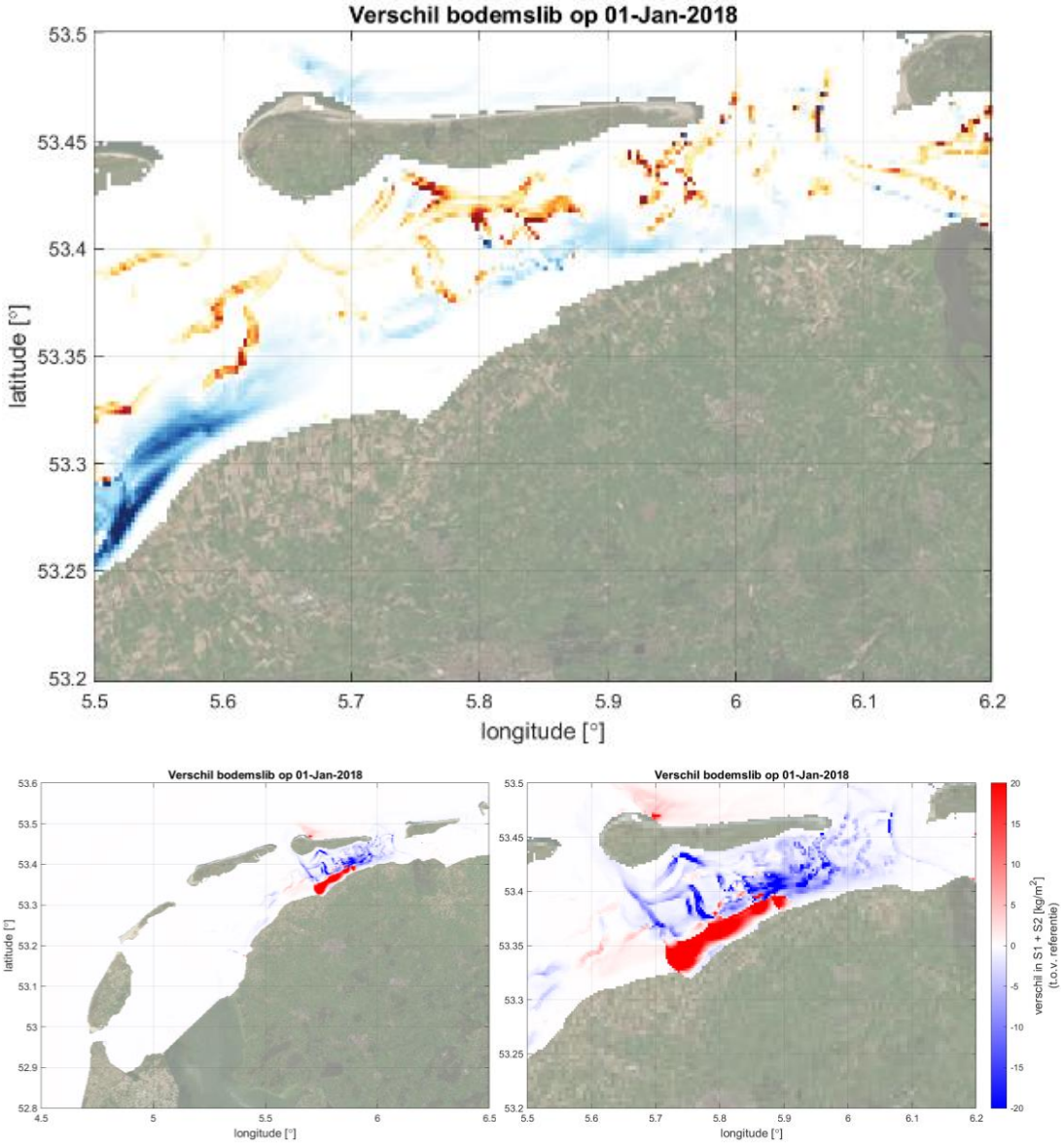
Om vast te stellen waar het slib in de slibvang vandaan is gekomen, is het niet voldoende om naar de resultaatkaart met erosie en sedimentatie patronen in de Waddenzee te kijken. Ook in een situatie zonder slibvang is er sprake van sedimentatie en erosie in de Waddenzee, zoals zichtbaar in Figuur 4.7. Beter kan gekeken worden naar de verschillen tussen de referentiesituatie en scenario 1. In de referentiesituatie blijkt sprake te zijn van een toename van het slibgehalte in de geulen en

een beperkte afname op de plaatgebieden bij het vasteland. Ook op de Noordzee aan de noordoostzijde van het zeegat (op de buitendelta) is sprake van een kleine afname van de slibgehaltes in de referentiesituatie. Aan het einde van het gesimuleerde jaar 2017 is in de referentiesituatie dus sprake van een herverdeling van het slib van de wadplaten en buitendelta naar de geulen in het kombergingsgebied, voornamelijk als gevolg van hogere golfwerking en enkele stormen in het laatste kwartaal van het simulatiejaar. In het resultaat van scenario 1 is dat beeld duidelijk anders: in enkele van de geulen is nog sprake van sedimentatie van slib, terwijl in andere geulen sprake is van een afname van het slibgehalte. Op de wadplaten aan de vastelandszijde is sprake van een sterke afname van het slibgehalte. Op de buitendelta blijkt nu juist sprake te zijn van slibsedimentatie.

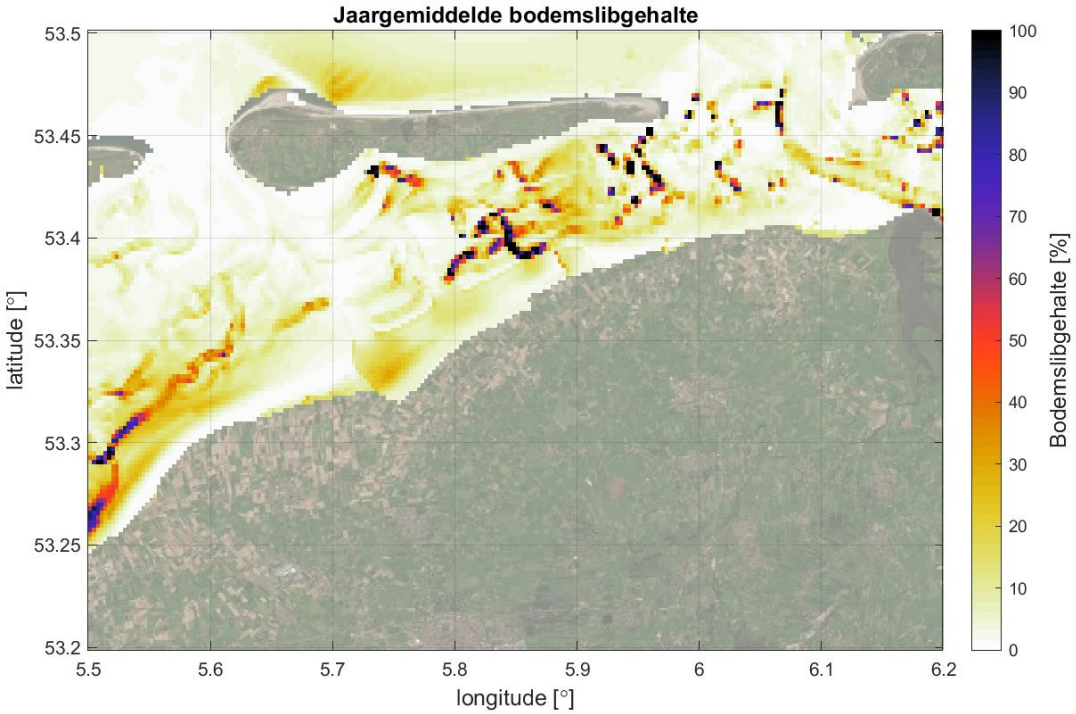
In de verschilkaart tussen de referentie- en de scenarioberekening (Figuur 4.6) zijn deze verschillen tussen de scenario's duidelijker zichtbaar: de slibsedimentatie in de slibvang leidt tot minder slibsedimentatie in vrijwel het hele kombergingsgebied. Op de buitendelta is sprake van meer sedimentatie van slib. In de verschilkaart van vrijwel de hele Waddenzee (Figuur 4.7) is zichtbaar dat de gevolgen voor het bodemslib zich voornamelijk voordoen in het kombergingsgebied Borndiep waar de slibvang is aangebracht.

Tabel 4.1 geeft inzicht in de omvang van de verschillen in de het modeldomein (Waddenzee en Noordzee, minus slibvang) en in de slibvang ten opzichte van de referentiesimulatie zonder slibvang. Het totale massaverschil in bruto erosie en sedimentatie t.o.v. de referentie is groter dan de sedimentatie die in de slibvang heeft plaatsgevonden. De netto sedimentatie binnen de slibvang is zeer groot ten opzichte van de netto erosie buiten de slibvang ten opzichte van de referentie. Dit betekent dat de slibvang een beperkt effect heeft op de netto sedimentatie/erosie aan de buitenzijde.

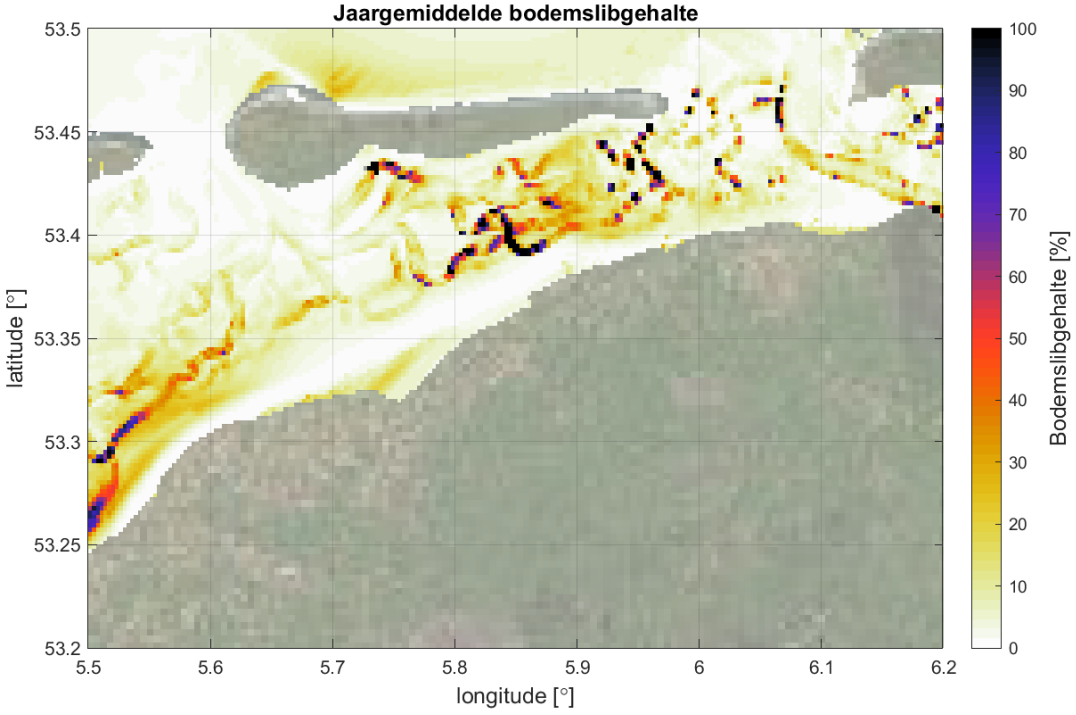
De kaarten met de verandering in het bodemslib na één jaar in Figuur 4.6 en Figuur 4.7 kunnen de indruk wekken dat de grootschalige verdeling van slib in het kombergingsgebied en op de buitendelta geheel verandert. Dat is echter niet het geval. Om die conclusie te trekken kijken we naar de kaarten met het jaargemiddelde slibgehalte in de bodem voor de situatie met de buitendijkse slibvang Zwarte Haan (Figuur 4.8) en het referentiescenario (Figuur 4.9), waarin de invloed van events of dynamischere periodes meer wordt gladgestreken. De patronen die hierin zichtbaar zijn verschillen slechts weinig en dan voornamelijk in de nabijheid van de toegangsgeulen en natuurlijk in de slibvang zelf. De essentie hiervan is dat de invloed van de slibvang op het slib in de bodem op specifieke momenten groot is, maar dat het gemiddeld over één heel jaar beperkt is.



Figuur 4.7 Verandering in bodemslib na een jaar voor referentiesom (boven), waarbij rood-oranje kleurtinten een toename in bodemslib over het jaar aangeven en blauwe kleuren een afname. De onderste figuren tonen het verschil tussen de referentiesom en scenario 1 (Figuur 4.6), waarbij rode kleurtinten een toename in bodemslib t.o.v. de referentiesom aangeven en blauwe kleuren een afname t.o.v. de referentiesom, op schaal van de Waddenzee (linksonder) en op schaal van de maatregel (rechtsonder).



Figuur 4.8 Jaargemiddelde slibgehalte in de bodem voor scenario 1 Zwarte Haan buitendijks.

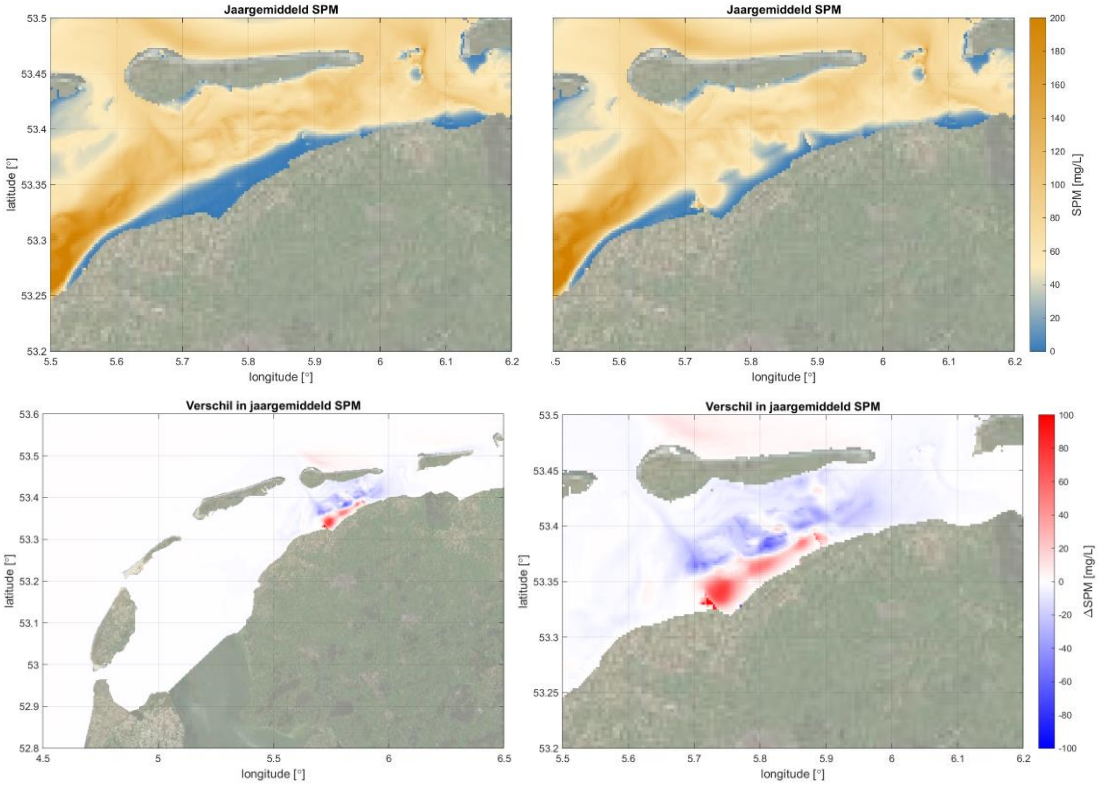


Figuur 4.9 Jaargemiddelde slibgehalte in de bodem voor het referentiescenario.

4.4.4 Slib in de waterkolom

Het effect van de slibvang op het slib in de waterkolom is weergegeven in Figuur 4.10. In deze kaarten is zichtbaar dat de aanwezigheid van de slibvang zorgt voor een verlaging van de slibconcentraties in vrijwel het hele kombergingsgebied. Op de buitendelta en lokaal in een enkele

geul en op het wantij is sprake van een beperkte toename. Net als voor het slib in de bodem treden zoals te verwachten de grootste veranderingen op in het kombergingsgebied en in de slibvang. In de slibvang zelf is sprake van een toename van de jaargemiddelde slibconcentraties. Dat is het logische gevolg van het toelaten van slibrijk water ieder getij, in een gebied dat voordien zelden overstroomde. De waargenomen patronen van veranderingen van slib in de waterkolom komen deels overeen met de patronen van veranderingen van slib in de bodem (Figuur 4.6).



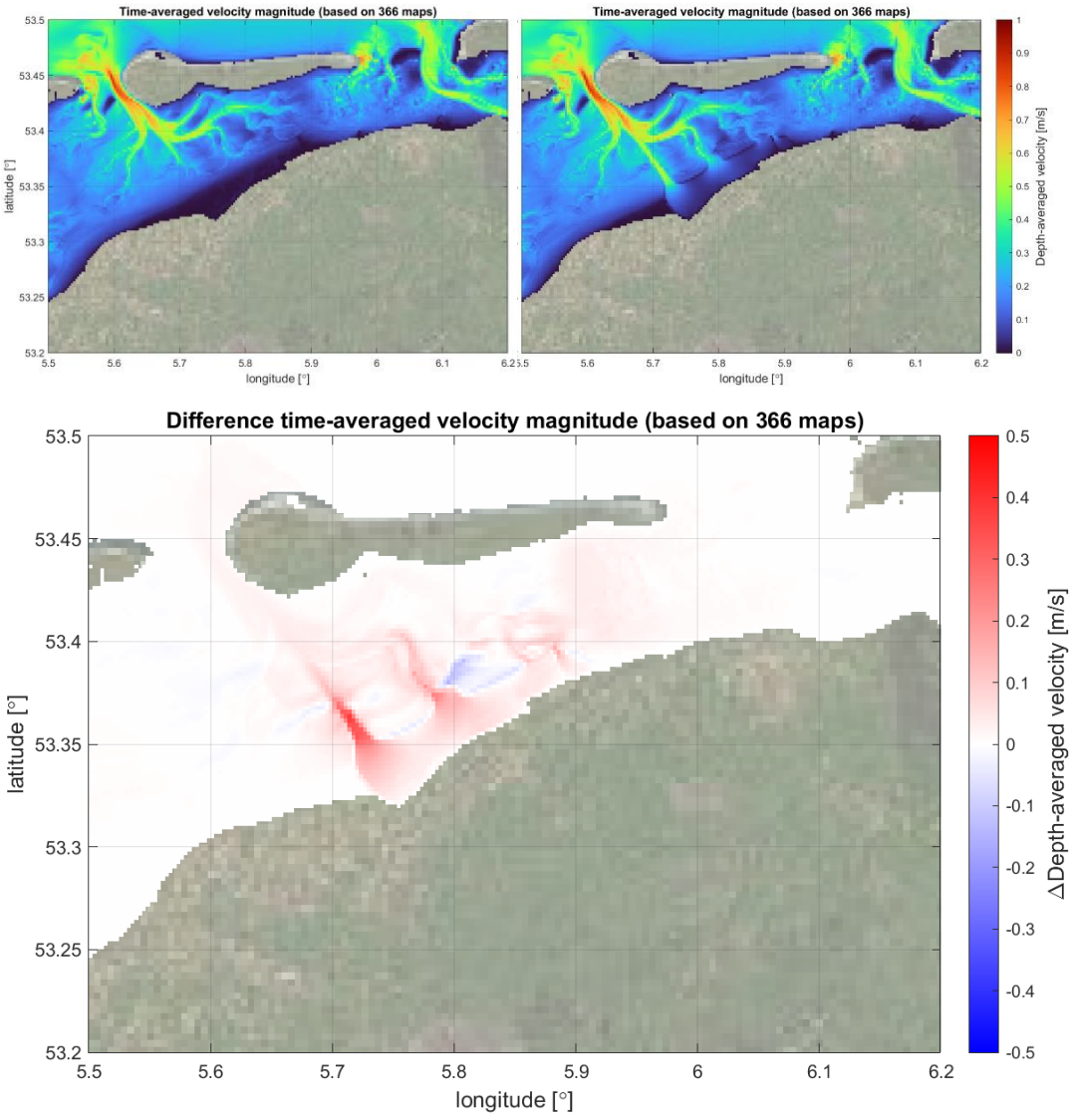
Figuur 4.10 Jaargemiddeld, dieptegemiddeld SPM voor referentiesom (linksboven) en voor gevoeligheidsscenario 1 (rechtsboven). De onderste figuren tonen het verschil tussen de twee sommen, waarbij rode kleurtinten een toename in het SPM aangeven en blauwe kleuren een afname, op schaal van de Waddenzee (linksonder) en op schaal van de maatregel (rechtsonder).

4.4.5 Veranderingen in hydrodynamica

De modelberekeningen geven ook inzicht in de veranderingen in de waterbeweging die ten grondslag liggen aan de veranderingen in de slibsedimentatie en concentratie in de Waddenzee. Figuur 4.11 toont de absolute stroomsnelheden, zoals die gemiddeld over een jaar optreden. Duidelijk zichtbaar is het patroon van geulen, waar de hoogste stroomsnelheden optreden. In de scenarioberekening treden ook in de verbindingsgeulen naar de slibvang hogere stroomsnelheden op, zoals verwacht. In de kaart met de verschillen in de stroomsnelheden wordt zichtbaar dat naast de toename van de stroomsnelheden in de verbindingsgeulen, de slibvang ook leidt tot gemiddeld hogere stroomsnelheden in vrijwel het gehele bekken. Die toename is het gevolg van het vergroten van het kombergingsvolume: door de geulen moet nu ook het water naar en uit de slibvang worden getransporteerd. Lokaal, op enkele wadplaten nabij het vasteland, is sprake van een afname van de gemiddelde stroomsnelheden, waarschijnlijk omdat de verbindingsgeulen de stroming op deze plekken beïnvloeden.

Het patroon in de jaargemiddelde bodemschuifspanning in Figuur 4.12 is minder uitgesproken dan het patroon in de stroomsnelheden, omdat het naast de stroming ook wordt bepaald door de golven. De combinatie van golven en stroming levert de hoogste waarden voor de jaargemiddelde

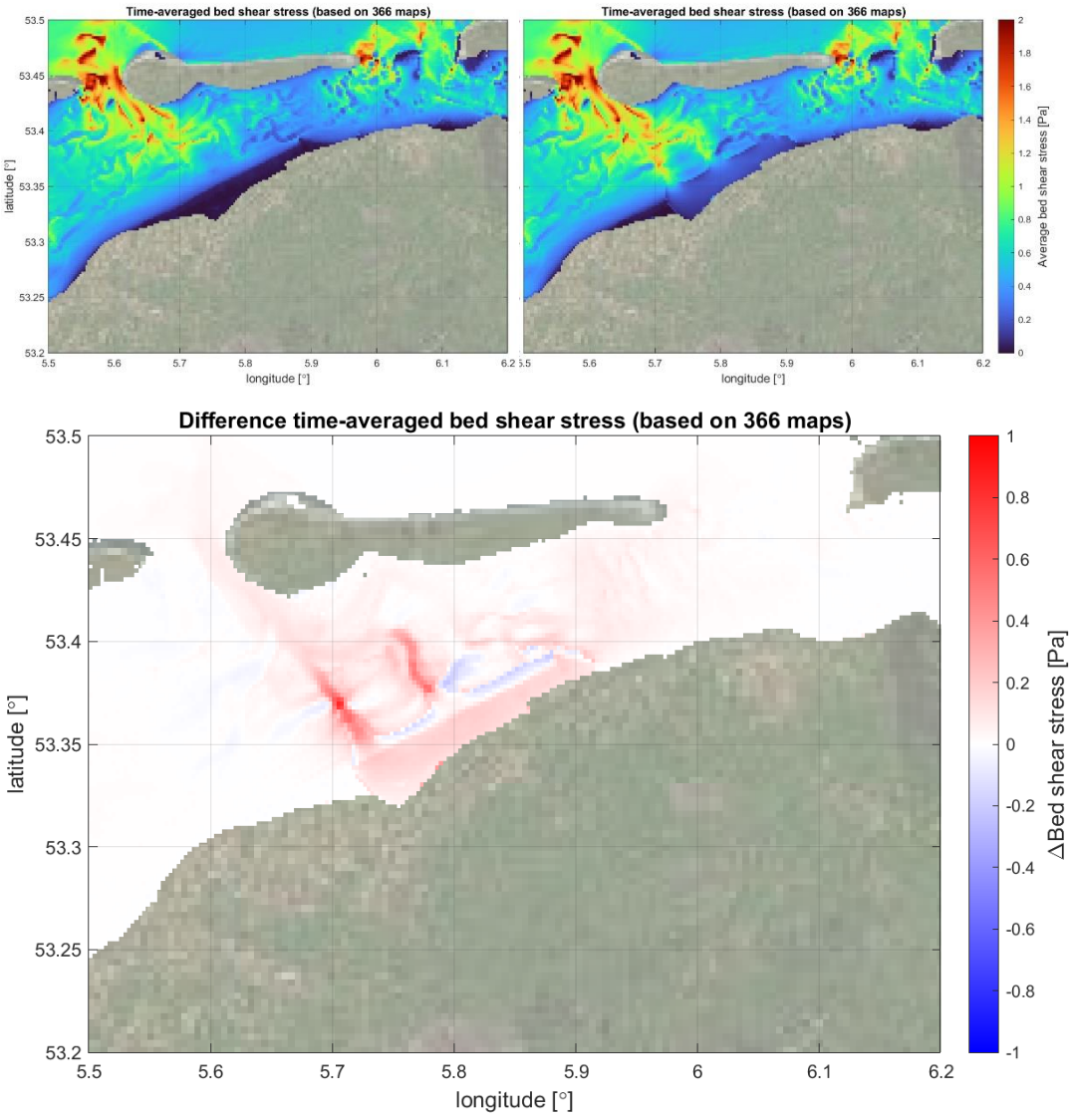
schuifspanning in de nabijheid van het zeegat. Verder de Waddenzee in nemen de waarden af, waarbij de laagste waarden worden bereikt nabij het vasteland en rond het wantij. Het toevoegen van de slibvang met de verbindingsgeulen levert bij de verbindingsgeulen en in de slibvang zelf een toename op van jaargemiddelde schuifspanning. De verschilkaart van de schuifspanning in de referentiesituatie en voor scenario 1 komt grotendeels overeen met de verschilkaart van de stroomsnelheden. Dat leidt tot de conclusie dat de verschillen in de bodemschuifspanning voornamelijk worden veroorzaakt door veranderingen in de stroomsnelheden. Tegelijkertijd kan worden gezegd dat door de toename in bodemschuifspanning in de toegangsgeulen geen slibsedimentatie zal optreden in deze geulen en dat er (initieel) zelfs een slibbron wordt gecreëerd doordat slib uit de bodem wordt geërodeerd. Dit wordt bevestigd door de patronen die zijn te zien in Figuur 4.6.



Figuur 4.11 Jaargemiddelde, dieptegemiddelde stroomsnelheid voor referentiesom (linksboven) en voor gevoeligheidsscenario 1 (rechtsboven). De onderste figuur toont het verschil tussen de twee sommen, waarbij rode kleurtinten een toename in de stroomsnelheid aangeven en blauwe kleuren een afname.

Een vergelijking tussen de verschilkaarten met het jaargemiddelde SPM (Figuur 4.10) en de jaargemiddelde stroomsnelheden (Figuur 4.11) of bodemschuifspanning (Figuur 4.12) laat zien dat de patronen in deze kaarten ruwweg overeenkomen. De gebieden waar de bodemschuifspanning

is toegenomen vertonen een afname van de slibconcentraties in de waterkolom en omgekeerd. Als de kaart met het verschil in bodemslib (Figuur 4.6) wordt vergeleken met de jaargemiddelde kaarten, dan komen de patronen veel minder duidelijk overeen, met uitzondering van de slibvang zelf. Ook uit de omvang van de netto erosie in de gebieden waar de bodemschuifspanning is toegenomen ten opzichte van de totale netto erosie in Tabel 4.1 blijkt de grote invloed van de veranderingen in de bodemschuifspanning op de slibsedimentatie. De verklaring hiervoor is waarschijnlijk tweeledig. Het eerste deel van de verklaring ligt waarschijnlijk in de oorsprong van de onderliggende kaarten. Bij het bodemslib zijn twee momenten (aan het begin en aan het einde van het jaar) met elkaar vergeleken en is de informatie van de rest van het jaar niet gebruikt. Bij de andere kaarten zijn jaargemiddelden berekend, waarin informatie over het gehele jaar is gebruikt. Het tweede deel van de verklaring ligt in de complexiteit van de slibsedimentatie in de bodem, waarbij de opeenvolgende condities zeer bepalend zijn voor waar hoeveel slib in de bodem terechtkomt.



Figuur 4.12 Jaargemiddelde bodemschuifspanning voor referentiesom (linksboven) en voor gevoeligheidsscenario 1 (rechtsboven). De onderste figuur toont het verschil tussen de twee sommen, waarbij rode kleurtinten een toename in de bodemschuifspanning aangeven en blauwe kleuren een afname.

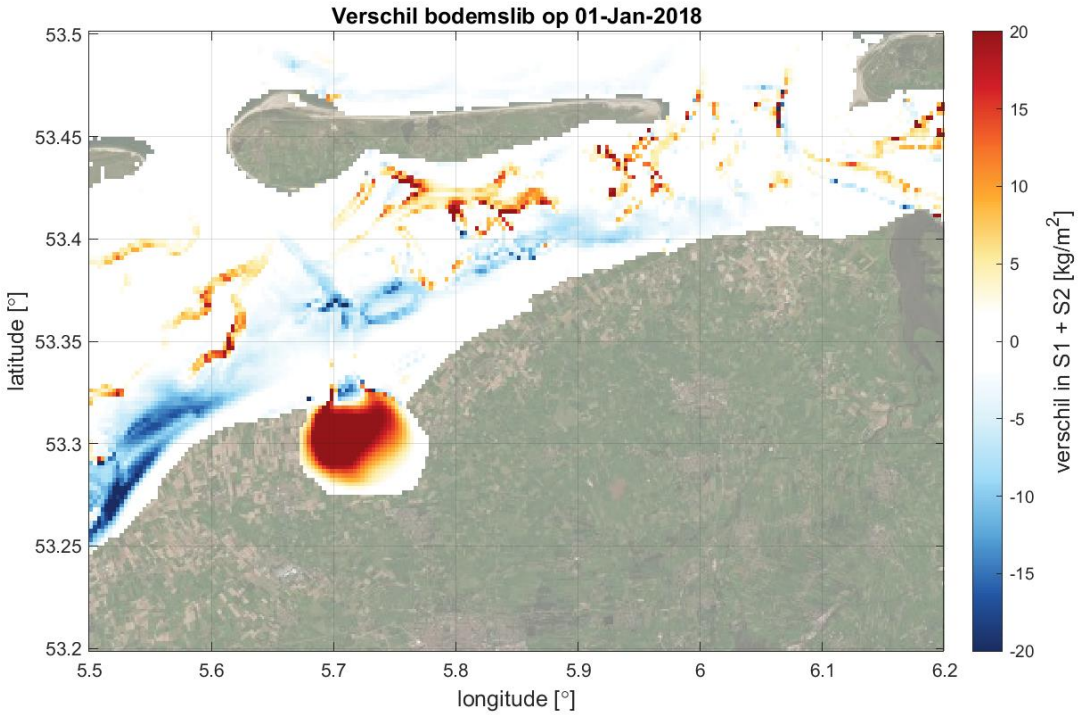
4.5 Resultaat gevoeligheidsscenario 2: afgraving binnendijks gebied bij Zwarte Haan

4.5.1 Het scenario

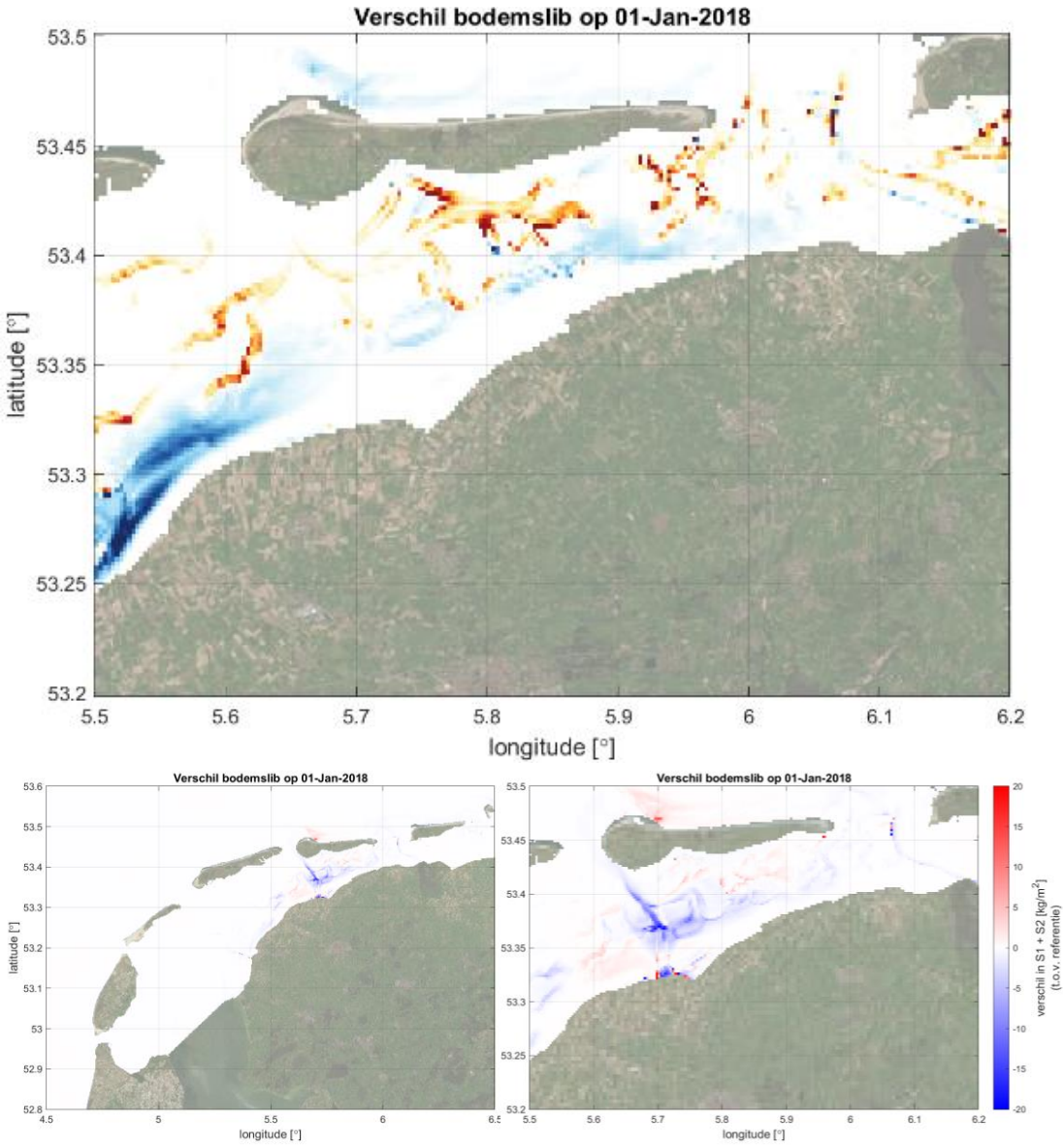
In gevoeligheidsscenario 2 is een slibvang toegevoegd aan het kombergingsgebied Borndiep door een binnendijks gebied te verbinden met de Waddenzee, via een verbindingsgeul die aansluit op bestaande een getijdegeul (Figuur 4.2). De binnendijkse locatie ligt zuidelijk van de westelijke helft van de buitendijkse slibvang van scenario 1 en de locatie van de verbindingsgeul ligt iets westelijker dan de meest westelijke verbindingsgeul van scenario 1. Het binnendijkse gebied is in het model afgegraven tot 0,5 m onder gemiddeld laagwater.

4.5.2 Sedimentatie en slib in de bodem

De resultaten in termen van de slibdepositie zijn opgenomen in Figuur 4.13, waarin duidelijk zichtbaar is dat de slibvang als zodanig functioneert. In Figuur 4.14 zijn de resultaten van de berekeningen opgenomen. De sedimentatie in de slibvang bedraagt 780 miljoen kg en dat geeft een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 5,2 cm in het berekende jaar, vergelijkbaar met het buitendijkse scenario. De vergelijking van de slibsedimentatie met de referentieberekening (Figuur 4.14) laat zien dat in de Waddenzee nabij de verbindingsgeul minder slib aanwezig is, zie blauwe stukje in de monding van de slibvang. Het jaargemiddelde slib in de bodem is weergegeven in Figuur 4.15. Vergelijking met het referentiescenario in Figuur 4.9 laat zien dat het verschil niet heel groot is buiten de slibvang zelf en de toegangsgeul.



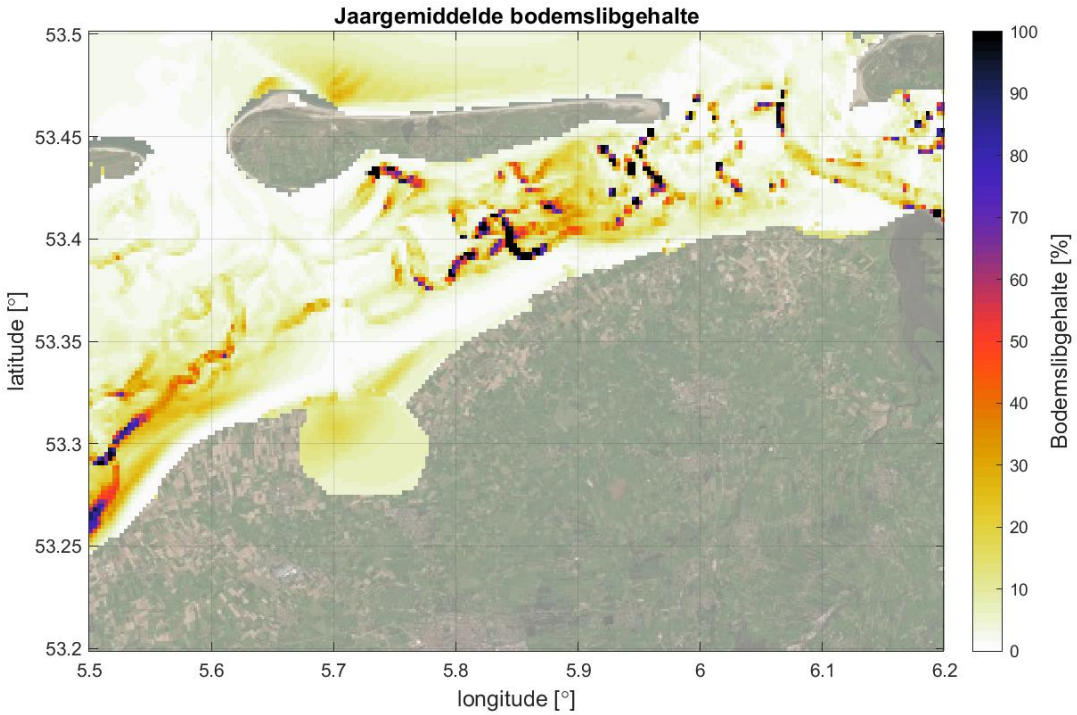
Figuur 4.13 Verandering in bodemslib na één jaar voor gevoeligheidsscenario 2, waarbij rood-oranje kleurtinten een toename in bodemslib over het jaar aangeven en blauwe kleuren een afname.



Figuur 4.14 Verandering in bodemslib na een jaar voor referentiesom (boven), waarbij rood-oranje kleurtinten een toename in bodemslib over het jaar aangeven en blauwe kleuren een afname. De onderste figuren tonen het verschil tussen de referentiesom en gevoeligheidsscenario 2 (Figuur 4.13), voor locaties waar modeluitvoer beschikbaar is voor beide simulaties (de slibvang zelf ontbreekt daarom), waarbij rode kleurtinten een toename in bodemslib t.o.v. de referentiesom aangeven en blauwe kleuren een afname t.o.v. de referentiesom, op schaal van de Waddenzee (linksonder) en op schaal van de maatregel (rechtsonder).

Tabel 4.2 Sedimentatie en erosie na één jaar voor gevoeligheidsscenario 2 binnen de slibvang (A) en daarbuiten (1-4), vergeleken met de referentiesituatie zonder slibvang.

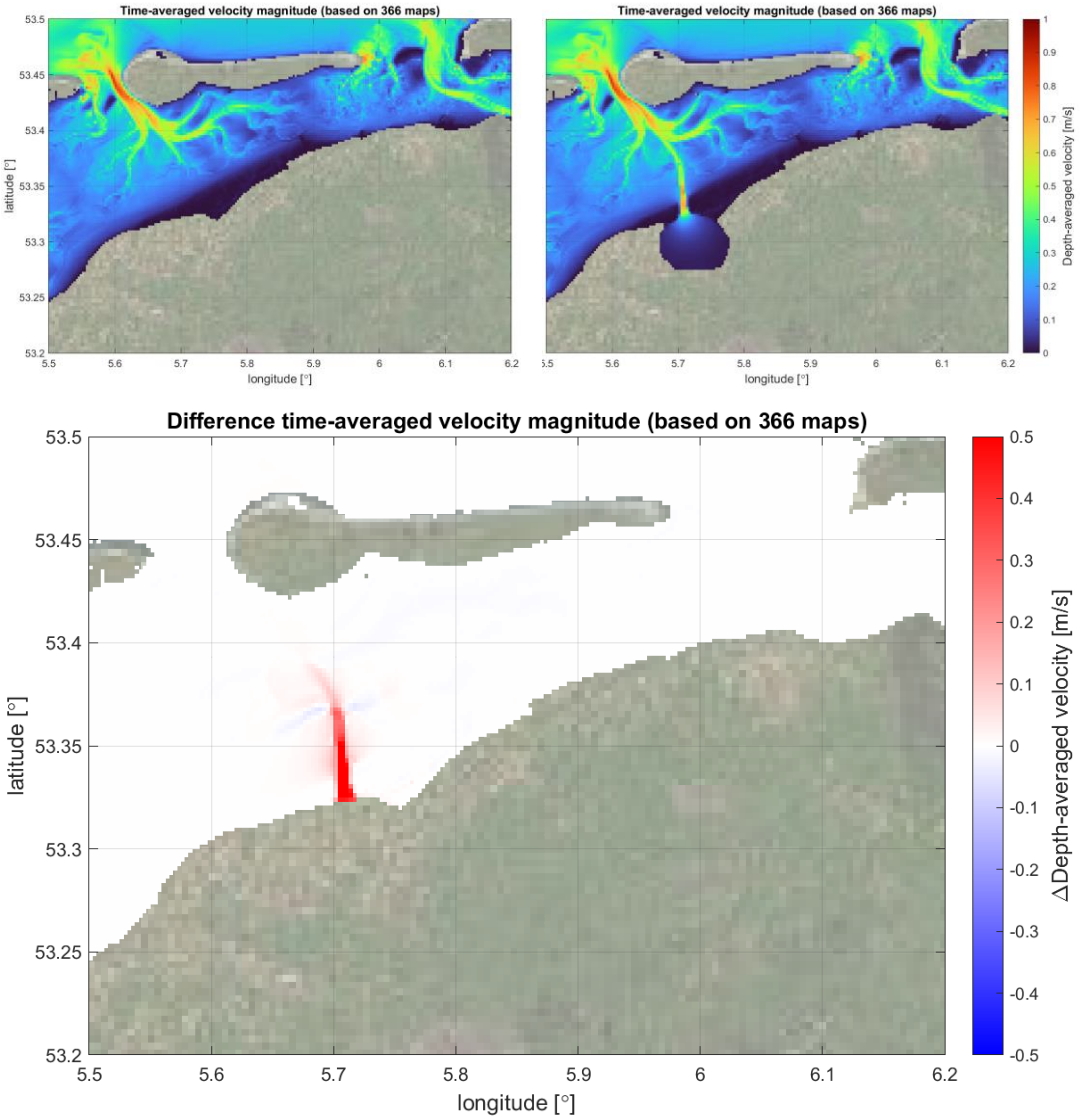
Grootheid	Totale massaverschil t.o.v. referentie [miljoen kg]	Gem. massaverschil bodemsediment t.o.v. referentie [kg/m^2]	Gem. verschil bodemhoogte in afgegraven gebied [cm]
A. Netto sedimentatie binnen slibvang	780	25,9	5,2
1. Bruto sedimentatie buiten	150	0,05	0,011
2. Bruto erosie buiten	500	0,07	0,014
3. Netto erosie buiten (=2-1)	350	0,04	0,007
4. Waarvan netto erosie buiten slibvang waar schuifspanning toenam	220	0,05	0,01



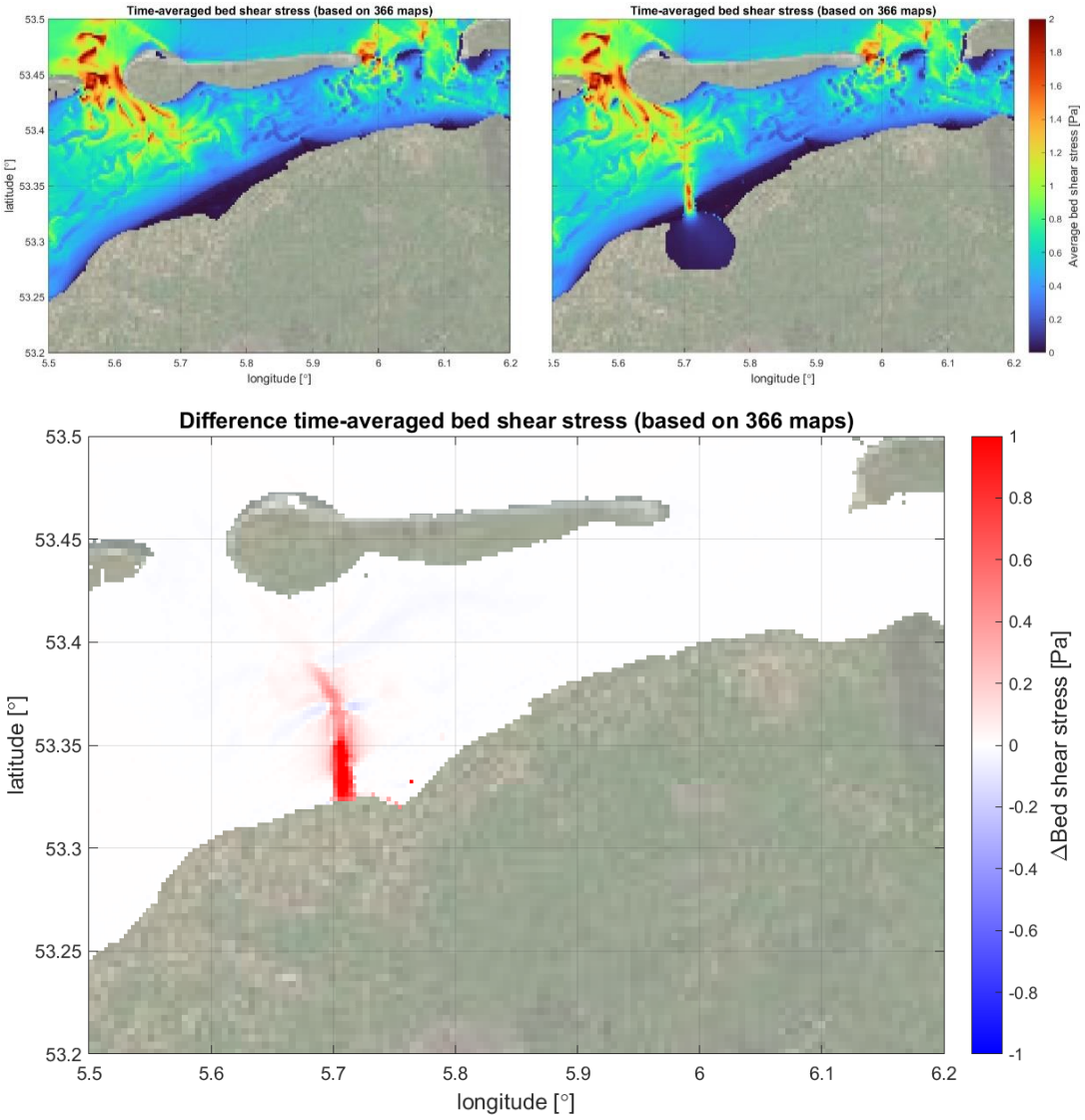
Figuur 4.15 Jaargemiddelde slibgehalte in de bodem voor scenario 1 Zwarte Haan binnendijks.

4.5.3 Veranderingen in hydrodynamica

Het belangrijke verschil met het voorgaande scenario zit in de waterbeweging, zoals getoond in Figuur 4.16. Dit verschil is ook duidelijk zichtbaar in de kaarten met de jaargemiddelde stroomsnelheid in Figuur 4.16 en de jaargemiddelde schuifspanning in Figuur 4.17. De stroomsnelheden lopen relatief hoog op in de toegangsgeul en dit resulteert in hogere schuifspanningen. Het gevolg lijkt te zijn dat het slib in de slibvang voornamelijk afkomstig is van de omgeving van de geul.



Figuur 4.16 Jaargemiddelde, dieptegemiddelde stroomsnelheid voor referentiesom (linksboven) en voor gevoeligheidsscenario 2 (rechtsboven). Het onderste figuur toont het verschil tussen de twee sommen, voor locaties waar modeluitvoer beschikbaar is, waarbij rode kleurtinten een toename in de stroomsnelheid aangeven en blauwe kleuren een afname.



Figuur 4.17 Jaargemiddelde bodemschuifspanning voor referentiesom (linksboven) en voor gevoeligheidsscenario 2 (rechtsboven). Het onderste figuur toont het verschil tussen de twee sommen, voor locaties waar modeluitvoer beschikbaar is, waarbij rode kleurtinten een toename in de bodemschuifspanning aangeven en blauwe kleuren een afname.

4.6 Resultaat gevoeligheidsscenario 3: afgraving binnendijks gebied bij Harlingen

4.6.1 Het scenario

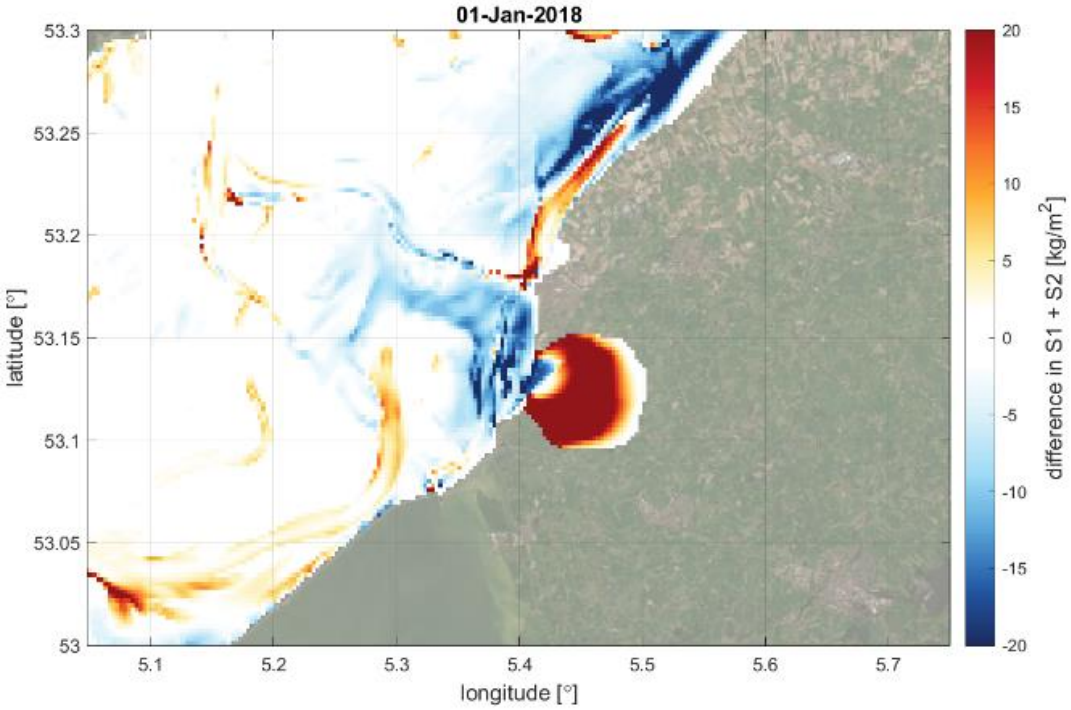
In gevoeligheidsscenario 3 is een slibvang toegevoegd aan het kombergingsgebied Marsdiep. Hiervoor is een binnendijks gebied ten zuiden van Harlingen door middel van een verbindingsgeul verbonden met de Waddenzee (Figuur 4.3). Het binnendijkse gebied is afgegraven tot 0,5 m onder gemiddeld laagwater. Het belangrijkste verschil met de twee voorgaande scenario's is het kombergingsgebied waar deze slibvang op aansluit. Voor scenario 3 is dit het Marsdiep terwijl scenario 1 en 2 zijn geplaatst in het Borndiep.

4.6.2 Slibsedimentatie en slib in de bodem

De resultaten van dit gevoeligheidsscenario zijn op dezelfde wijze weergegeven als die van de voorgaande twee scenario's. In Figuur 4.18 is het slib in de bodem weergegeven, na één jaar rekenen met de aanwezigheid van de slibvang. De daaropvolgende Figuur 4.19 laat de veranderingen in het bodemslib in de referentiesituatie zien en toont de verschillen tussen scenario 3 en het referentiescenario voor het bodemslib. In Tabel 4.3 zijn de totale erosie en sedimentatie weergegeven in de slibvang en in de Waddenzee.

Ook voor dit scenario kan worden geconcludeerd dat de slibvang zijn werk doet; er vindt forse sedimentatie plaats. De sedimentatie in de slibvang is voor scenario 3 bedraagt na één jaar 840 miljoen kg, wat marginaal groter is dan in scenario 1. Omgerekend naar een gemiddelde laagdikte is dit gelijk aan ongeveer 5,6 cm.

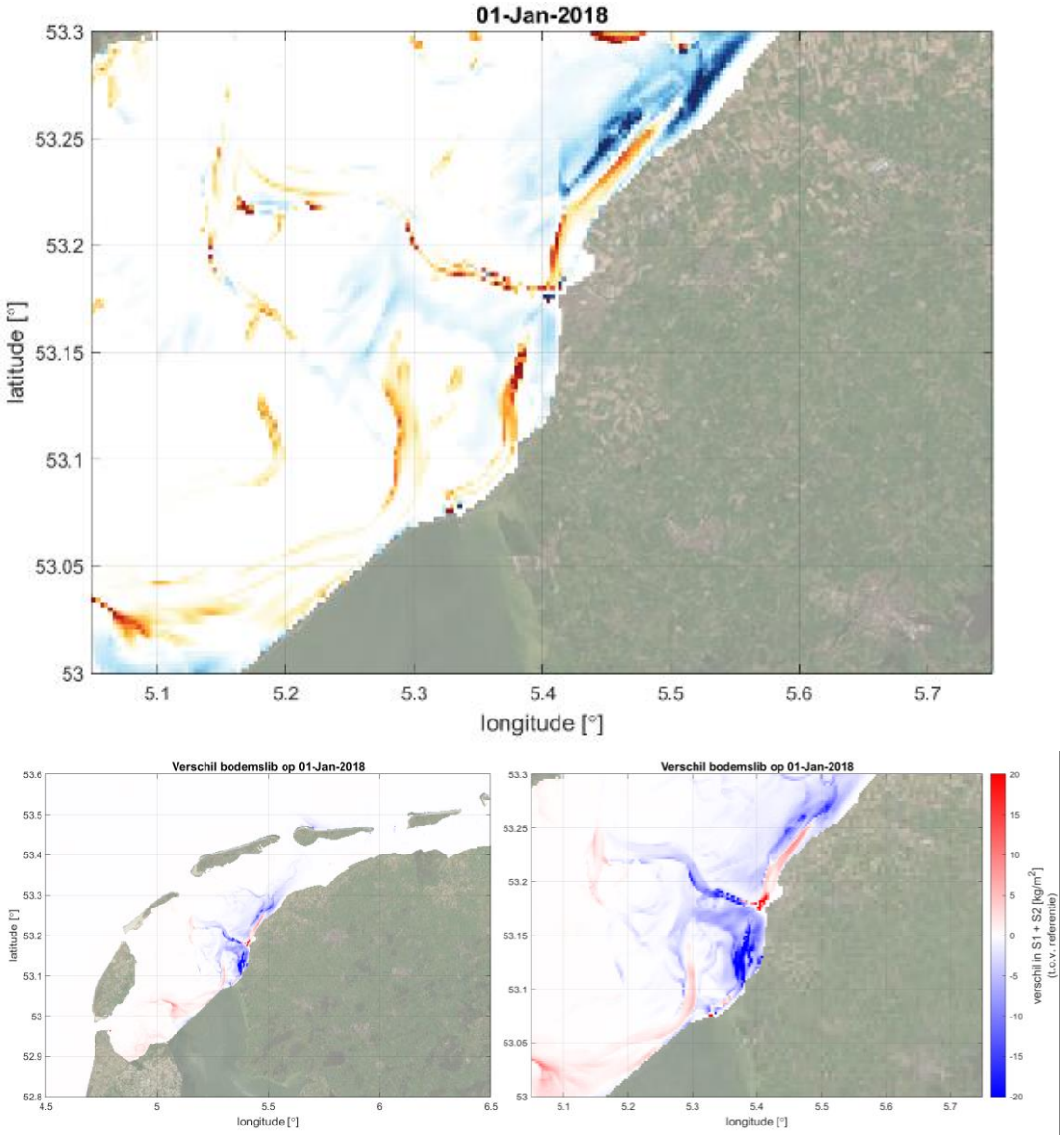
De verschilkaarten in Figuur 4.19 laten zien dat de sedimentatie in de slibvang voornamelijk leidt tot minder slibsedimentatie op de nabijgelegen plaatgebieden. In de geul Kimstergat vindt juist een toename van slibsedimentatie plaats. De afname van slibsedimentatie op de platen is te verklaren door het vergroten van het kombergingsgebied en hierdoor de toename van stroomsnelheden in de geulen en over de platen (welke vlak voor het maatregelgebied liggen). De toename van slibsedimentatie in het Kimstergat is lastiger te verklaren. Mogelijk resulteert de ingreep in een zodanige verandering van de hydrodynamische processen dat het Kimstergat iets minder belangrijk wordt en minder stroom trekt. Daardoor kan slib dat in gebieden met hogere bodemschuifspanningen erodeert in deze geul worden afgezet. Ook staat dit gebied sterk onder invloed van de zoetwaterafvoer bij Kornwerderzand, waardoor de invloed op de stromingspatronen complexer is.



Figuur 4.18 Verandering in bodemslib na één jaar voor gevoeligheidsscenario 3, waarbij rood-oranje kleurtinten een toename in bodemslib over het jaar aangeven en blauwe kleuren een afname.

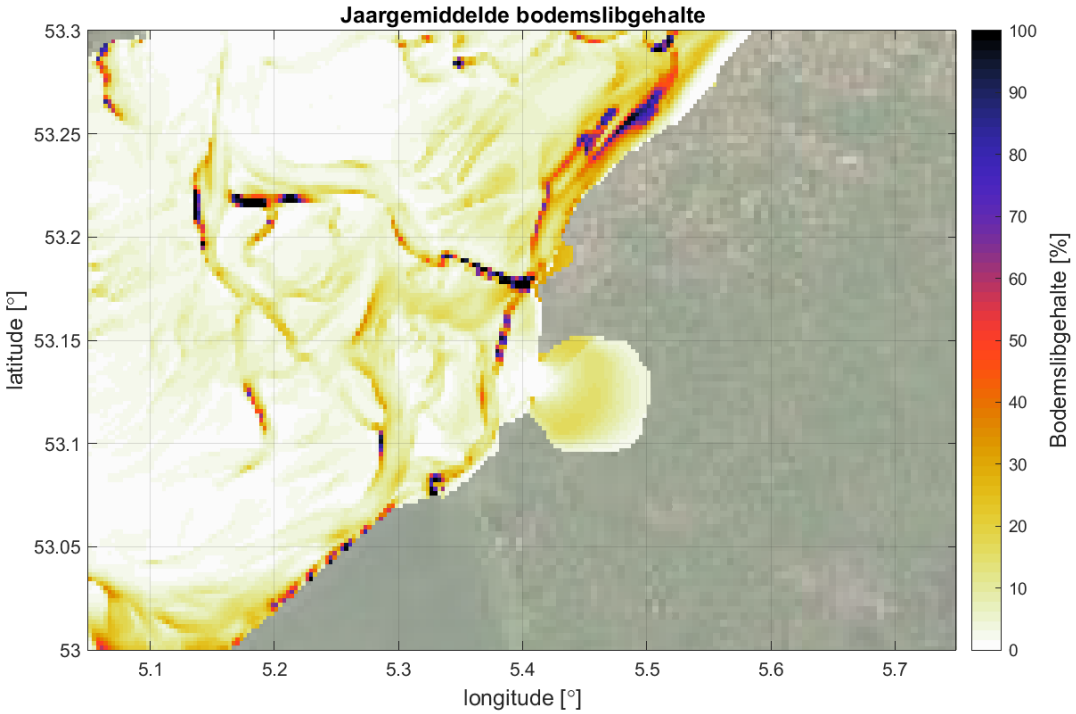
Tabel 4.3 Sedimentatie en erosie na één jaar voor gevoeligheidsscenario 3 binnen de slibvang (A) en daarbuiten (1-4), vergeleken met de referentiesituatie zonder slibvang.

Grootheid	**Totale massaverschil t.o.v. referentie [miljoen kg]**	**Gem. massaverschil bodemsediment t.o.v. referentie [kg/m^2]**	**Gem. verschil bodemhoogte in afgegraven gebied [cm]**
A. Netto sedimentatie binnen slibvang	840	27,8	5,6
1. Bruto sedimentatie buiten	535	0,136	0,027
2. Bruto erosie buiten	1173	0,203	0,041
3. Netto erosie buiten (=2-1)	640	0,067	0,013
4. Waarvan netto erosie buiten slibvang waar schuifspanning toenam	640	0,13	0,026

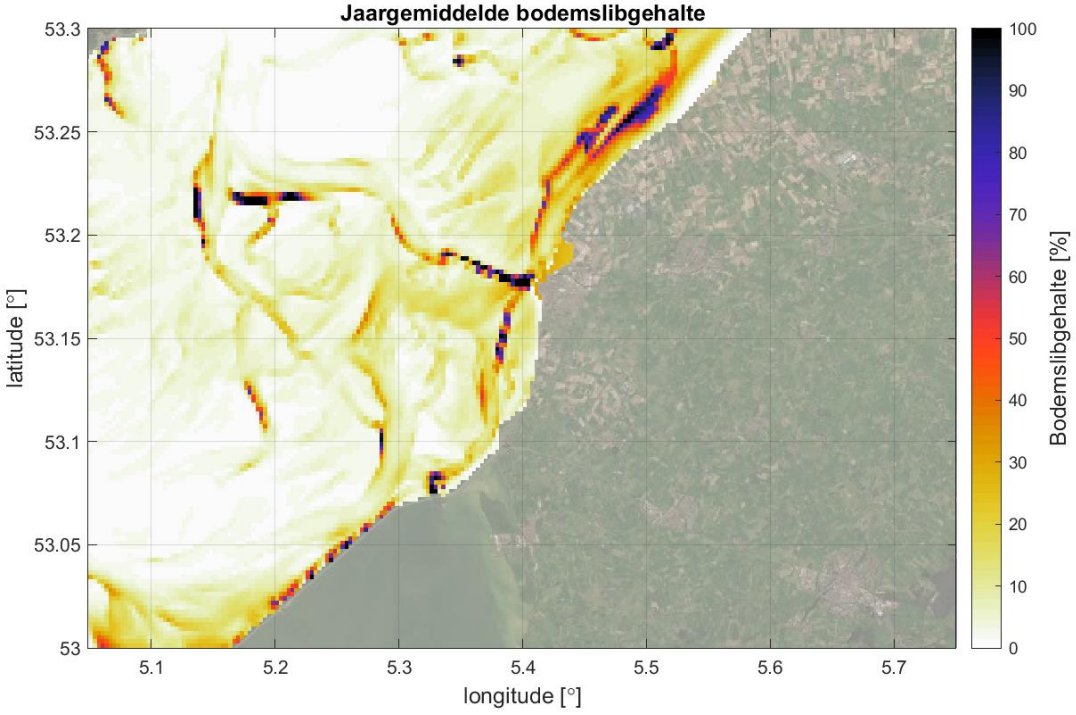


Figuur 4.19 Verandering in bodemslib over een jaar voor referentiesom (boven), waarbij rood-oranje kleurtinten een toename in bodemslib over het jaar aangeven en blauwe kleuren een afname. De onderste figuren tonen het verschil tussen de referentiesom en gevoeligheidsscenario 3, voor locaties waar modeluitvoer beschikbaar is, waarbij rode kleurtinten een toename in bodemslib t.o.v. de referentiesom aangeven en blauwe kleuren een afname t.o.v. de referentiesom, op schaal van de Waddenzee (linksonder) en op schaal van de maatregel (rechtsonder).

Ook bij dit scenario kunnen de kaarten met de verandering in het bodemslib na één jaar in Figuur 4.18 en Figuur 4.19 de indruk wekken dat de grootschalige verdeling van slib in het kombergingsgebied geheel verandert. De kaarten met het jaargemiddelde slibgehalte in de bodem voor de situatie met de binnendijkse slibvang Harlingen (Figuur 4.20) en het referentiescenario (Figuur 4.21) laten zien dat patronen slechts weinig verschillen. Eigenlijk is alleen in de nabijheid van de toegangsgeul en in de slibvang zelf sprake van een ander patroon. Op basis hiervan concluderen we wederom dat de invloed van de slibvangslibvangen op het slib in de bodem op specifieke momenten groot is, maar dat het gedurende één heel jaar beperkt is.



Figuur 4.20 Jaargemiddelde slibgehalte in de bodem voor scenario 3 Harlingen Binnendijks.

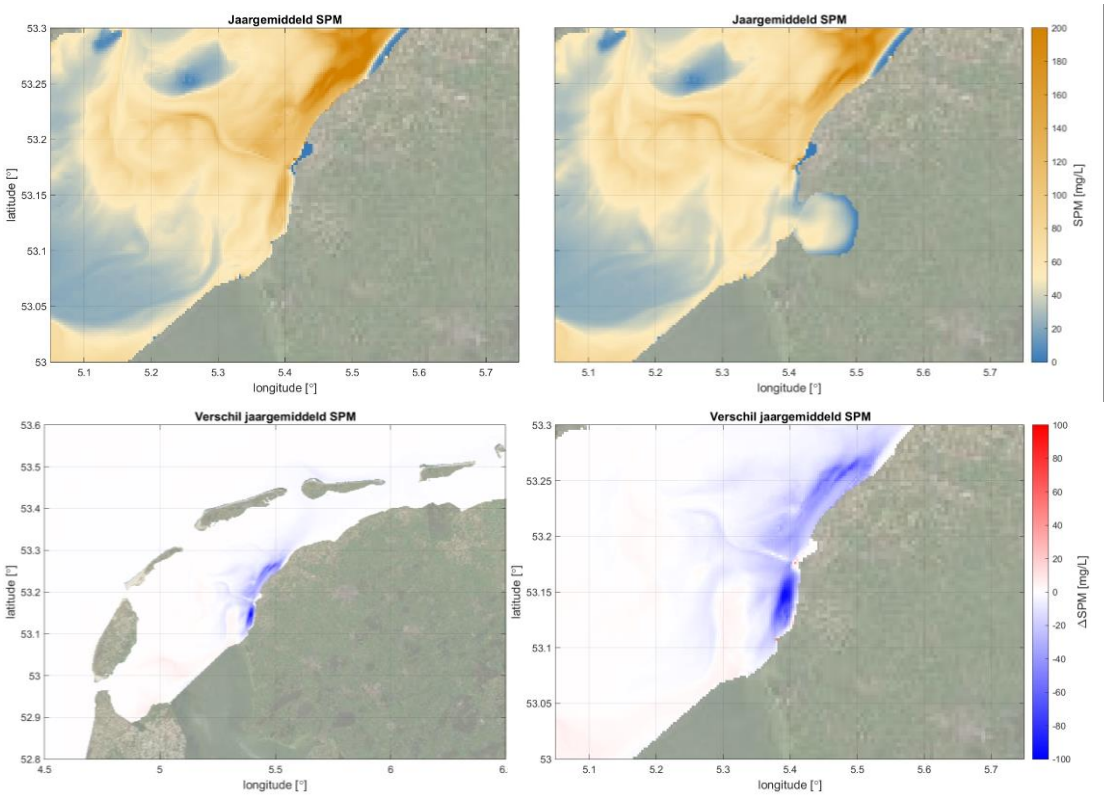


Figuur 4.21 Jaargemiddelde slibgehalte in de bodem voor het referentiescenario.

4.6.3 Slib in de waterkolom

De jaargemiddelde slibgehaltes in de situatie met en zonder slibvang staan in Figuur 4.22. Zichtbaar is dat de slibvang leidt tot een duidelijke afname van de slibgehaltes nabij de slibvang, in de omgeving van de Boontjes, tot in het Kimstergat ten noordoosten van Harlingen. Westelijk van de

Boontjes, in de getijdegeul Doove balg is sprake van een beperkte toename van de slibgehaltes in de waterkolom.



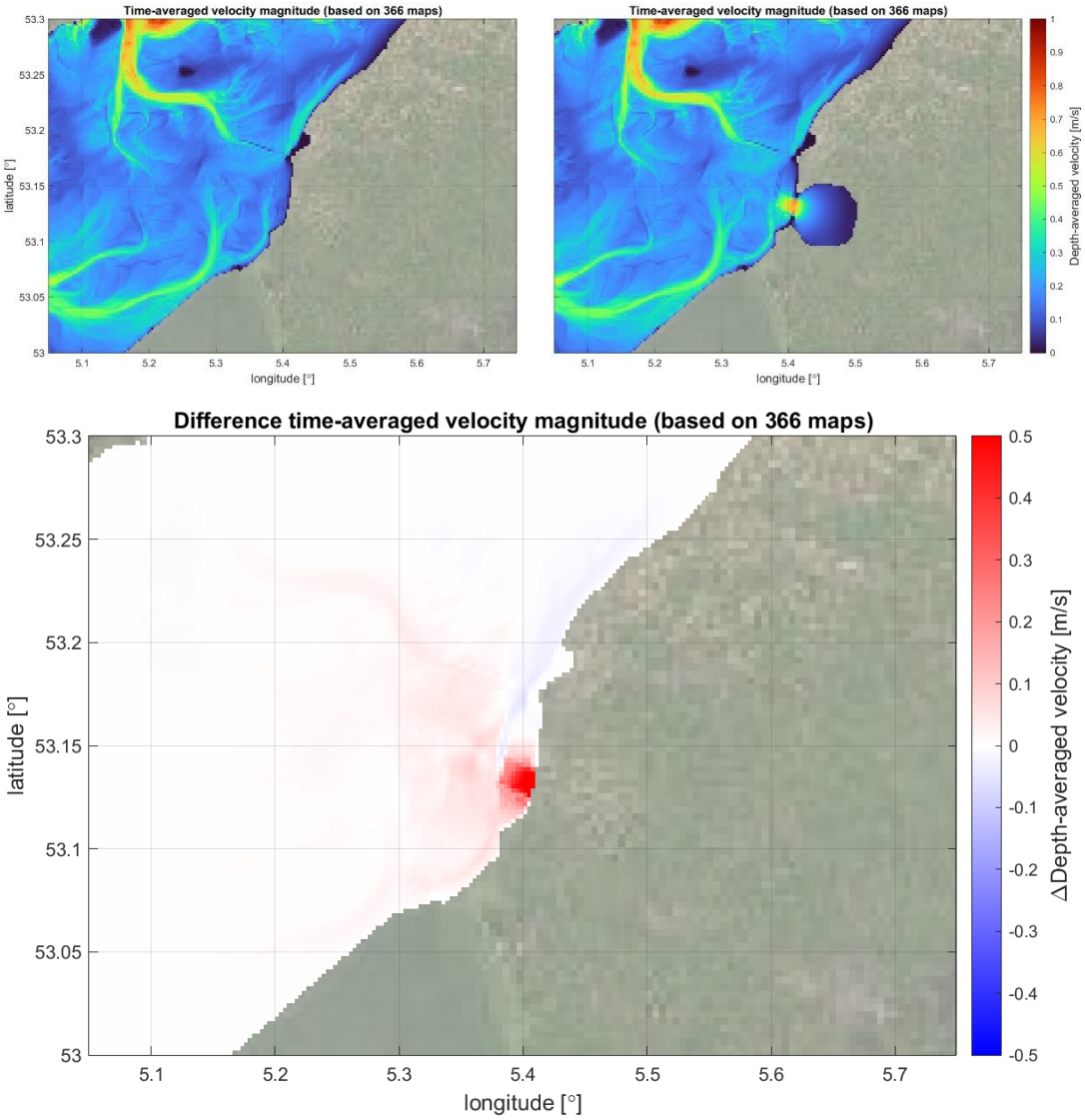
Figuur 4.22 Jaargemiddeld, dieptegemiddeld SPM voor referentiesom (linksboven) en voor gevoeligheidsscenario 1 (rechtsboven). De onderste figuren tonen het verschil tussen de twee sommen, waarbij rode kleurtinten een toename in het SPM aangeven en blauwe kleuren een afname, op schaal van de Waddenzee (linksonder) en op schaal van de maatregel (rechtsonder).

4.6.4 Veranderingen in hydrodynamica

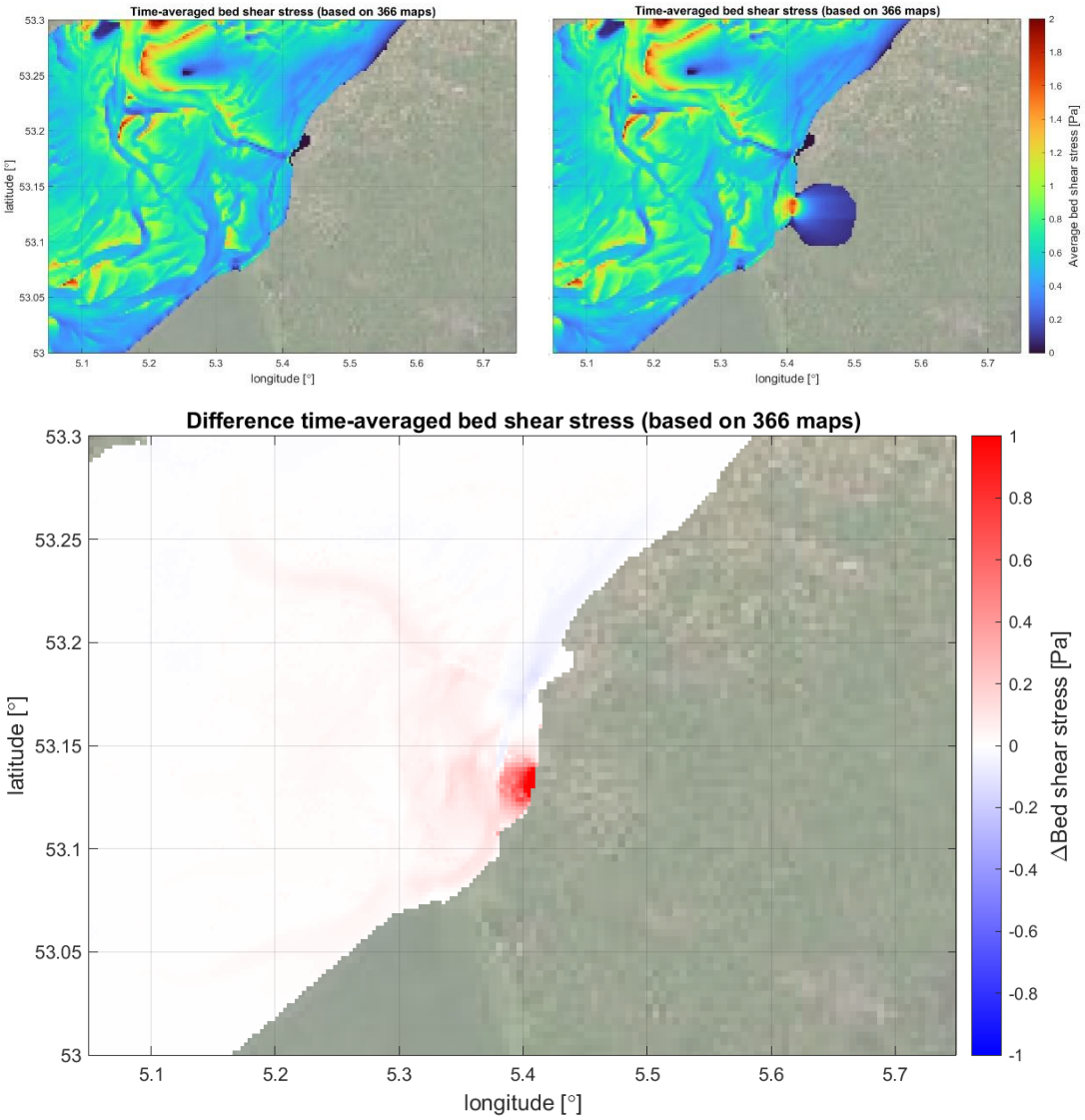
De jaargemiddelde absolute stroomsnelheden voor de situatie met en zonder slibvang zijn opgenomen in Figuur 4.23, waarin ook de verschillen tussen de twee situaties staan. De verschillen zijn, met uitzondering van de sterke toename in de verbindingsgeul, over het algemeen beperkt. Opvallend is dat naast een gebied in de Waddenzee met een toename in de stroomsnelheden, als gevolg van de vergroting van het kombergingsvolume, ook sprake is van een afname in het Kimstergat. Mogelijk neemt de slibvang een deel van de stroming naar het Kimstergat over, zoals ook al wordt aangegeven in Paragraaf 4.6.2. De jaargemiddelde schuifspanningen staan in Figuur 4.24. Hoewel de patronen met de schuifspanningen in dit gebied sterk verschillen van de patronen in de jaargemiddelde stroomsnelheden (Figuur 4.23) als gevolg van de invloed van golven op de bodemschuifspanningen, levert de verschilkaart wel een vergelijkbaar beeld op.

Evenals bij het eerste scenario, bieden de veranderingen in de jaargemiddelde stroomsnelheden (Figuur 4.23) en bodemschuifspanningen (Figuur 4.24) wel een verklaring voor de veranderingen in de jaargemiddelde SPM (Figuur 4.22), maar niet voor het verschil in de slib in de bodem (Figuur 4.18). Zoals al uitgelegd bij scenario 1 is dit waarschijnlijk het gevolg van het verschil in informatie in de kaarten (verschil *na* een jaar versus verschil *gemiddeld* over een jaar) en van de complexe wijze waarop de opbouw van het slib in de bodem van de Waddenzee plaatsvindt. Het lastige bij het patroon van slib in de bodem bij het gevoeligheidsscenario (Figuur 4.18) en het referentiescenario (Figuur 4.19) is dat de resultaten enigszins contra-intuïtief zijn. Na het gesimuleerde jaar ligt er minder slib op plekken die als slibrijk bekend staan en meer slib op de geulbodems. Dit is blijkbaar het gevolg van de specifieke condities in dit gemodelleerde jaar en

specifiek aan het einde van dit jaar. Dit betekent waarschijnlijk ook dat de gevolgen van de aanwezigheid van een slibvang op de bodem van de Waddenzee van jaar op jaar zullen verschillen (vergelijkbaar met dat de slibsedimentatie in de bekkens verschillend is voor jaren met verschillende meteorologische forcering, zie paragraaf 3.3) en dat als aanvulling op deze eerste verkennende simulaties meerjarige analyses gewenst zijn.



Figuur 4.23 Jaargemiddelde, dieptegemiddelde stroomsnelheid voor referentiesom (linksboven) en voor gevoeligheidsscenario 3 (rechtsboven). Het onderste figuur toont het verschil tussen de twee sommen, voor locaties waar modeluitvoer beschikbaar is, waarbij rode kleurtinten een toename in de stroomsnelheid aangeven en blauwe kleuren een afname.



Figuur 4.24 Jaargemiddelde bodemschuifspanning voor referentiesom (linksboven) en voor gevoeligheidsscenario 3 (rechtsboven). Het onderste figuur toont het verschil tussen de twee sommen, voor locaties waar modeluitvoer beschikbaar is, waarbij rode kleurtinten een toename in de bodemschuifspanning aangeven en blauwe kleuren een afname.

4.7 Discussie gevoeligheidsscenario's i.r.t. grootschalige slibdynamiek

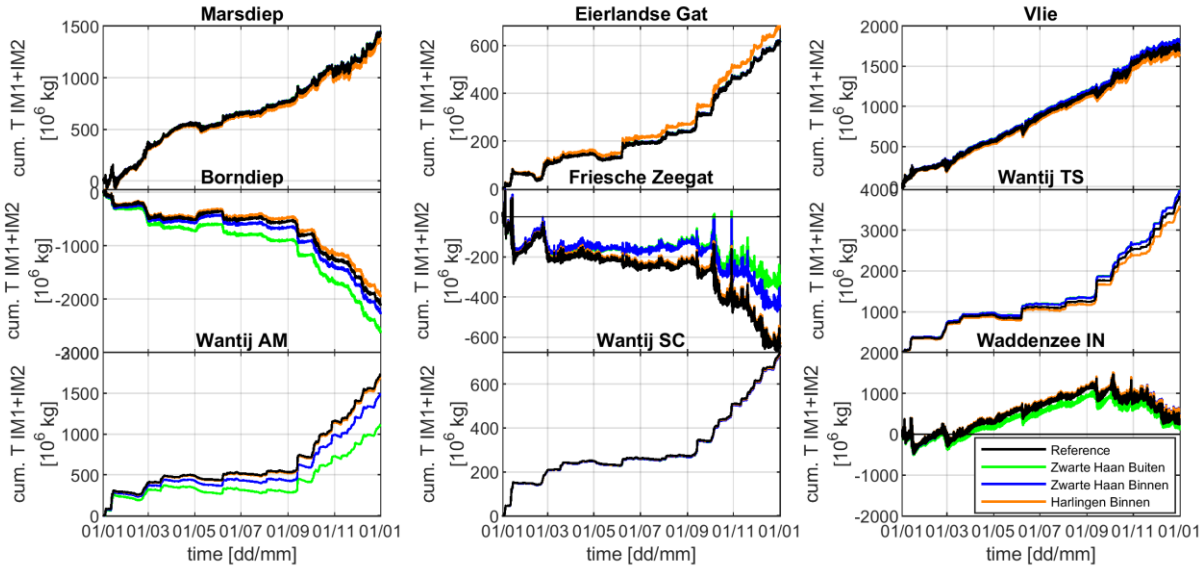
In voorgaande analyses is steeds globaal gekeken naar de resulterende patronen in de gehele Waddenzee. Het blijkt hieruit dat de slibvang over een redelijk groot gebied een effect teweeg brengen en dat de effecten niet beperkt blijven tot het eigen kombergingsgebied. Dit betekent dat de slibvang effecten hebben op de resttransporten over de wantijen. Figuur 4.25 toont de resttransporten van het slib over de verschillende grenzen tussen Noordzee en Waddenzee en over de wantijen tussen de verschillende kombergingsgebieden.

De slibvang Harlingen binnen ligt in het Marsdiep kombergingsgebied. De ingreep leidt in dit kombergingsgebied tot een verminderde import door het zeegat van het Marsdiep en het Vlie, maar in het kombergingsgebied Eierlandse Gat juist tot een vergroting van de import. Dit is een verrassend resultaat dat nadere bestudering behoeft. Ook vindt er door deze slibvang minder

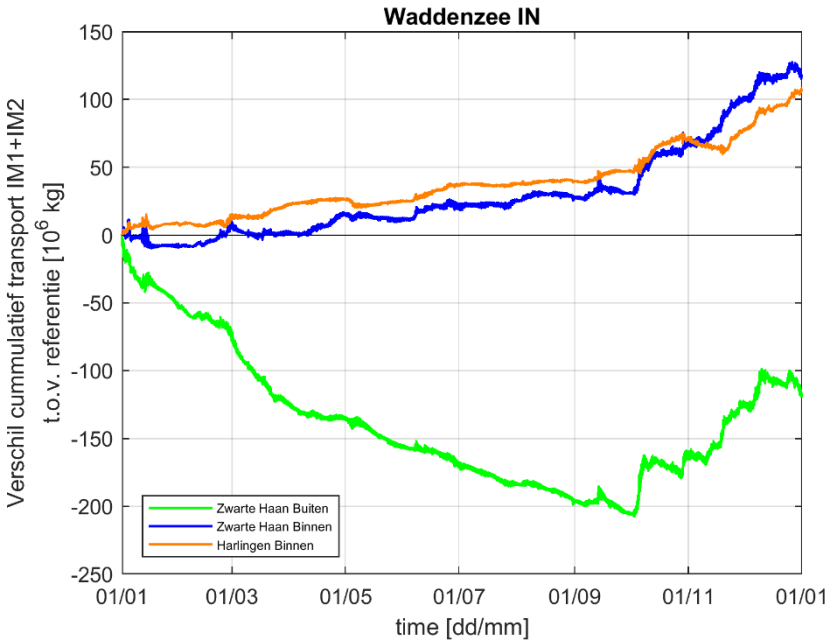
transport over het wantij bij Terschelling plaats en minder export door het Borndiep, wat een logisch gevolg is van de slibsedimentatie in Harlingen binnendijks.

De slibvang Zwarte Haan binnen en buiten liggen in kombergingsgebied Borndiep. Beide slibvang laten veranderingen van de resttransporten zien in het Borndiep, het Friesche Zeegat en de wantijen bij Ameland en Terschelling. Voor alle raaien heeft de slibvang Zwarte Haan buiten een groter effect dan Zwarte Haan binnen. Beide Zwarte Haan scenario's leiden tot een grotere export uit het Borndiep, een grotere import over het wantij van Terschelling, een kleinere export over het wantij bij Ameland en een vermindering van de export via het Friesche Zeegat. Dit is waarschijnlijk het gevolg van de grotere komberging, die leidt tot een groter transport over het wantij bij Terschelling en als gevolg daarvan een grotere export door het Borndiep. Vanwege de slibonttrekking wordt er minder slib over het wantij bij Ameland getransporteerd en daarmee ook minder geëxporteerd door het Friesche Zeegat. Het totale effect voor de gehele Waddenzee is echter verschillend voor de Zwarte Haan scenario's: de twee binnendijkse scenario's direct al leiden tot extra import in de Waddenzee (Figuur 4.26), terwijl het buitendijkse scenario leidt tot minder import. Dit laatste is een inspeeleffect: de verlaging van import geldt alleen voor de eerste negen maanden en na een doorstart van het model (niet opgenomen in dit rapport) blijkt het buitendijkse scenario ook tot extra import te leiden.

Deze import/export veranderingen zeggen niet zo veel over de lokale effecten in de slibvang, want daar zal onder alle omstandigheden slibsedimentatie optreden. De slibvang leiden ten opzichte van de referentie tot een herverdeling van het slib in de Waddenzee en dat kan er toe leiden dat er meer slib beschikbaar is wanneer een storm optreedt die tot een grootschalige herverdeling leidt. Dit betekent dat bij een verdere uitwerking van mogelijk maatregelen er op basis van expert judgement en balansmodellen verkenningen kunnen worden uitgevoerd over de te verwachten effecten, maar dat voor het bepalen van detaileffecten van een inrichtingsmaatregel goed gekeken moet worden naar de variaties over de jaren in de meteorologische omstandigheden.



Figuur 4.25 Resttransporten voor verschillende zeegaten en wantijen (zie subtitels).



Figuur 4.26 Verschil in totale netto import in de Waddenzee van de drie scenario's t.o.v. de referentiesimulatie..

4.8 Gevolgen van slibvangen

In de voorgaande paragrafen zijn de resultaten van de drie verschillende gevoeligheidsscenario's gepresenteerd, waarbij een vergelijking is gemaakt met het referentiescenario. De belangrijkste constatering is dat de slibvang in alle drie de scenario's zijn werk doet: slib sedimenteert in de sinks en niet in de toegangsgeul. Hierbij wordt opgemerkt dat zand niet meegenomen is in deze studie en mogelijk wel terecht komt in de toegangsgeul. In Tabel 4.4 is de netto sedimentatie in de slibvang voor de drie scenario's weergegeven. De orde grootte van de sedimentatie is vergelijkbaar voor de drie scenario's, ondanks dat de grootte van sinks en de grootte van het getijvolume verschillend is. In scenario 2 (Zwarte Haan binnendijks) wordt dit verschil in getijvolume veroorzaakt door de lange toegangsgeul, die bij de geringe laagwaterdiepte van 0,5 m niet tijdig leeg kan stromen.

Tabel 4.4 Netto sedimentatie na één jaar in de slibvangbij de drie gevoeligheidsscenario's.

Scenario	Totale massaverschil t.o.v. referentie [miljoen kg]	Gem. verschil bodemhoogte in afgegraven gebied [cm]
Zwarte Haan buitendijks	820	+5,5
Zwarte Haan binnendijks	780	+5,2
Harlingen binnendijks	840	+5,6

De veranderingen die optreden in de Waddenzee verschillen voor de drie scenario's. Het jaargemiddelde SPM neemt bij de drie scenario's af in de Waddenzee met vergelijkbare waarden. De maximale afnames lopen op tot tientallen mg/l, jaargemiddeld. De omvang van het gebied waar de daling zich voordoet varieert per scenario. Ook de locaties waar de hoeveelheden slib in de bodem van de Waddenzee veranderen door de slibvang verschillen. Het duiden van deze verschillen blijkt lastig en hier zijn geen standaard oorzaak gevolg relaties te leggen. Op elke locatie spelen specifieke morfologische omstandigheden een rol waarnaast ook de specifieke meteorologische omstandigheden per jaar uit lijken te maken voor het netto effect in een specifiek jaar (zie ook paragraaf 3.2.2).

5 Conclusies en aanbevelingen

5.1 Conclusies

De modelstudie heeft ons belangrijke inzichten verschaft in de mogelijke oorzaken van fluctuaties in SPM op middellange termijn (jaren) en seizoenen.

- Het seizoenssignaal, met hogere SPM in de winter en lage SPM in de zomer, lijkt voornamelijk te worden veroorzaakt door golfwerking, zowel in de Waddenzee als in de Noordzee. In de winter zijn de golven hoger én treden meer stormen op, waarbij het eerst effect het belangrijkst is. Op plekken nabij de zeegaten lijkt er ook een na-ijl effect te zijn van stormen van enkele dagen waarbij het SPM verhoogd blijft. Verder in de Waddenzee en op ondiepere locaties is dit effect minder sterk. Maanden met verschillende wind-/golfwerking leiden daardoor tot verschillende SPM concentraties.
- Wind heeft naast het veroorzaken van golven ook effect op de transporten in de Waddenzee. Bij wind is dus niet alleen de windsterkte, maar ook de windrichting van belang. Als de wind over slibrijk intergetijdengebied waait, kan dit tot meer transport leiden dan bij sterkere wind (en dus hogere golven) uit een richting waarbij de wind niet over slibrijk intergetijdengebied blaast. Dit sluit aan bij observaties voor de slibmotor in Colosimo et al. (2020).
- De resttransporten laten zien dat er netto slib wordt geïmporteerd door de zeegaten van het Marsdiep, Eierlandse Gat en het Vlie. Het netto transport over het wantij bij Terschelling is van dezelfde ordegrootte als de gesommeerde import door deze zeegaten. Het zeegat van het Borndiep laat in beide onderzochte jaren een export zien, wat mogelijk verklaard kan worden door de oriëntatie van de westelijke Waddenzee t.o.v. de dominante zuidwestelijke wind.
- Doordat wind een groot effect heeft op de resttransporten, heeft dit ook grote impact op de netto slibsedimentatie in de bekkens. Twee simulaties die enkel verschillen in meteorologische forcering hebben na een jaar bijna een factor 3 verschil in netto slibsedimentatie over de gehele Waddenzee. Dit bleek uit de slibbalans en betekent dat er jaren zijn waarbij meer slib in de Waddenzee accumuleert dan in andere jaren. Wij stellen de hypothese dat dit gedrag op langere termijn, wanneer er enkele jaren zijn met meer import, kan leiden tot verhoogde SPM-waardes. De slibbuffer verschilde tussen de 2 jaren met verschillende meteorologie met ca. 30%, wat de verhoging in SPM waardes zou kunnen verklaren. De verhouding tussen de grootte van de slibbuffer en de netto sedimentatie geeft aan dat een aantal jaar van vergrootte import nodig is om de Waddenzee voldoende ‘op te laden’ met slib voordat het effect op de dynamische buffers significant wordt.
- De watertemperatuur heeft een verwaarloosbaar effect op de slibdynamiek in de Waddenzee, en leidt tot beperkte invloed op de verticale SPM-profielen in de Noordzee.
- Hoewel in de Noordzee er seizoensverschillen zijn in verticale menging van het slib, wordt dit effect ook in de Noordzee overschaduwd door golf-resuspensie. Hiermee is een hypothese uit Herman et al. (2018) gefalsificeerd.
- De zoetwaterafvoer heeft zoals bekend een groot effect op de import van slib in de Waddenzee via estuariene circulatie, maar een verwaarloosbaar effect op de seizoensfluctuatie. Dit is het gevolg van de relatief trage verandering van de saliniteitsgradienten in de Waddenzee als gevolg van seizoensveranderingen in het spuiregime (meer spuien in de winter dan in de zomer). Het modelmatige gedrag van export van brak water vanaf de Afsluitdijk tijdens events lijkt in vergelijkbare mate gemeten te zijn tijdens de SEAWAD meetcampagne.
- De variatie van SPM op de Noordzee is ook op de modelranden opgelegd, maar het effect hiervan is binnen een jaar heel klein ten opzichte van een modelsimulatie met

tijdsconstante SPM. Dit onderstreept dat ook in de Noordzee de lokale golf-gedreven resuspensie dominant is. Op de langere termijn (orde jaren – decennium) kan een verandering in SPM op de Noordzee wel doorwerken in de Waddenzee, zo is in eerdere studies aangetoond (Sittoni et al., 2012).

- Microfytobenthos kan mogelijk de seizoensfluctuatie in SPM versterken. In het huidige model werd de seizoensfluctuatie redelijk goed gereproduceerd, als gevolg van de kalibratie van het slibmodel voor dit gedrag via de golf-gedreven resuspensie en dus zonder de invloed van microfytobenthos expliciet mee te nemen. Testen met een voor dit project ontwikkelde software-implementatie voor de groei van microfytobenthos en het effect op slib (volgens werk van Elena Bastianon, Universiteit van Hull en Pivato et al., 2018) gaf voor een geschematiseerd bekkenmodel in 2D een reductie van 30-70% in SPM. Verdere toepassing van dit proces vereist velddata o.a. van de microfytobenthosgroei en haar impact op de erosieresistentie in de Waddenzee.
- Met het model zijn de dynamische buffers van slib in beeld gebracht. Deze blijken zich deels te vinden op plekken waar ook uit data-analyse blijkt dat er lange termijn slibsedimentatie is opgetreden (Colina Alonso, 2020). Ook is er een buffer bij het wantij van Ameland, wat zeer relevant kan zijn voor het slibprobleem bij de vaargeul van Holwerd-Ameland.

Daarnaast zijn er eerste vingeroefeningen gedaan om de invloed van menselijke ingrepen in het Waddengebied in te schatten. De belangrijkste nieuwe inzichten zijn:

- Het referentiemodel heeft geen effect van baggeren en storten berekend, omdat die functionaliteit tijdens de modelkalibratie nog niet beschikbaar was. Voor het project Evaluatie Bochtafsnijding Holwerd – Ameland (Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020) is het KRW-model verfijnd en de software uitgebreid om het effect van baggeren en storten te kunnen doorrekenen. Uit die studie blijkt dat het verspreiden van slib lokaal een grote invloed heeft op het SPM. Op schaal van de Waddenzee is dit effect kleiner. Het model heeft een herkalibratie nodig om de baggervolumes bij Holwerd (en waarschijnlijk ook op andere plekken) beter te reproduceren.
- Inzet van het binnen dit project ontwikkelde model voor een andere toepassing (i.e. evaluatie stortstrategieën bij de vaargeul Holwerd-Ameland; Grasmeijer & Van Weerdenburg, 2020) illustreert dat herkalibratie van een model nodig kan zijn indien het model wordt vergeleken met nieuwe/andere metingen. Hoe meer veldobservaties er beschikbaar zijn, hoe kleiner de speelruimte voor de parameterinstellingen van het slibmodel. Dit onderstreept de noodzaak van metingen, zoals eerder ook aangegeven in het kalibratierapport (Vroom et al., 2020) en bij de microfytobenthosstudie (bijlage A).
- Bij de gevoeligheidsanalyse voor beheeringrepen is het omgekeerde effect van kwelderwerken berekend, door een kwelder modelmatig af te graven. Hieruit blijkt dat dit, zoals verwacht, groot effect heeft op de komberging en de stroomsnelheden in de geulen. Daarmee wordt ook het bodemslibgehalte en SPM gehalte beïnvloed, zowel in het bekken zelf als daarbuiten. Ook werkt de invloed van de ingreep door in de resttransporten door de zeegaten en over de wantijen. Deze effecten kunnen niet onafhankelijk worden bekeken van de fluctuaties die door de meteorologie worden veroorzaakt (i.e. golfresuspensie van platen tijdens dynamische condities en afzetting van slib in de geulen).
- Er is een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar het effect van maatregelen die de slibdynamiek kunnen beïnvloeden, d.w.z. het creëren van binnen- en buitendijkse slibvangen. Hieruit blijkt dat deze slibvangen, afhankelijk van hun omvang, een groot effect kunnen hebben op het bodemslibgehalte en SPM in het bekken en een uitstralend effect hebben in de Waddenzee. Er is een groot verschil tussen binnendijkse en buitendijkse scenario's, dat vooral relateert aan de mate van uitwisseling van water en slib tussen de slibvang en de Waddenzee. Ook is er effect te zien op de resttransporten door de zeegaten en over de wantijen, die nader bestudeerd moeten worden.

5.2 Aanbevelingen

Met betrekking tot de verdere ontwikkeling van het huidige slibmodel en de toepassing voor beheerscenario's, bevelen wij aan:

- De gevoeligheid van de modelresultaten voor de gebruikte golfschematisatie (strijklengte-aanpak) te onderzoeken. De koppeling met een golfpropagatiemodel (SWAN) is recentelijk technisch mogelijk geworden en dit leidt tot betere golfvoorspellingen. Daarmee wordt ook de relatie tussen wind en golfresuspensie op een specifiek punt minder sterk (er vindt dan immers ook golfpropagatie plaats) en mogelijk invloed op de slibdynamiek. In eerste instantie kan men hiervoor de vergelijking tussen de strijklengte-aanpak en SWAN golven voor de San Francisco Bay volgen, die begin volgend jaar wordt afgerond (pers. comm. Mick van der Wegen).
- Verzamel hoogfrequente metingen van SPM in de Waddenzee en vergelijk deze (indien deze beschikbaar komen) met het model om het effect van stormen in het model te verifiëren; en daarnaast ook ter validatie van het intragetijsignaal. Concrete voorstellen voor nieuwe metingen zijn voor dit project gerapporteerd in Dankers et al. (2019) en Vroom et al. (2020b).
- Toepassing van het nieuw ontwikkelde modelinstrumentarium voor nieuwe doeleinden kan aanvullende modelopzet en -kalibratie vereisen. Bijvoorbeeld:
    - Indien het huidige model ingezet gaat worden voor het berekenen van baggervolumes, kan het voor kleine geulen noodzakelijk zijn een roosterverfijning uit te voeren. Met de Flexible Mesh software is dit redelijk eenvoudig, al kost het wel aanvullende rekentijd. De eerdergenoemde Holwerdstudie dient hierbij als goed voorbeeld.
    - Ook is het model in huidige opzet niet geschikt voor het modelleren van zandig sediment. Daarvoor kan de D-Morphology module van de Flexible Mesh software suite worden aangewend.
- Simuleer meerdere jaren achtereen, om in meer detail het effect van de jaarlijks verschillende meteorologie op de slibdynamiek inzichtelijk te maken. Onderzoek of langjarige (enkele jaren) import kan leiden tot een verhoging van een SPM in het model. Onderzoek welke windcondities of -combinaties leiden tot verhoogde import van slib om uiteindelijk op basis van de meteorologie een uitspraak te kunnen doen over fluctuaties in SPM. Het gebruik van de nieuwe software vergemakkelijkt het doorrekenen van langjarige periodes met variabele meteorologie en hydrodynamica, omdat deze software beter parallel rekent.
- De verblijftijd en de hoeveelheid actief slib in de Waddenzee zijn belangrijk om de responstijd op grootschalige beheeringrepen mede bepalen. Om een betere inschatting te krijgen van de verblijftijd en de hoeveelheid actief slib in de Waddenzee is aanvullende modelkalibratie nodig. Voor een dergelijke modelkalibratie zijn hoogfrequente veldmetingen benodigd. Door middel van labelen kan de verblijftijd in het model preciezer worden bepaald. De geschatte verblijftijd op basis van de modelresultaten kan worden vergeleken met tracerstudies uit literatuur.
- Indien beheerscenario's worden onderzocht, voer dan eerst een hydrodynamische optimalisatie uit. Dat wil zeggen dat het ontwerp van een slibvang eerst wordt geoptimaliseerd vanuit hydrodynamisch oogpunt (stroomsnelheden in toegangsgeul, mate van getijdemping in de slibvang en effect op stroomsnelheden in het bekken). De eerste vingeroefeningen hiervoor laten zien dat de uitwisseling tussen slibvang en Waddenzee een belangrijke invloed hebben.

6 Referenties

Cleveringa, J. (2018). *Slibsedimentatie in de kwelders van de Waddenzee. Bijdrage aan de kwantificering van sinks voor slib in de Waddenzee i.h.k.v. project KRW Slib.* Arcadis.

Colina Alonso, A. (2020). *Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee. Data analyse.* Deltares rapport 11203669-004.

Colosimo, I., de Vet, P. L., van Maren, D. S., Reniers, A. J., Winterwerp, J. C., & van Prooijen, B. C. (2020). *The impact of wind on flow and sediment transport over intertidal flats.* Journal of Marine Science and Engineering, 8(11), 910.

Dankers, P., De Vries, B. en Cleveringa, J. (2019). Voorstel nieuwe metingen slibhuishouding Waddenzee. Memo Royal HaskoningDHV. Kenmerk: BG2802-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0001.

Duran-Matute, M., Gerkema, T., & Sassi, M. G. (2016). *Quantifying the residual volume transport through a multiple-inlet system in response to wind forcing: The case of the western Dutch Wadden Sea.* Journal of Geophysical Research: Oceans (121), 7431-7454.

Eisma D., Berger G.W., Wei-Yue C., Jian S. (1989) *Pb-210 as a tracer for sediment transport and deposition in the Dutch-German Waddensea.* In: van der Linden W.J.M., Cloetingh S.A.P.L., Kaasschieter J.P.K., van de Graaff W.J.E., Vandenberghe J., van der Gun J.A.M. (eds) Coastal Lowlands. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-1064-0_16

Grasmeijer, B., Van Weerdenburg, R. (2020). *Evaluatie Bochtafsnijding Vaarweg Ameland.* Rapport 11205229-006-ZKS-0002, Deltares, Nederland.

Herman, P., van Kessel, T., Vroom, J., Dankers, P., Cleveringa, J., de Vries, B., & Villars, N. (2018). *Mud dynamics in the Wadden Sea. Towards a conceptual model.* Deltares report 11202177-000-ZKS-0011.

Laane, R. W. P. M., Sonneveldt, H. L. A., Van der Weyden, A. J., Loch, J. P. G., & Groeneveld, G. (1999). *Trends in the spatial and temporal distribution of metals (Cd, Cu, Zn and Pb) and organic compounds (PCBs and PAHs) in Dutch coastal zone sediments from 1981 to 1996: a model case study for Cd and PCBs.* Journal of Sea Research, 41(1-2), 1-17.

Perk, L. (2016). *Hydromorfologische advisering Kwelderontwikkeling Terschelling. WaterProof Marine Consultancy & Services B.V..* Kenmerk 01338536, AGV-nr. 23353

Pearson, S.G., Van Prooijen, B.C., De Wit, F.P., Meijer-Holzhauer, H., De Looff, A.P., Wang, Z.B. (2020). *Observations of suspended particle size distribution on an energetic ebb-tidal delta.* Coastal Sediments Conference paper. https://doi.org/10.1142/9789811204487_0172

Sittoni, L., de Boer, G, van Kessel, T., van Maren, B. (2012). *TO Slibmodellering Zoute Wateren. Resultaten 2010.* Deltares rapport 1202283-000

Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B. en Herman, P. (2020a). *Modellering slibdynamiek voor de Waddenzee. Kalibratie voor KRW slib.* Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0001.

Vroom. J., B. Smits, P. Dankers, J. Cleveringa (2020b). *Memo Voorstel nieuwe meting zwevend stof Dantziggat*. Memo Arcadis. Kenmerk: D10005055:9

A Implementatie microfytobenthos in D-Water Quality

A.1 Introduction

The Suspended Particulate Matter (SPM) and mass of sediments in the bed vary seasonally, as well as on a timescale of multiple years. These fluctuations are governed by hydrodynamic conditions (i.e. larger waves in winter than in summer, variations in fresh water discharge, residual flows driven by wind, etc.) and interactions with ecology (flocculation of mud particles by algae increasing the settling velocity, bioturbation, reduction of suspended mud concentration by filter feeders, fixation of mud by algae on the bed). One of the most dominant processes of the latter category is the biofilm produced by microphytobenthos, which causes mud accumulation on (intertidal) shoals due to an increased resistance against erosion. The accumulation potential is largest in summer - due to the large solar irradiance and higher water temperature - but is also influencing mud dynamics in the rest of the year.

In standard Delft3D modelling assignments this process is not included, such that the seasonality of SPM in the model simulations may be underestimated. Up to now, the influence of ecology has been simplified in various ways (e.g. by imposing a sinusoidal resistance against erosion or implicitly in the sediment properties). Algae mats (microfytobenthos) create a biofilm on the sediment bed that increases the resistance again erosion. By computing the biofilm produced by microphytobenthos and its development based on light climate, improved seasonality and also year-to-year variations can be included to improve our model results. This would for example lead to improved SPM reproduction and improved prediction of dredging volumes.

This appendix describes the implementation of dynamic biofilm growth and biofilm-mud interactions in the process library of D-Water Quality (DELWAQ), as well as its application in modelling the sediment dynamics in intertidal areas. The dynamic biofilm growth (i.e. produced by microphytobenthos) is implemented such, that for each water system site-specific characteristics of the microphytobenthos (for instance growth rate) can be adjusted.

A.2 Implementation

Formulations for the development (i.e. growth and decay) of a biofilm layer and the effect of the biofilm layer on the resuspension of mud have been largely based on work by Elena Bastianon (Postdoc at University of Hull) and Pivato et al. (2018).

A.2.1 Formulations

In the conceptual model of biofilm-mud interactions, the resistance of mud particles against erosion increases with the development of a biofilm layer. In addition, freshly settled mud particles may be mixed with more developed (i.e. stronger) mud layers in the bed by the vertical migration of benthic diatoms. The strength (i.e. resistance against erosion) of freshly settled mud particles therefore increases faster if microphytobenthos are present. The first effect is schematized as an increase of the critical shear stress for resuspension of mud based on the local biofilm biomass. The critical bed shear stress for resuspension of mud increases linearly with the biofilm biomass B in *[g Chl-a/m^2]*. α is a linear coefficient to scale the effect of the biofilm biomass on the critical shear stress for resuspension.

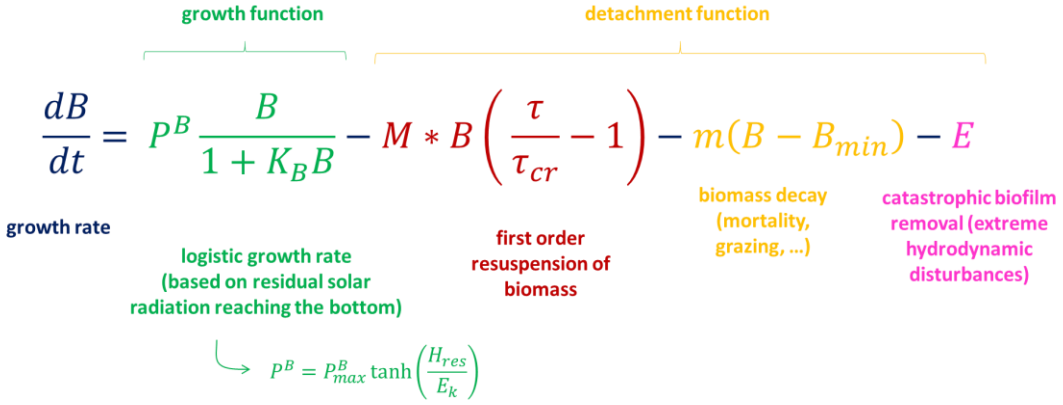
$$\tau_{cr} = \tau_{cr,0} + \alpha * B$$

The second effect, in which the strength of freshly settled mud increases faster by the presence of microphytobenthos, can only be applied if there is heterogeneity of mud properties in the bed. In practice, it could be the case that there are multiple sediment layers with different properties; the strength of layers increases deeper into the bed. The effects of microphytobenthos are schematised by an increase in the burial rate r_b, which is the speed by which mud is transferred towards the layer below. The increase in burial rate scales linearly with the biofilm biomass B, in which γ is a linear coefficient:

$$r_b = r_{b,0} + \gamma * B$$

Mariotti & Fagherazzi (2012) came up with a simple model for growth of benthic biofilms subject to variable hydrodynamic forcing and biostabilisation, adding onto previous work by Uehlinger et al. (1996) and Boulétreau et al. (2008). The biomass development is a function of (logarithmic) growth and decay due to chronic self-generated detachment and resuspension by hydrodynamic forcing. The biomass growth rate is influenced by the spatial and temporal variations in solar radiation, temperature, water turbidity and water depth. The biofilm biomass is thus affected by multiple factors. These are included in the equation below and the different terms in this equation will be discussed in more detail in the remaining part of this paragraph.

- The growth rate of the biofilm biomass is defined as a unit mass Chl-a per square meter per unit time (e.g. *[g Chl-a/m^2/d]*).
- The growth function (illustrated in green) is defined as a logarithmic growth function. Here, B is the biofilm biomass in *[g Chl-a/m^2]* and K_B is the half saturation constant for biofilm growth in *[m^2/g]*. The growth rate P^B is defined based on the maximum biofilm growth rate P^B_{Max} in *[1/d]*, the irradiation at the biofilm layer H_{res} in *[W/m^2]* and the visible light saturation parameter E_k in *[W/m^2]*.
- The detachment function consists of multiple parts. The first part (illustrated in red) is a first order resuspension rate (i.e. linearly depending on the biofilm biomass B) of the biofilm biomass by hydrodynamic forcing. The hydrodynamic forcing acting on the biofilm is included as the total bottom shear stress τ in *[N/m^2]*. Other parameters included in this part are the resuspension velocity of the biofilm biomass M in *[1/d]* and the critical shear stress for resuspension of the biofilm biomass τ_{cr} in *[N/m^2]*.
- The second part of the detachment function (illustrated in yellow) represents biofilm detachment by processes different than hydrodynamic forcing (i.e. mortality, grazing, …). The detachment rate is defined as the biofilm decay parameter m in *[1/d]* times the biofilm biomass above a certain background biofilm biomass B_{min}.
- The third part of the detachment function (illustrated in pink) mimics so-called catastrophic biofilm removal E during extreme hydrodynamic disturbances. If catastrophic biofilm removal occurs, the biofilm biomass will be resuspended completely.



A.2.2 Implementation in D-Water Quality

This section includes some additional background on the implementation of the formulations that were discussed in the previous section in D-Water Quality using the nomenclature that is commonly used in the D-Water Quality source code. The growth and decay of the biofilm biomass are included in process *BiofilmDev*. The effect of the biofilm biomass on the critical bed shear stress for resuspension of mud are included in processes *Res_Pickup* and *S12TraIMx* (i.e. *S12TraIM1*, *S12TraIM2*, *S12TraIM3*). Effects of the biofilm biomass on the burial rate are included in process *Bur_DM.*

The process *BiofilmDev* determines the biofilm biomass in each computational cell. This single biofilm is then affecting the resuspension rate from bed layer(s) S1 and/or S2 and/or the burial rate. A list of relevant input parameters is included in Table 1. Output parameters from process *BiofilmDev* are listed in Table 2. *Biofilm [g/m^2]* is the biofilm biomass. *BiofMin [g/m^2]* is the minimum background biofilm biomass. The biofilm biomass should never be lower than *BiofMin* in order for the biofilm to recover. This is checked and corrected if necessary during every timestep if the process *BiofilmDev* is active.

Growth Function

The half saturation constant for biofilm growth is named *KsBiof [m^2/g]*. The actual growth rate *PBiof* is computed based on input parameter *PBiofMax [1/d],* the irradiation at the segment lower-boundary *RadBot [W/m^2]* and the visible light saturation parameter *SatVlg [W/m^2]. RadBot* may be computed by D-Water Quality process *CalcRad* based on the irradiation at the water surface and the extinction coefficient of visible light *ExtVl [1/m]*. *ExtVl* may be computed dynamically by process *Extinc_VLG*.

$$\mathrm{BiofGro} = \mathrm{PBiof} * \frac{\mathrm{Biofilm}}{1 + \mathrm{KsBiof} * \mathrm{Biofilm}}$$

$$\mathrm{PBiof} = \mathrm{PBiofMax} * \tanh\left(\frac{\mathrm{RadBot}}{\mathrm{SatVlg}}\right)$$

! *In Mariotti & Fagherazzi (2012) and in Pivato et al. (2019) the maximum growth rate is dependent on the surface sediment temperature. The temperature dependence is not included in the current implementation in the process library of D-Water Quality. The growth function is therefore only dependent on the light intensity as meteorological condition.*

Detachment function

In case the total bed shear stress *Tau* does not exceed the critical bed shear stress for catastrophic biofilm removal *TaucBiof*, the total decay rate is determined by adding the resuspension rate and the mortality rate. The resuspension velocity of the biofilm biomass is named *VResBiof [1/d]*. The excess bed shear stress is computed as (*Tau / TaucRBiof – 1),* where *TaucRBiof [N/m^2]* is the critical shear stress for resuspension of the biofilm biomass.

! *In the current implementation, the critical shear stress for resuspension of the biofilm biomass is set equal to the critical shear stress for resuspension of sediment from layer S2, which is adjusted from the input value (i.e. TauShields or TaucRS2IMx) by the presence of biofilm biomass (i.e. according to the formulation that will be discussed below). The critical shear stress for resuspension of sediment from layer S2 is used because the biofilm biomass is considered as mixed into the sediment bed. This implies that the biofilm is (partially) being removed if sediment is resuspended from the buffer layer S2. Layer S2 is preferred above layer S1 based on the average residence time of mud in the bed (~hours-days in layer S1 ~weeks-months in layer S2).*

The mortality rate is determined by the biofilm decay parameter *DecBiof [1/d]* times the biofilm biomass above the minimum background biofilm biomass.

$$\text{Tau} \leq \text{Taucbiof}: \quad \text{BiofDec} = \text{VResBiof} * \text{Biofilm} * \left(\frac{\text{Tau}}{\text{TaucRBiof}} - 1\right) + \text{DecBiof} * (\text{Biofilm} - \text{BiofMin})$$

In case bottom segments are dry, the detachment function reduces to the mortality rate.

In case the bed shear stress *Tau [N/m²]* exceeds the threshold for catastrophic biofilm removal *TaucBiof*, the biofilm biomass reduces to *BiofMin* within one timestep.

$$\text{Tau} > \text{TaucBiof}: \quad \text{BiofDec} = \frac{(\text{Biofilm} - \text{BiofMin})}{\text{DELT}} \qquad \text{(catastrophic biofilm removal)}$$

Adjustment of mud properties

The critical shear stress for resuspension of both sediment layers *S1* and *S2* may be adjusted to account for the presence of biofilm biomass. The background critical shear stresses of bed layers *S1* and *S2* (i.e. *TaucRS1IMx* and *TaucRS2IMx*) for a certain sediment fraction IM_x are adjusted to the effective critical shear stresses $TaucRS1IMx_{eff}$ and $TaucRS2IMx_{eff}$ by adding the biofilm biomass times a linear coefficient. This coefficient is named *AlphBiofS1* for layer *S1* and *AlphBiofS2* for layer *S2*.

$$\text{TaucRS1IMx}_{\text{eff}} = \text{TaucRS1IMx} + \text{AlphBiofS1} * \text{Biofilm}$$

$$\text{TaucRS2IMx}_{\text{eff}} = \text{TaucRS2IMx} + \text{AlphBiofS2} * \text{Biofilm}$$

In case the resuspension from layer *S2* is determined according to the Van Rijn pick-up formulations (i.e. process *Res_Pickup* is active), the latter of the two equations above changes accordingly.

$$\text{TauShields}_{\text{eff}} = \text{TauShields} + \text{AlphBiofS2} * \text{Biofilm}$$

The user may decide whether corrections to the critical bed shear stresses for resuspension of both sediment layers should be applied. By setting either *AlphBiofS1* or *AlphBiofS2* to zero, only one of the two layers is affected.

By setting a positive value for *AlphBioBur [m2/g/d]*, the first order burial rate *VBurDMS1 [1/d]* from layer S1 to layer S2 increases linearly with the biofilm biomass. This can only be applied if the related burial process (i.e. *Bur_DM*) is turned on. By setting *AlphBioBur* equal to zero, the background value for the first order burial rate is used (i.e. the biofilm biomass does not affect the burial rate).

$$\text{VBurDMS1}_{\text{eff}} = \text{VBurDMS1} + \text{AlphBioBur} * \text{Biofilm}$$

Table 1: List of input parameters and their default values that are relevant for modelling the dynamic biofilm development and biofilm-mud interactions. New parameters are listed in black. Existing parameters are listed in grey.

parameter	unit	default value	description
Biofilm	g Chl-a/m^2	0	biofilm biomass
BiofMin	g Chl-a/m^2	0.001	minimum background biofilm biomass
KsBiof	m^2/g Chl-a	30	half saturation constant for biofilm growth
PBiofMax	1/d	1.0	maximum biofilm growth rate (site specific)
SatVlg	W/m^2	100	visible light saturation parameter

TaucBiof	N/m^2	1	critical shear stress for catastrophic biofilm removal
VResBiof	1/d	0	first order resuspension velocity for biofilm biomass
DecBiof	1/d	0.2	biofilm decay parameter
AlphBiofS1	N/g Chl-a	0	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the critical shear stress for resuspension of layer S1
AlphBiofS2	N/g Chl-a	0	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the critical shear stress for resuspension of layer S2
AlphBioBur	m^2/g Chl-a /d	0	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the first order burial rate for layer S1
RadBot	W/m^2	-999	irradiation at the segment lower-boundary; output from process *CalcRad*
TaucRS1IM$_x$	N/m^2	0.2	critical shear stress for resuspension of sediment fraction IM$_x$ from layer S1
TaucRS2IM$_x$	N/m^2	0.5	critical shear stress for resuspension of sediment fraction IM$_x$ from layer S2
TauShields	N/m^2	0.2	Shields shear stress for resuspension pick-up from layer S2
VBurDMS1	1/d	0	first order burial rate for layer S1

Table 2: Output parameters from process BiofilmDev in D-Water Quality.

parameter	unit	description
BiofGro	g Chl-a/m^2/d	biofilm growth
BiofDec	g Chl-a/m^2/d	biofilm detachment/decay

A.3 Application

A.3.1 Description of test case

The method to include dynamic biofilm development and the effect of the biofilm on the resuspension of mud has been applied in a Delft3D-Flexible Mesh Water Quality model of a schematised tidal basin representative for a tidal basin in the Wadden Sea. The model consists of a single tidal basin that is separated from the offshore sea by two barrier islands. Exchange between the tidal basin and the offshore sea takes place through the inlet between the two barrier islands.

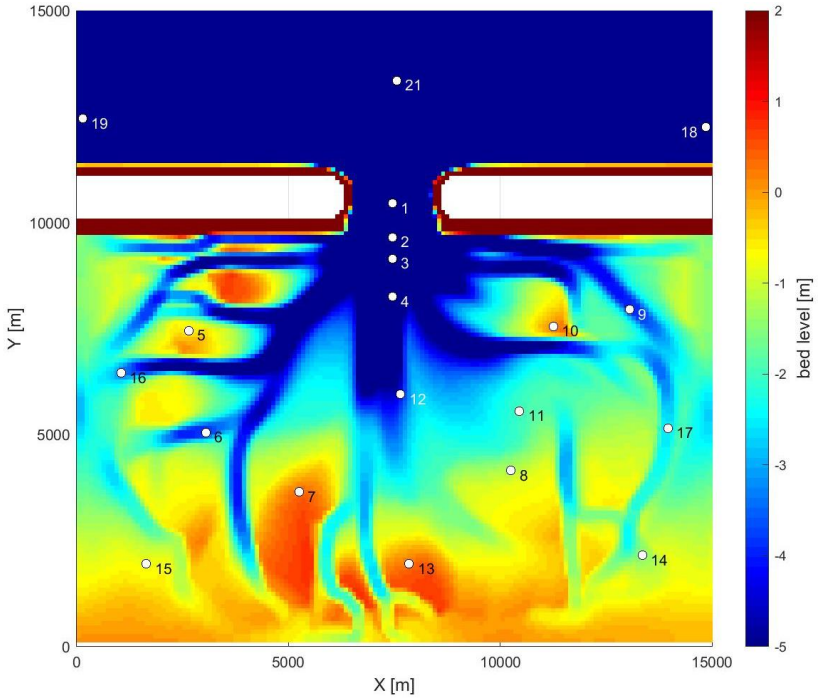


Figure 3: Bathymetry of the schematised tidal basin (i.e. relative to MSL) and output locations in the model. The model domain extends further offshore than illustrated here (i.e. to Y = 20 000 m, therefore observation point 20 is not visible in this figure).

The bathymetry of the model is based on a morphodynamic model simulation of 50 years from an initially flat bathymetry (see Figure 3). An S2 tidal water level variation with amplitude 1.5 m is forced at the northern offshore boundary of the model. Neumann water level boundaries are set at the other two offshore boundaries. The boundaries of the back-barrier basin are closed, which implies there is no exchange of matter over the tidal divides. Time series of spatially uniform wind conditions are based on field data measured in the Dutch Wadden Sea. Waves are generated by local wind conditions based on a fetch-length approach. Here, the wave height in a certain grid cell is determined based on the wind conditions, the fetch length, and the local water depth. Bottom shear stresses contain contributions of both waves and currents.

The (fine) sediment transport model has two sediment layers (i.e. S1 and S2). Exchange from layer S1 to layer S2 takes place by burial of sediments. Two sediment fractions are included (i.e. IM1 and IM2), which only differ in settling velocity. Relevant settings for the (fine) sediment transport model are listed in Table 3. The initial sediment composition of bed layer S2 is based on the results of earlier model simulations with the same model (see Figure 4). The initial mass in layer S1 and initial concentrations are 0. At the northern offshore boundary, the sediment concentration for each of the two sediment fractions IM1 and IM2 is set to 10 mg/l.

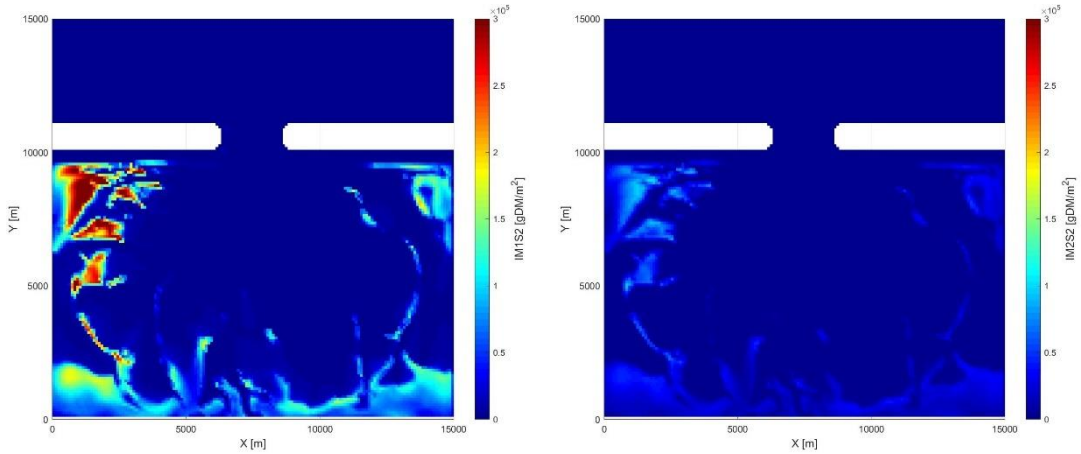


Figure 4: Initial sediment mass in layer S2 in model simulations; IM1S2 (left) and IM2S2 (right). Layer S1 is empty at the start of model simulations.

Table 3: Settings of the (fine) sediment transport model.

parameter	value	description
VSedIM1	$1.296*10^2$ m/d = 1.5 mm/s	Sedimentation velocity IM1
VSedIM2	$3.456*10^1$ m/d = 0.4 mm/s	Sedimentation velocity IM2
ZResIMx	$2.4*10^3$ gDM/m^2/d	Zeroth-order resuspension flux of IMx
VResIMx	0.2 1/d	First-order resuspension velocity of IMx
TaucRS1IMx	0.1 N/m^2	Critical shear stress for resuspension of IMx from layer S1
FactResPup	$3.5*10^{-7}$	Factor for resuspension pick-up from layer S2
TauShields	1.0 N/m^2	Shield shear stress for resuspension pick-up from layer S2
PsedminIMx	0.1	Deposition efficiency IMx
VBurDMS1	0.05	First order burial rate for layer S1

The first model tests that are presented here use settings as listed in Table 4. The biofilm biomass affects the resuspension from both layers S1 and S2, whereas it does not affect the burial rate. A wide range of possible values for the maximum biofilm growth rate is discussed in literature (e.g. Mariotti & Fagherazzi (2012)), mainly because the parameter is site specific. For conditions in the Dutch Wadden Sea the right value is yet unknown. Here, the sensitivity of the model results to the maximum biofilm growth rate was investigated through two simulations with different values for the parameter *PBiofMax* (0.4 d^{-1} and 0.2 d^{-1}).

Table 4: Settings of the BiofilmDev process in the test case.

parameter	unit	chosen value	description
BiofMin	g/m^2	0.001	background biofilm biomass
KsBiof	m^2/g	20	half saturation constant for biofilm growth
PBiofMax	1/d	0.4 (run12) and 0.2 (run13)	maximum biofilm growth rate
SatVlg	W/m^2	100	visible light saturation parameter
TaucBiof	N/m^2	10	critical shear stress for catastrophic biofilm removal

VResBiof	1/d	0.1	first order resuspension velocity for biofilm biomass
DecBiof	1/d	0.05	biofilm decay parameter
AlphBiofS1	N/gDM	0.1	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the critical shear stress for resuspension of layer S1
AlphBiofS2	N/gDM	1	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the critical shear stress for resuspension of layer S2
AlphBioBur	m^2/g Chl-a /d	0	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the first order burial rate for layer S1

A.3.2 Results of test case and sensitivity to the maximum biofilm growth rate

Three different model runs are discussed in this paragraph. Run01 was a reference simulation for 1 year without biofilm development. In run12 and run13 the biofilm development is included according to the settings in Table 4, with respectively *PBiofMax* 0.4 d^{-1} and 0.2 d^{-1}. Note that the model was not yet in (dynamic) equilibrium.

The seasonal pattern in biofilm development observed in the field (Figure 5) is reproduced by the model simulations (Figure 6): the biofilm biomass starts to grow in early spring, peaks in mid-summer and decreases again in autumn. The locations of the observation points that are included in Figure 6 is shown in Figure 3. Generally, point 3 is located in the deep channel near the tidal inlet, point 6 is located at the end of a channel, point 7 is located at a high intertidal area and point 8 is located at a low intertidal area. Additional model results of run12 and run13, including spatial plots of the biofilm throughout time, are provided in Appendix A.1 of this memo.

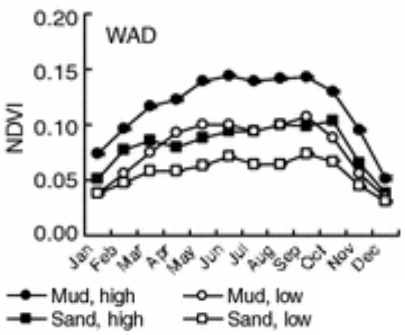


Figure 5: Seasonal variation in normal monthly (±SE) NDVI (a measure for microphytobenthos cover) depending on sediment type (mud/sand) and emersion (low: <50% emersion, high: ≥50% emersion). Copied from Van Der Wal et al. (2010).

By decreasing the maximum biofilm growth rate (*PBiofMax;* run13 relative to run12), the biofilm biomass increases more gradually in spring. Although the maximum biofilm growth rate is only 2 times lower (in run 13), the maximum biofilm biomass may be only 10% of the original value (in run 12).

Effects of increased resistance against erosion

Figure 7 and Figure 8 show that the biofilm causes additional trapping of bed sediments (layer S2) on intertidal areas during the summer (observation points 6, 7 and 8), with the strongest response on higher intertidal areas (observation point 7). Only results of sediment fraction IM1 in layer S2 are illustrated here; effects on sediment fraction IM2 are similar. On the other hand, during these summer months the biofilm causes a decrease of SPM in the water column (Figure 9), the influence

of which extends far beyond the local grid cell (e.g. observation point 3 is also influenced). For the lower value of the maximum biofilm growth rate (i.e. run13; Figure 10), the influence on SPM values is only low. Moreover, the biofilm causes a decrease in bed sediments in the fluff layer (layer S1, see Figure 15 and Figure 16 in Appendix A.2) that is in line with the decrease in SPM. These effects on sediments in the bed and water column correspond to observations in the field.

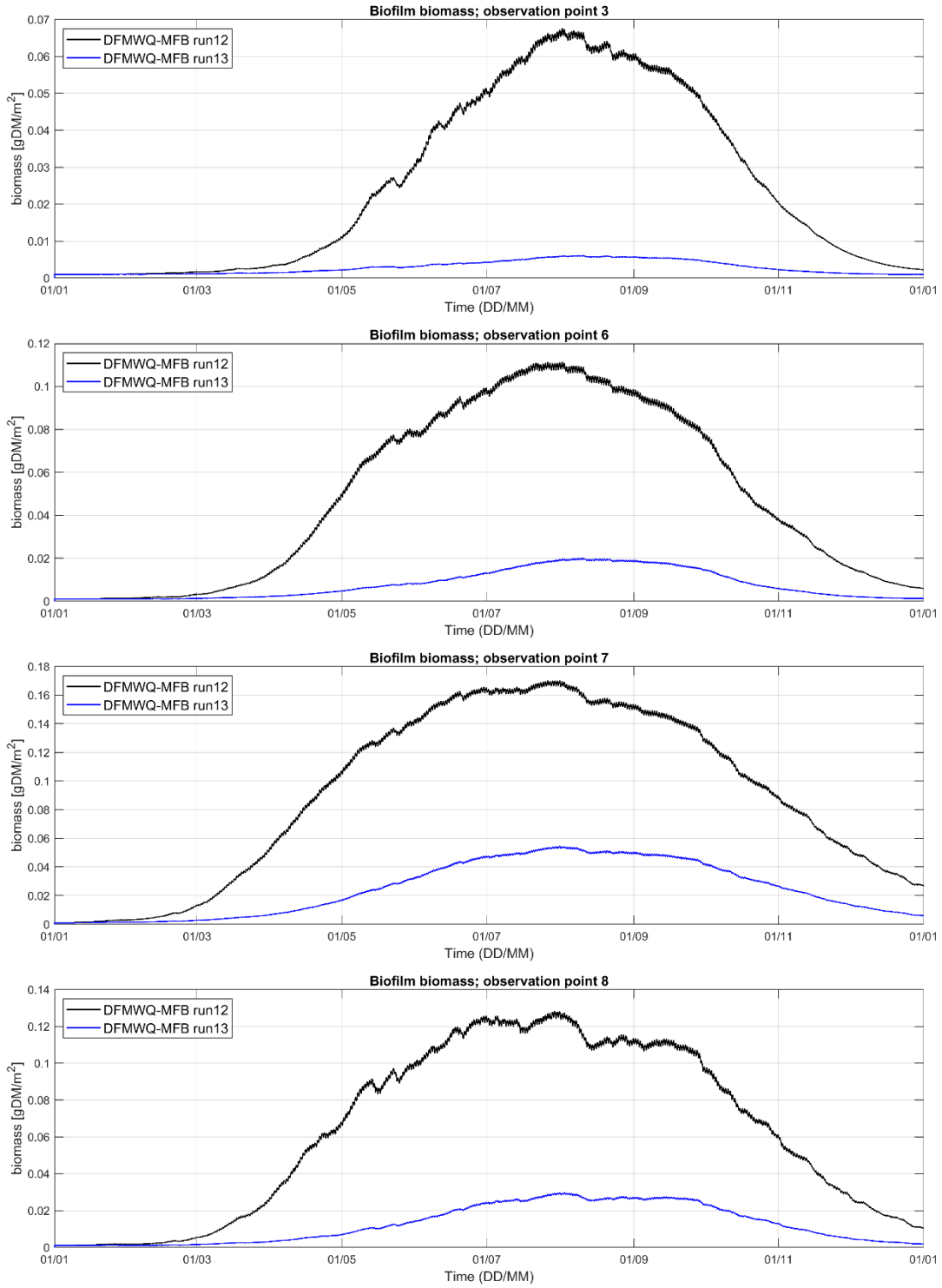


Figure 6: Development of the biofilm biomass throughout the year for maximum growth rates of 0.4 d^{-1} (black line) and 0.2 d^{-1} (blue line). Subpanels from top to bottom show observation points 3 (deep channel, near inlet), 6 (end of channel), 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

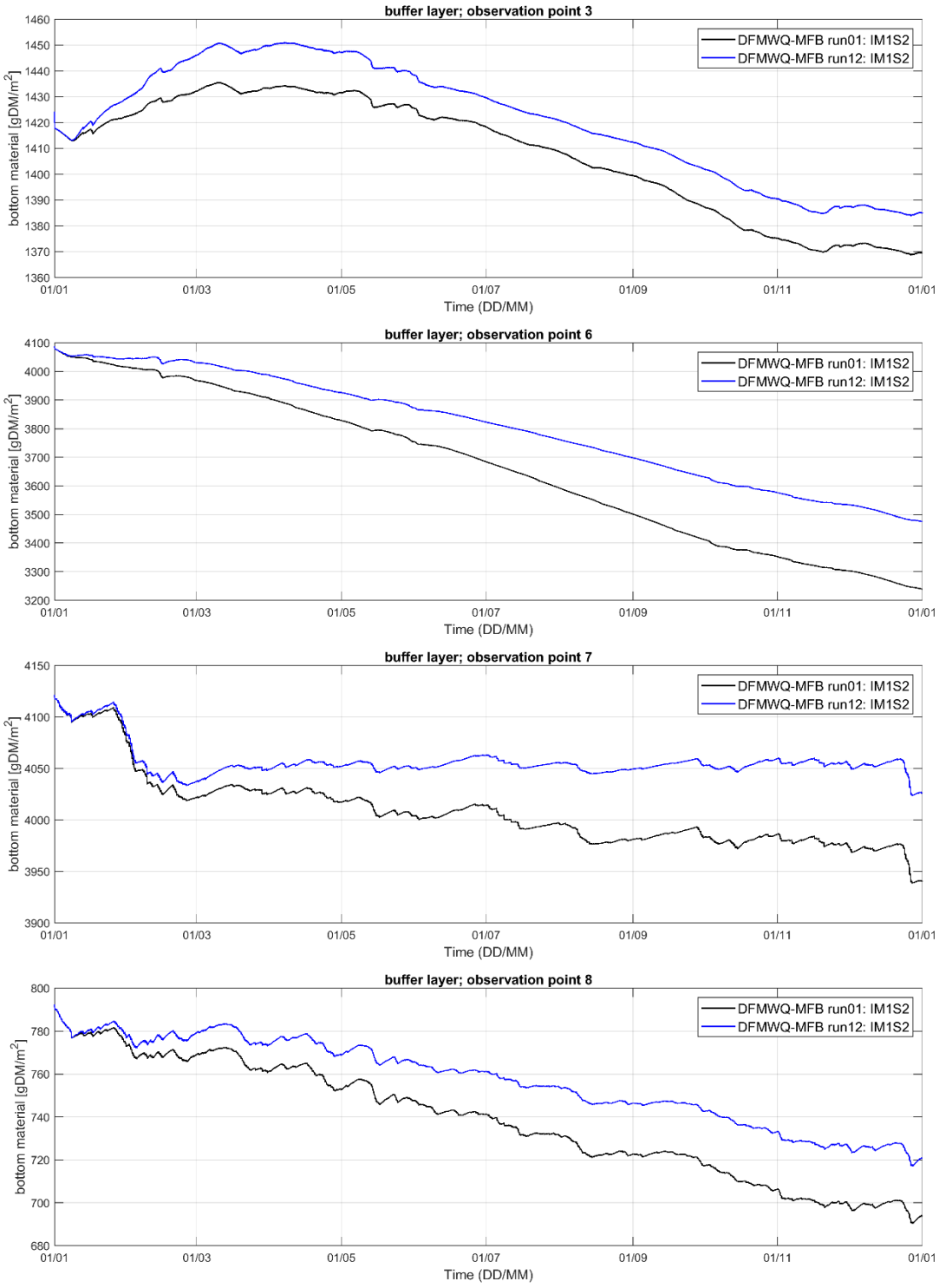


Figure 7: Mass of sediment in the buffer bed layer (S2) with the black line indicating the simulation without biofilm (run01) and the blue line indicating the simulation with biofilm for a maximum growth rate of 0.4 d^{-1} (run12). Subpanels from top to bottom show observation points 3 (deep channel, near inlet), 6 (end of channel), 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

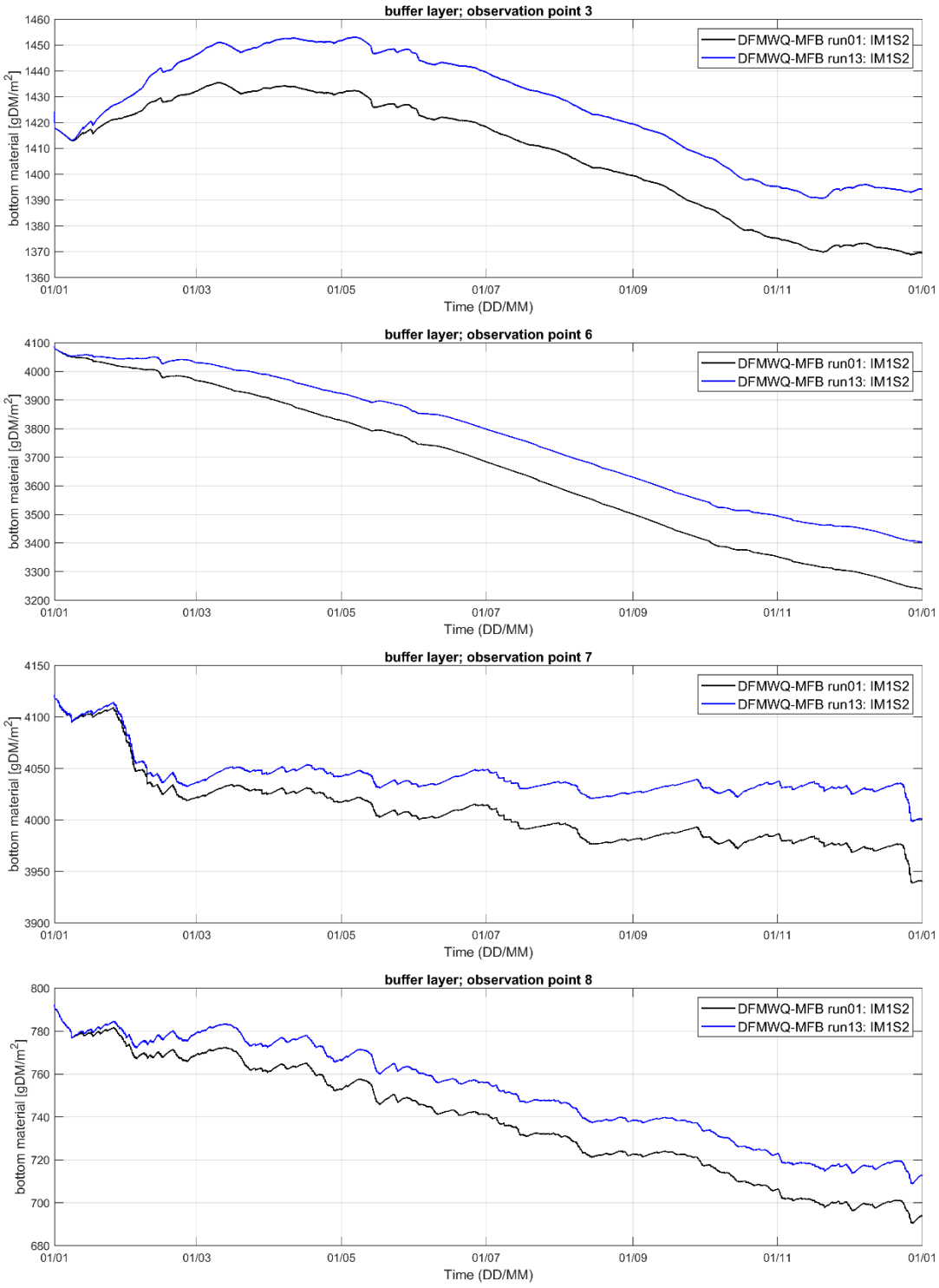


Figure 8: Mass of sediment in the buffer bed layer (S2) with the black line indicating the simulation without biofilm (run01) and the blue line indicating the simulation with biofilm for a maximum growth rate of 0.2 d^{-1} (run13). Subpanels from top to bottom show observation points 3 (deep channel, near inlet), 6 (end of channel), 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

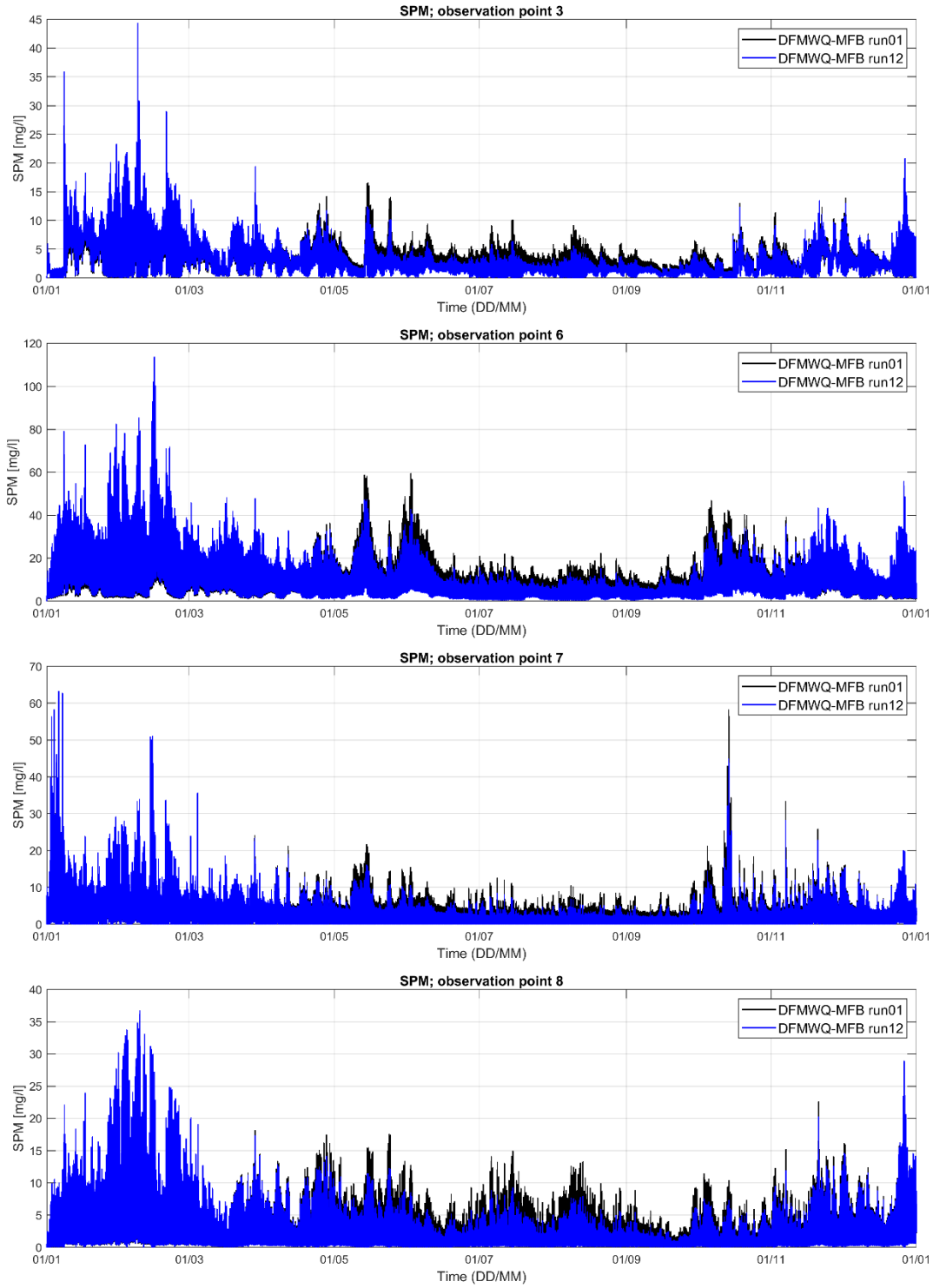


Figure 9: SPM in the water column [mg/L] with the black line indicating the simulation without biofilm (run01) and the blue line indicating the simulation with biofilm for a maximum growth rate of 0.4 d^{-1} (run12). Subpanels from top to bottom show observation points 3 (deep channel, near inlet), 6 (end of channel), 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

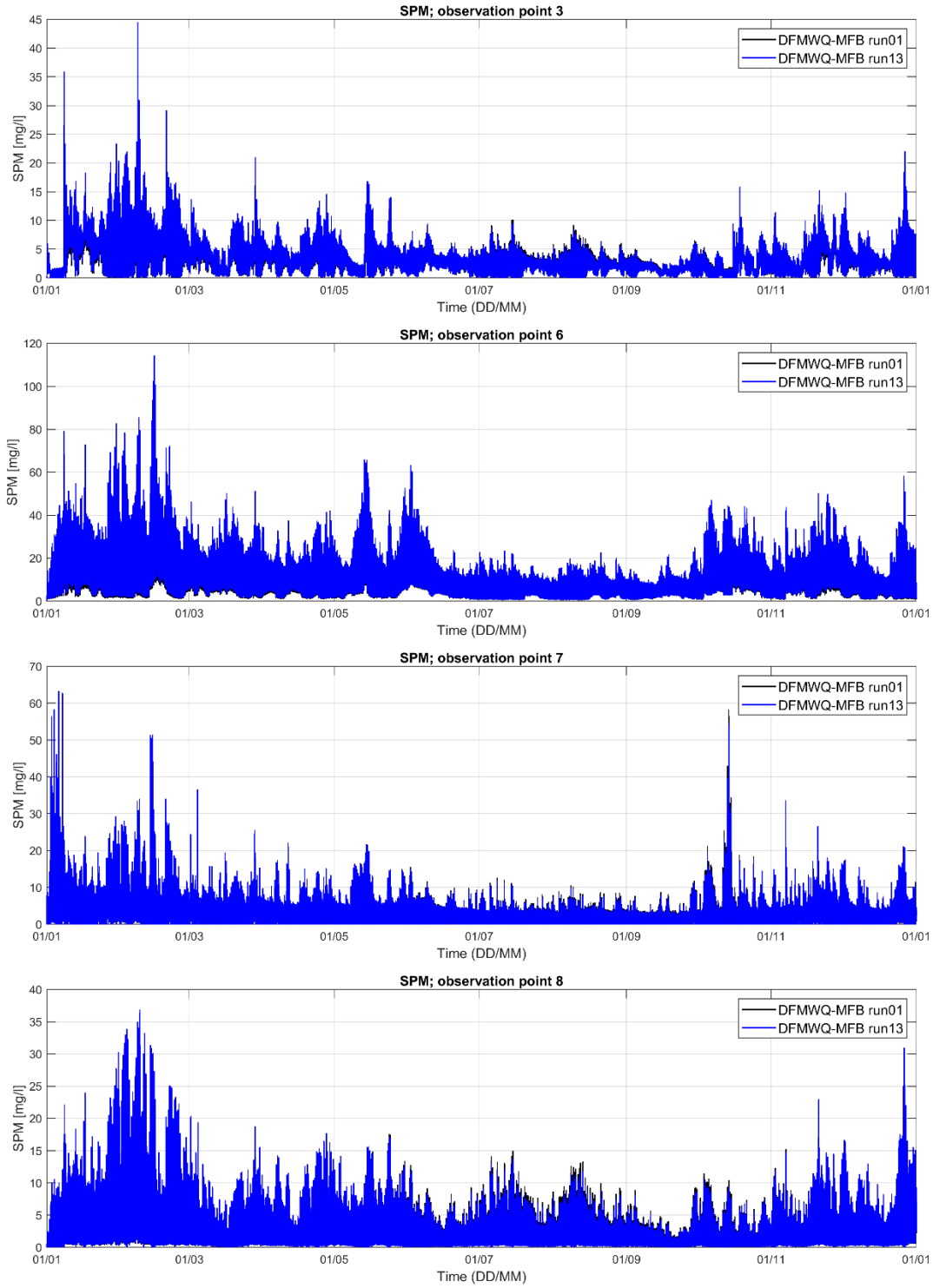


Figure 10: SPM in the water column [mg/L] with the black line indicating the simulation without biofilm (run01) and the blue line indicating the simulation with biofilm for a maximum growth rate of 0.2 d^{-1} (run13). Subpanels from top to bottom show observation points 3 (deep channel, near inlet), 6 (end of channel), 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

A.3.3 Additional model tests

Some additional model tests are discussed in this section. Run12 from the previous section is often used as a reference simulation.

Increase in burial rate

In the previous paragraph the biofilm biomass was affecting the critical shear stress for resuspension of both layers S1 and S2. Alternatively, the increase in critical shear stress for resuspension of layer S2 is combined with an increase in the burial rate from layer S1 to layer S2. Then the strength of layer S1 does not increase, but mud particles are transferred faster to the stronger layer S2. In two different runs (i.e. run14 and run18) the settings for the biofilm development were the same as in Section A.3.2, with *PBiofMax* = 0.4 d^{-1} (i.e. as in run12). The settings for the biofilm-mud interactions are as listed in Table 5.

Table 5: Settings for the biofilm-mud interactions in run14 and run18.

parameter	unit	description	run14	run18
AlphBiofS1	N/gDM	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the critical shear stress for resuspension of layer S1	0	0
AlphBiofS2	N/gDM	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the critical shear stress for resuspension of layer S2	1	1
AlphBioBur	m^2/g Chl-a /d	linear coefficient for the effect of biofilm biomass on the first order burial rate for layer S10	0	0.1

Run14 thus differs from run12 (Section A.3.2) by the fact that *AlphBiofS1* is set to 0. In run18, the burial rate increases with the biofilm biomass. This generally leads to less sediment mass in layer S1 and more sediment mass in layer S2. Eventually, this causes lower SPM values when the biofilm biomass is high (i.e. in summer). This is illustrated in Figure 11. By increasing AlphBioBur, the effect on SPM will become larger. The proper value for AlpBioBur for a certain application should follow from a comparison with field data and calibration.

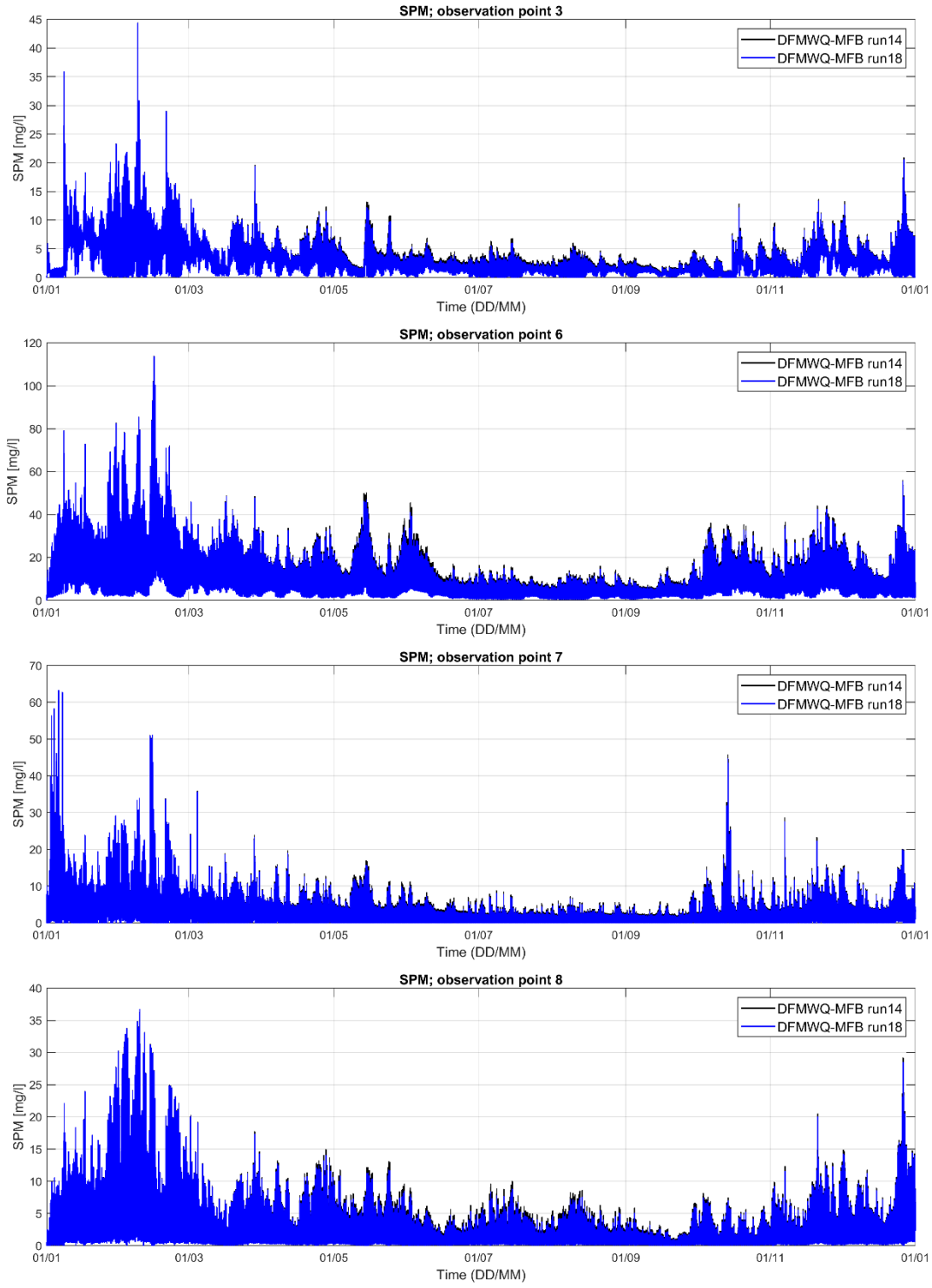


Figure 11: SPM in the water column [mg/L] with the black line indicating a simulation without an increased burial rate due to the presence of biofilm biomass (run14) and the blue line indicating a simulation with an increased burial rate due to the presence of biofilm biomass (run18). Subpanels from top to bottom show observation points 3 (deep channel, near inlet), 6 (end of channel), 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

Increased background extinction rate

The irradiation at the water surface is transferred towards the sediment bed by using a certain extinction coefficient. The extinction coefficient is calculated by adding several contributions (e.g. from algae, dissolved organic mater, suspended inorganic matter, water itself, ...). In the application presented here, the total extinction follows from adding a certain background extinction and the extinction by suspended inorganic matter (i.e. SPM). To test the sensitivity of model results to the extinction rate, run12 (see Section A.3.2) is repeated in run17 with the background extinction coefficient (*ExtVlBak [m^{-1}]*) set to 0.2 m^{-1} instead of 0.08 m^{-1}. Spatial plots of the biofilm biomass in run12 and run17 are illustrated in Figure 12.

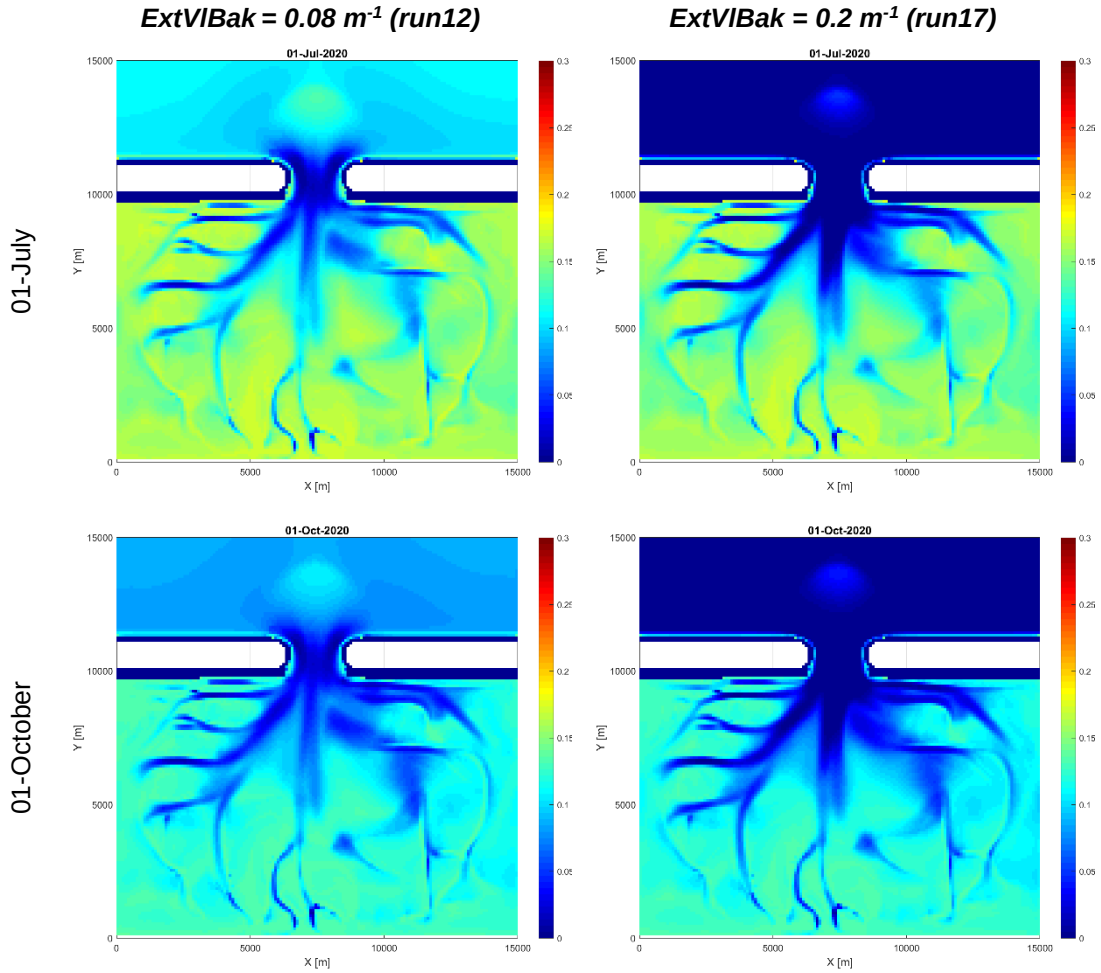


Figure 12: Spatial plots of the biofilm biomass at 01-July (top) and at 01-October (bottom) for model simulations with a different background extinction coefficient: 0.08 m^{-1} (run12, left) and 0.2 m^{-1} (run17, right).

By increasing the background extinction coefficient, the spatial variability in biofilm biomass increases, since at deeper parts the irradiation at the sediment surface is lower. The results with higher extinction rates are a better representation of observations in the field, since generally hardly any biofilm biomass is found away from intertidal areas.

Application of the catastrophic biofilm removal

In the model tests in Section A.3.2, the threshold for catastrophic biofilm removal was set at such a high bed shear stress (i.e. 10 N/m^2) that it was never exceeded. Now run12 was repeated with the threshold value *TaucBiof* at 4 N/m^2. This implies that the biofilm biomass in a computational cell resuspends completely if the total bottom shear stress locally exceeds 4 N/m^2. This is illustrated in the timeseries in Figure 13.

A spatial plot of the biofilm biomass at 01-July is illustrated in Figure 14. As a result of the catastrophic biofilm removal, intertidal areas contain only little biomass, whereas surrounding areas are hardly affected. This leads to unrealistically sharp gradients in the biofilm biomass. The current model does not seem to capture the effects of extreme hydrodynamic disturbances correctly. This could possibly be improved by a more gradual transition from first order resuspension to catastrophic removal.

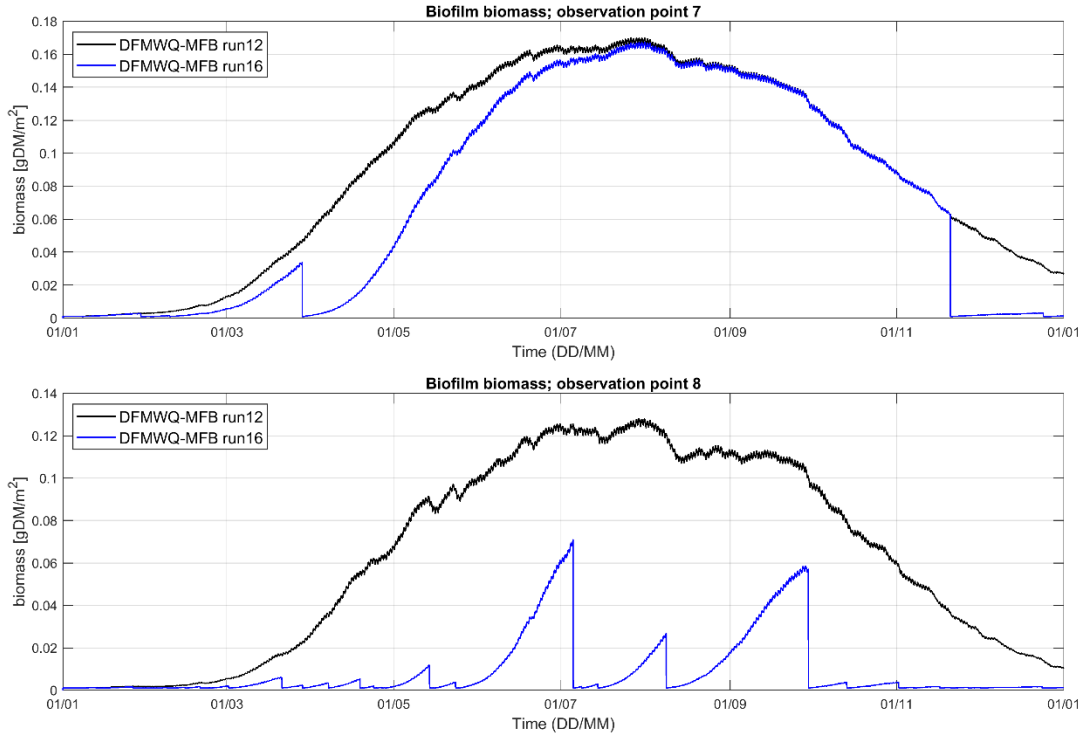


Figure 13 Development of the biofilm biomass throughout the year without catastrophic biofilm removal (black line, run 12) and with catastrophic biofilm removal once the total bed shear stress exceeds 4N/m^2 (blue line). Subpanels show observation points 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

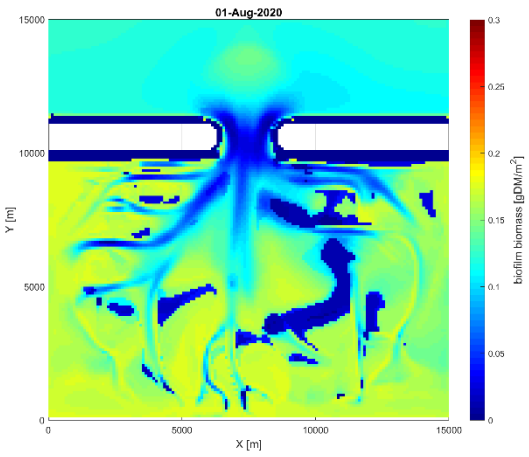


Figure 14: Spatial plots of the biofilm biomass at 01-July (top) for a model simulation with catastrophic biofilm removal if the total bottom shear stress exceeds 4 N/m^2 (run16).

A.4 Concluding remarks

- The dynamic biofilm development was successfully included in the D-Water Quality Process Library as an additional process at low computational cost.
- Based on the biofilm biomass in a computational cell (1), the critical bed shear stress for resuspension of sediment and (2) the burial rate of sediment towards a stronger bottom layer may increase.
- With the current implementation we can qualitatively reproduce seasonal development of the biofilm biomass, as well as the seasonal trapping of bed sediments and reduction of SPM concentrations that are observed in the field.
- The results are rather sensitive to the maximum biofilm growth rate, for which a large range of literature values were found. It is recommended to perform a more detailed comparison with field observations or remote sensing data to calibrate this parameter.
- The biofilm process can be extended by including not just the effect of solar radiation on the biofilm growth, but also the effect of temperature fluctuations. Mariotti & Fagherazzi (2012) describe a model for this effect. However, in turbid systems like the Wadden Sea, the effect of solar radiation is of first order as the microphytobenthos mostly develops on the intertidal area.

A.5 References

Boulêtreau, S., O. Izagirre, F. Garabétian, S. Sauvage, A. Elosegi, and J. M.Sanchez-Perez (2008), Identification of a minimal adequate model to describe the biomass dynamics of river epilithon, River Res. Appl., 24, 36–53, doi:10.1002/rra.1046.

Mariotti, G., and S. Fagherazzi (2012), Modeling the effect of tides and waves on benthic biofilms, J. Geophys. Res.,117, G04010, doi:10.1029/2012JG002064.

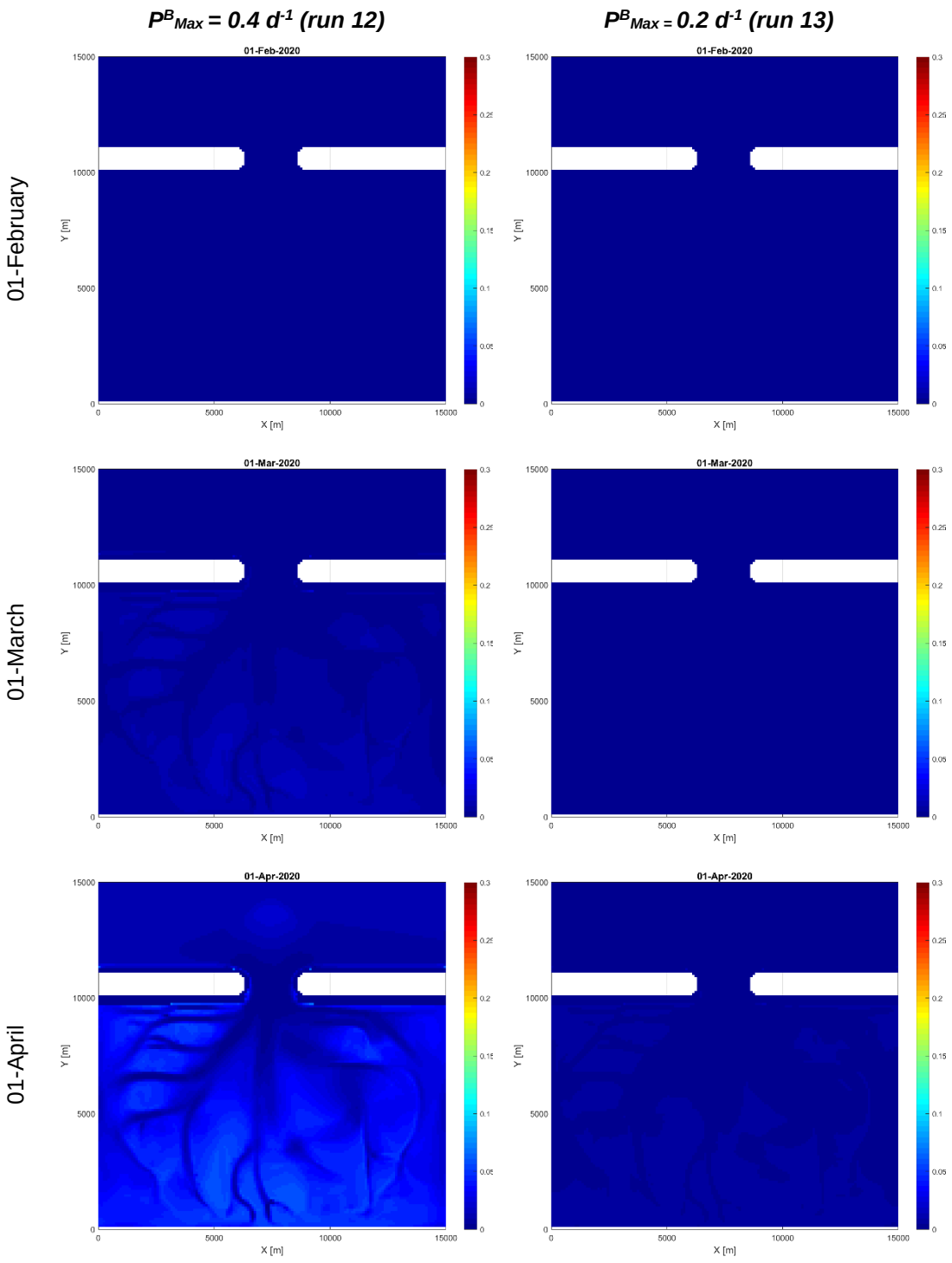
Pivato, M., Carniello, L., Moro, I., & D'Odorico, P. (2019). On the feedback between water turbidity and microphytobenthos growth in shallow tidal environments. Earth Surface Processes and Landforms, 44(5), 1192-1206.

Uehlinger, U., H. Buhrer, and P. Reichert (1996), Periphyton dynamics in a floodprone prealpine river: Evaluation of significant processes by modeling, Freshwater Biol., 36, 249–263, doi:10.1046/j.1365-2427.1996.00082.x.

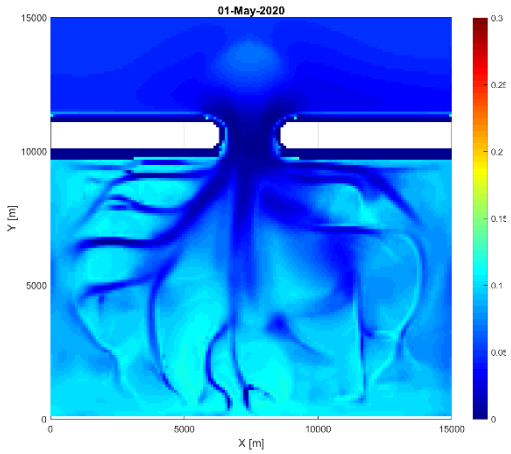
van der Wal, D., Wielemaker-van den Dool, A. & Herman, P.M.J. Spatial Synchrony in Intertidal Benthic Algal Biomass in Temperate Coastal and Estuarine Ecosystems. Ecosystems 13, 338–351 (2010). https://doi.org/10.1007/s10021-010-9322-9

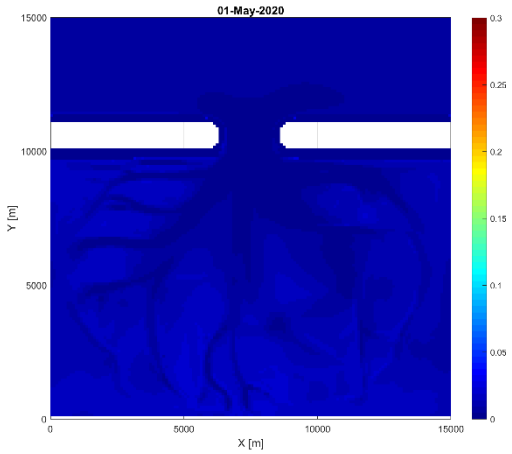
A.6 Additional model results

A.6.1 Spatial pattern of biofilm development

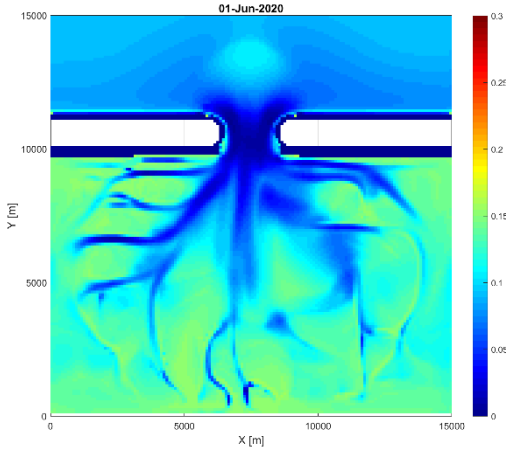


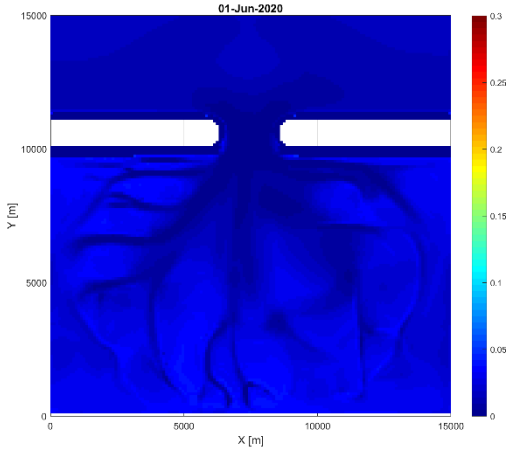
01-May



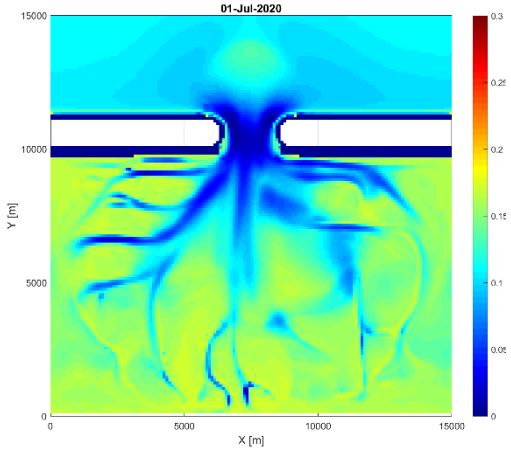


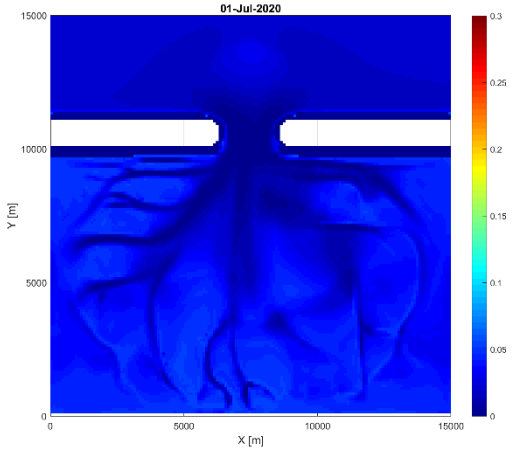
01-June



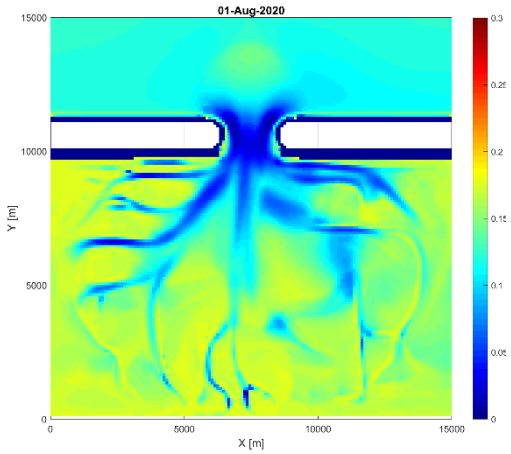


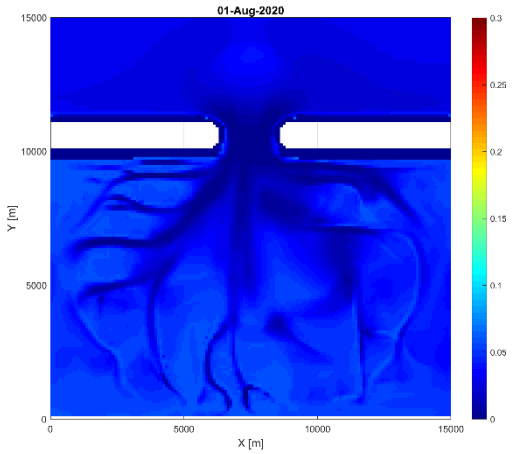
01-July



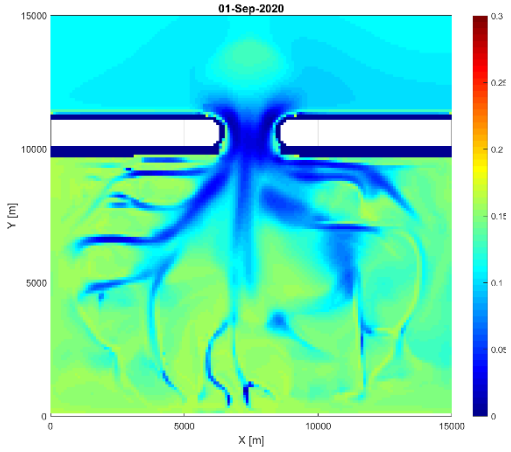


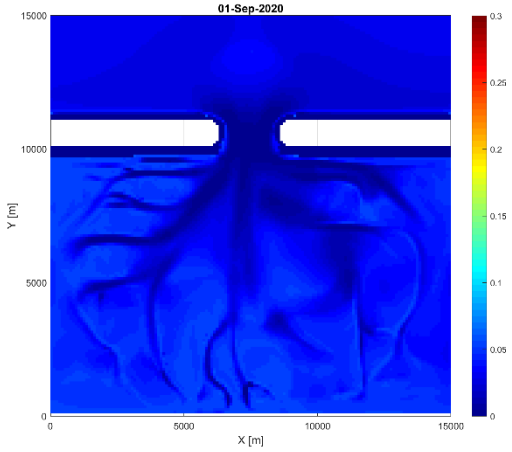
01-August



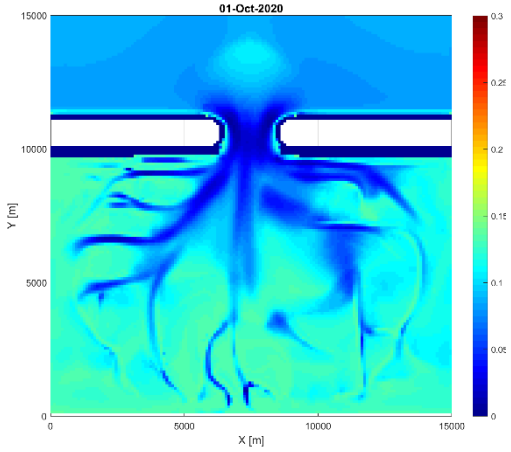


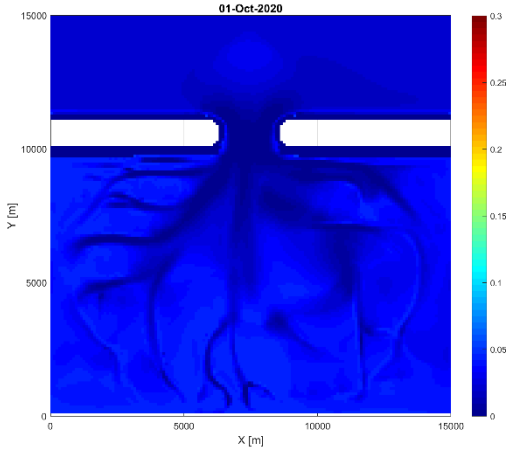
01-September



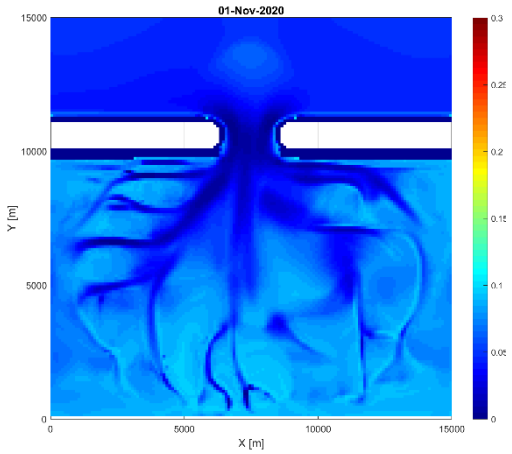


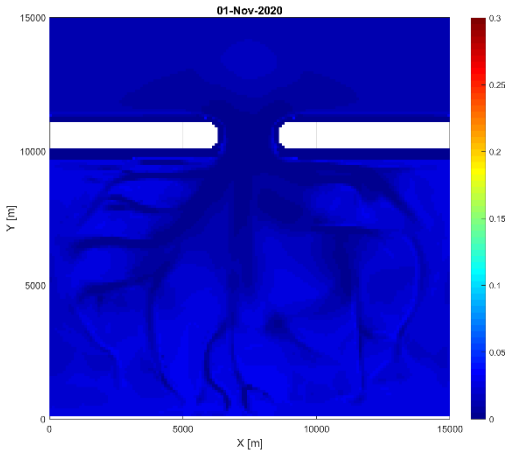
01-October



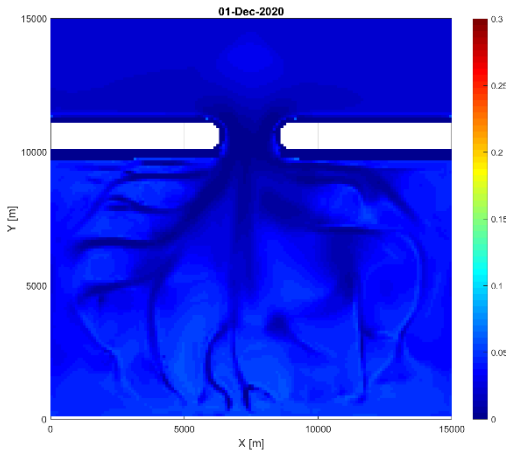


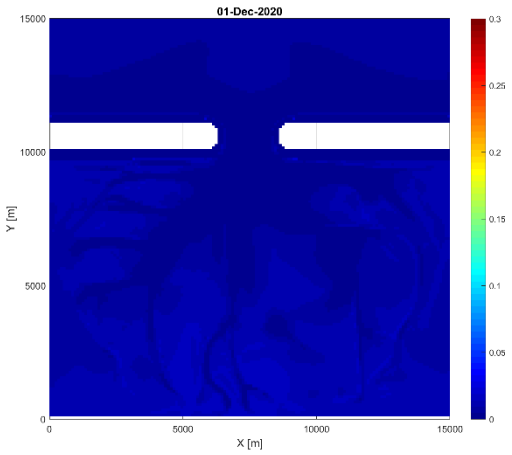
01-November



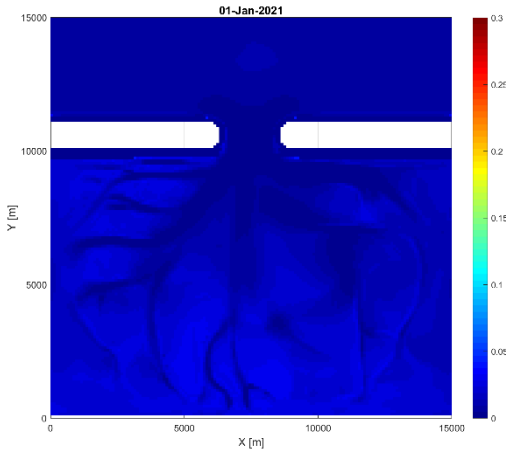


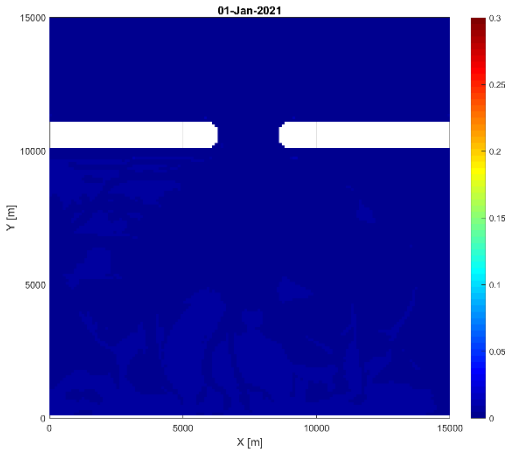
01-December





01-January (next year)





A.6.2 Timeseries of sediment mass in layer S1

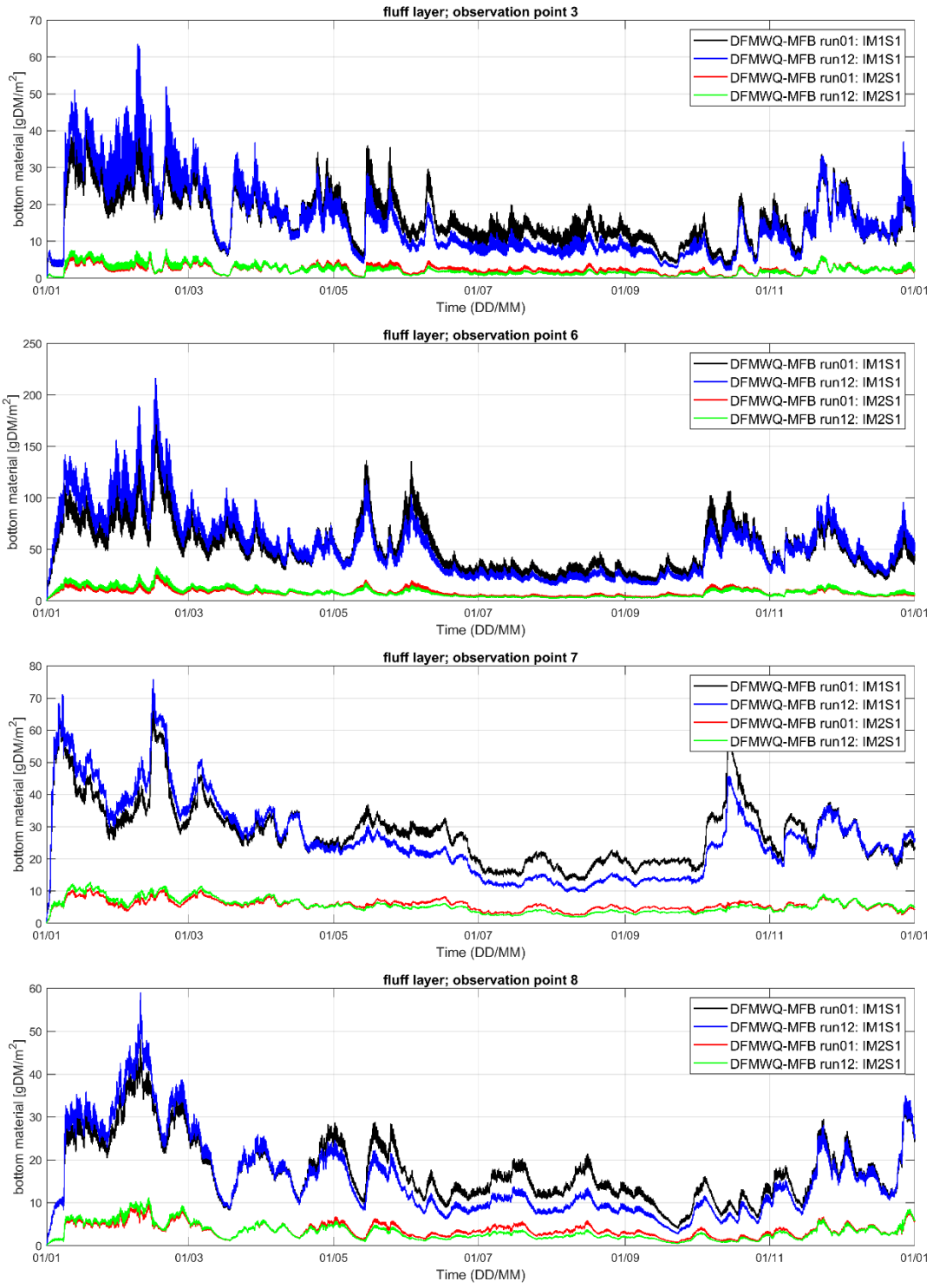


Figure 15: Mass of sediment in the fluff bed layer (S1) with the black and red lines indicating different sediment fractions for the simulation without biofilm (run01) and the blue and green line indicating the simulation with biofilm for a maximum growth rate of 0.4 d^{-1} (run12) Subpanels from top to bottom show observation points 3 (deep channel, near inlet), 6 (end of channel), 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

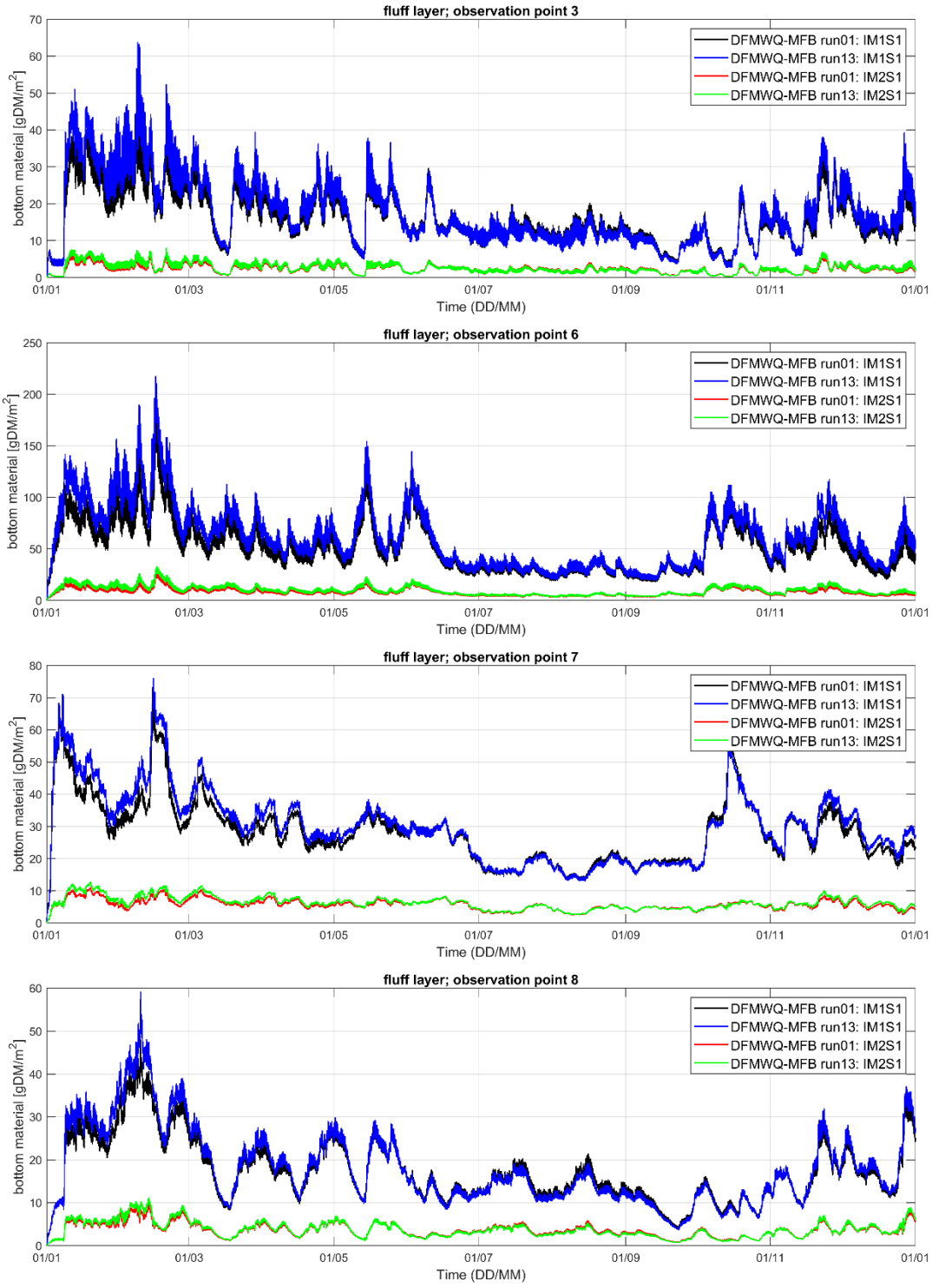


Figure 16: Mass of sediment in the fluff bed layer (S1) with the black and red lines indicating different sediment fractions for the simulation without biofilm (run01) and the blue and green line indicating the simulation with biofilm for a maximum growth rate of 0.2 d^{-1} (run13) Subpanels from top to bottom show observation points 3 (deep channel, near inlet), 6 (end of channel), 7 (high intertidal area) and 8 (lower intertidal area).

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl