

## Slibdynamiek in de Waddenzee

Update conceptueel model 2020



# **Slibdynamiek in de Waddenzee**

## Update conceptueel model 2020

### **Auteur(s)**

Peter Herman  
Julia Vroom  
Bob Smits  
Roy van Weerdenburg  
Thijs van Kessel

### **Partners**

ARCADIS Nederland BV, ZWOLLE  
RHDHV

## Slibdynamiek in de Waddenzee

Update conceptueel model 2020

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer H. Mulder
<b>Referenties</b>	BO02 2020
<b>Trefwoorden</b>	slibdynamiek, Waddenzee, sedimenttransport, slibsedimentatie, SPM, microfytobenthos

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.2
<b>Datum</b>	18-12-2020
<b>Projectnummer</b>	11205229-002
<b>Document ID</b>	11205229-002-ZKS-0001
<b>Pagina's</b>	45
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Peter Herman	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
2.2	Peter Herman Julia Vroom  Bob Smits Roy van Weerdenburg Thijs van Kessel	Bas van Maren	Toon Segeren	

# Samenvatting

Dit rapport beschrijft een actualisering en uitbreiding van het conceptueel model over de slibdynamiek in de Waddenzee, dat eerder op basis van veldwaarnemingen was opgesteld. Het oorspronkelijke conceptueel model is gebruikt als basis voor de ontwikkeling en toepassing van een nieuw numeriek slibmodel voor de Waddenzee. In deze actualisering analyseren wij o.a. wat het gebruik van het numerieke model heeft bijgedragen aan ons conceptueel begrip van de slibdynamiek.

Het model heeft geholpen om te begrijpen waarom de waarnemingen van zwevend stof log-normaal verdeeld zijn, en ondersteunt daarmee de basis van de statistische analyse. Het geeft verder inzicht in de belangrijkste factoren die de seizoenale patronen in zwevende stof veroorzaken. We zagen dat de verticale verdeling van het zwevend stof op de Noordzee lichtjes anders is dan in de Waddenzee, maar moeten toch besluiten dat zowel op de Noordzee als in de Waddenzee de diepte-afhankelijke sedimentberoeving door golven de belangrijkste oorzaak is van de seizoensfluctuatie in zwevende stof.

Het model heeft een groot effect aangetoond van meteorologische forcering op de slibbalans van de Waddenzee. Het effect op de sedimentconcentraties is in vergelijking veel kleiner. Dit betekent dat, afhankelijk van weersomstandigheden, aanzienlijke slibbuffers in de Waddenzee kunnen worden aangelegd, die wellicht verantwoordelijk zijn voor meerjarige fluctuaties in gehalten zwevende stof zoals eerder statistisch beschreven.

Slib draagt aanzienlijk bij aan de morfologische veranderingen van de Waddenzee. Die bijdrage is veel groter dan geschat uit het product van gemiddeld slibgehalte met gemiddelde sedimentatie, omdat sedimenterende plaatsen over het algemeen een hoog slibgehalte hebben. Kwelders zijn rechtstreeks verantwoordelijk voor 20 % van de slibsedimentatie in de Nederlandse Waddenzee en ca. 50% van de sedimentatie in het bekken van het Zeegat van Ameland. Onrechtstreeks draagt kweldervorming bij aan de slibdynamiek door verlies van komberging en verhoogde sedimentatie in het platengebied dat aan de kwelder ligt.

De rol van het microfytobenthos in de sedimentatie van slib en het mogelijk reguleren van zwevend stof wordt nader onderzocht, o.m. met de implementatie in het model van een microfytobenthos-module en het onderzoeken van lange reeksen remote sensing beelden. De resultaten van dit laatste onderzoek zijn nog niet bekend, en de rol van microfytobenthos in de slibdynamiek moet nog nader worden uitgewerkt.

Het numerieke slibmodel is uitgegroeid tot een instrument dat nog verdere verfijning behoeft, maar dat een belangrijke bijdrage heeft geleverd tot het beter begrip van de slibdynamiek. Het model kan middels procesanalyse ondersteuning bieden aan het algemene slibbeheer in de Waddenzee. Het kan helpen om problemen met vaargeulinrichting en -onderhoud nader te analyseren, om beleidsopties aangaande kwelderwerken te vergelijken, havenontwikkelingen en recreatieve ontwikkelingen aan de randen van het wad te evalueren en om de link met het ecologisch functioneren van de Waddenzee nader te leggen. Daarmee kan het de kloof tussen conceptueel denken en toegepaste problemen helpen overbruggen.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>7</b>
1.1	Belang van slib voor het Waddensysteem	7
1.1.1	Ecologie	7
1.1.2	Geomorfologische veranderingen	8
1.1.3	Hydrodynamiek	8
1.2	Belang van slib(onderzoek) voor beleid en beheer	8
1.3	Doelstelling van de studie	9
1.4	Update conceptueel model 2020	9
1.5	Leeswijzer	10
<b>2</b>	<b>Fluctuaties in zwevende stof</b>	<b>11</b>
2.1	Introductie	11
2.2	Het type statistische waarschijnlijkheidsverdeling van zwevende stof	12
2.3	De gelijkaardige seizoensvariatie van zwevende stof	14
2.4	Fluctuaties in zwevende stof over meerdere jaren	19
2.4.1	Autocorrelatie en buffers van slib	21
2.4.2	Het effect van meteorologische forcering	21
2.4.3	Slibimport in de Waddenzee	22
2.5	Conclusies	24
<b>3</b>	<b>Verandering in het bodemslibgehalte en de sedimentbalans</b>	<b>26</b>
3.1	Veranderingen in bodemslibgehalte over de afgelopen eeuw	26
3.2	Sedimentbalans sinds 1990	26
3.3	De rol van kwelders	27
3.4	Zandige en slibrijke gebieden	28
3.5	Correlatie SPM en bodemslibgehalte	28
3.6	Conclusies	29
<b>4</b>	<b>De rol van microfytobenthos</b>	<b>30</b>
4.1	Relatie tussen microfytobenthos en slib	30
4.2	Eerste inschatting effect microfytobenthos op SPM met numeriek model	31
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>33</b>
5.1	Inleiding	33
5.2	Slibdynamiek op korte tijdschaal	34
5.3	Slibdynamiek op de mesoschaal	35

5.4	Slibdynamiek op de lange tijdschaal	36
5.5	Grafische weergave van het conceptueel model	37
5.6	Model als instrument voor beleid en beheer	40
5.7	Aanbevelingen	41
5.7.1	Modeltoepassingen voor beheersvraagstukken	41
5.7.2	Modeluitbreidingen richting ecologisch modelleren	41
5.7.3	Metingen en data-beschikbaarheid	42
	<b>Referenties</b>	<b>43</b>
<b>A</b>	<b>Observatiepunten</b>	<b>44</b>

# 1 Introductie

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.

Dit rapport is een actualisering van het conceptuele model zoals gepresenteerd in 'Mud dynamics in the Wadden Sea; towards a conceptual model' (Herman et al., 2018), op basis van het onderzoek binnen KRW slib van de afgelopen twee jaar. Ter introductie wordt eerst het belang van slib voor het Waddensysteem en voor beheer en beleid uiteengezet.

## 1.1 Belang van slib voor het Waddensysteem

Slib speelt een cruciale - en vaak slecht begrepen - rol in de ecologie, de geomorfologie en de hydrodynamiek, en daarmee in het beheer van de Waddenzee.

Die rol van slib is niet eenduidig causaal. Enerzijds worden ecologische, geomorfologische en hydrodynamische processen aangestuurd door de dynamiek van slib op korte tot lange termijn, anderzijds hebben deze processen zelf invloed op de slibdynamiek. Het ontrafelen van de causale mechanismen in deze wederzijdse beïnvloeding is complex.

Daarnaast vinden er grote uitwisselingen van slib plaats tussen de Waddenzee en de Noordzee, wat betekent dat veranderingen daarin (bijvoorbeeld veranderen in het slibtransport langs de Nederlandse kustzone) invloed kunnen hebben op de slibdynamiek in de Waddenzee.

### 1.1.1 Ecologie

Voor de ecologie is zowel het slib in de waterkolom als het slib in de bodem van belang. In de waterkolom vermindert slib de lichtdoordringing. Daardoor heeft het slibgehalte in het water een grote invloed op de primaire productie, d.w.z. de groei van microscopische algen die aan de basis van het voedselweb liggen. Slib in het water bepaalt ook de voedselkwaliteit van schelpdieren, die een cruciale rol spelen in dat voedselweb, en een link vormen tussen algen en vogels.

Het slibgehalte van de bodem bepaalt het habitat voor het bodemleven, omdat andere dieren voorkomen in slibrijke dan in zandige bodems. Ook dit vertaalt zich door in het voorkomen van vis en vogels.

Slib is ook een essentiële karakteristiek van kwelderbodems, als gevolg van een wederzijdse beïnvloeding van vegetatie en (slib)sedimentatie.

### 1.1.2 Geomorfologische veranderingen

In toenemende mate realiseren we ons dat slib ook een grote rol speelt in de geomorfologische veranderingen in de Waddenzee. Alle sediment dat zich netto in de Waddenzee afzet bevat een kleine of grote hoeveelheid slib. Vooral bij hogere percentages slib in de bodem draagt dat slib netto bij aan het volume sediment dat wordt afgezet, omdat bij kleine percentages slib (<15%) wordt aangenomen dat het slib 'verstopt' zit in de poriën van de zandige matrix, waardoor het geen extra ruimte (volume) inneemt. Slib zet zich bovendien stabiel af op andere plaatsen dan zand. Het meest extreme voorbeeld zijn kwelderbodems, die voor een groot deel uit slib bestaan. Vooral in luwe gebieden, achterin de bekkens en in geulen die zijn afgesloten door de aanleg van de Afsluitdijk, vindt veel slibsedimentatie plaats. De getijgeulen en de geëxponeerde intergetijdenplaten nabij de zeegaten in de Waddenzee zijn juist overwegend zandig.

### 1.1.3 Hydrodynamiek

Via de geomorfologie, en in een duidelijke interactie daarmee, speelt slib ook een rol in de hydrodynamiek van de Waddenzee. Als zich langs de vastelandskust grote volumes slibrijk sediment afzetten, dan heeft dat gevolgen voor de komberging van de kleinere geulen en daarmee voor de stromingspatronen. Dit bepaalt op zijn beurt de transportmechanismen en de afzettingmogelijkheden van slib en ook zand. Ook zijn slibrijke bodems hydraulisch gladder, waardoor de getijgolf minder wordt gedempt.

## 1.2 Belang van slib(onderzoek) voor beleid en beheer

Bij het beleid en beheer van de Waddenzee wordt gestuurd op het in stand houden van de natuurlijke dynamiek, het waarborgen en verbeteren van de biodiversiteit en het afwegen van de gebruiksfuncties van de Waddenzee. Zowel de wettelijke kaders zoals de Kaderrichtlijn Water en Natura2000 als het medegebruik van de Waddenzee door de mens vragen om inzicht in de slibdynamiek, om veranderingen in de slibdynamiek te kunnen begrijpen en indien gewenst passende maatregelen te nemen en te weten met welke factoren rekening moet worden gehouden bij de beoordeling van (nieuwe) menselijke ingrepen.

De Kaderrichtlijn Water moet ook voor overgangswateren als de Waddenzee de goede ecologische kwaliteit garanderen. Omdat slib sterk bepalend is voor (aspecten van) het voedselweb en de structuur van aanwezige populaties, is inzicht in de slibdynamiek essentieel voor de KRW. Indien bekend is welke ontwikkelingen en trends zich in het slibgehalte in water en bodem voordoen, kan een vertaling worden gemaakt hoe deze ontwikkelingen de ecologie beïnvloeden en of daarin moet worden ingegrepen. In deze studie is de koppeling tussen slib en ecologie niet uitgewerkt; wel is er een numeriek basismodel ontwikkeld (Vroom et al. 2020) waar ecologische modellen, bijvoorbeeld voor lichtklimaat en primaire productie, aan kunnen worden gekoppeld.

Van bijzonder belang voor de Kaderrichtlijn Water (en Natura2000) is de mate waarin menselijke activiteiten het ecologisch functioneren van de Waddenzee beïnvloeden. Dus waar menselijke activiteiten aantoonbaar aan de basis liggen van ontwikkelingen in de slibdynamiek is bijzondere aandacht gewenst om deze activiteiten zo nodig te kunnen reguleren.

Voorbeelden van ingrepen in het systeem die raken aan de slibdynamiek zijn:

- Aanpassingen aan kwelders en zomerpolders (ook in het kader van dijkverzwaringen)
- Aanleg van een spuikom
- Stimuleren van zeegrasherstel
- Onttrekken van slib (bijvoorbeeld d.m.v. een kleirijperij)
- Visserij



- Baggeren en verspreiden
- Creëren van zout-zoetovergangen (zoals een vismigratierivier)
- Spuien en aanpassingen daarin (Afsluitdijk en Lauwersmeer).

### 1.3 Doelstelling van de studie

In Herman et al (2018) is gebruik gemaakt van gegevens op grote schaal in tijd en ruimte, om te bepalen wat de dominante mechanismen zijn met betrekking tot de dynamiek van slib in de Waddenzee en welke openblijvende vragen er nog zijn. De vragen waarop we de afgelopen twee jaar hebben gefocust zijn welke processen verantwoordelijk zijn voor de seizoensdynamiek en de middellange termijn fluctuaties (orde jaren) in slibconcentraties in de waterkolom en de bodem.

De conceptuele modelvorming vormt de basis voor verdere ontwikkeling van het numeriek model voor slib in de Waddenzee (Vroom et al. 2020), en de inzet van dit numerieke model voor verdere kennisontwikkeling en beheervraagstukken (Smits et al. 2020). Op basis van een beter begrip van de slibdynamiek, en met behulp van het conceptuele en numerieke model (Vroom et al. 2020), kunnen de beleidsdoelstellingen voor o.a. de Kaderrichtlijn Water worden vastgesteld, en kan het beheer worden aangepast om deze doelstellingen te bereiken. Daarnaast kan het effect van ingrepen met meer zekerheid worden bepaald.

De hoofdvraag van de studie is hoe de concentratie van slib in de waterkolom en het slibpercentage in de bodem van de Waddenzee bepaald worden door menselijke activiteiten en natuurlijke processen.

De hoofdvraag wordt opgesplitst in vier deelvragen, waarin gekeken wordt naar:

- de dominante factoren die de slibdynamiek in de Waddenzee bepalen, en naar hun relatie met gelijkaardige factoren in de Noordzee;
- de verblijftijd van slib in de Waddenzee, en de respons van het systeem op pulsen in de toevoer van slib;
- het belang van slib voor de ecologische functies van de Waddenzee;
- aangepaste beheerstrategieën voor slib en ontwikkeling van de kustlijn, die leiden tot de optimalisatie van de ecologische kwaliteit van het systeem en optimalisatie van de gebruiksfuncties.

### 1.4 Update conceptueel model 2020

Sinds de publicatie van het rapport uit 2018 (Herman et al., 2018) is het werk aan slibdynamiek in de Waddenzee op twee manieren verdergezet. Enerzijds is de analyse van veldgegevens verder verfijnd en verdiept. Daarover wordt gerapporteerd in (Colina Alonso, 2020). Hier zullen de belangrijkste resultaten uit deze rapportage worden overgenomen en in het licht van het conceptuele model worden geplaatst. Er is daarnaast een nieuw numeriek model voor slibdynamiek in de Waddenzee opgezet. Details van dat model zijn gerapporteerd in Vroom et al. (2020). In Smits et al. (2020) is het model ingezet als een middel om openstaande vragen in het conceptuele model, zoals gerapporteerd in 2018 en opgenomen in Smits et al. (2020), nader te onderzoeken. Dit betreft ook een eerste gevoeligheidsanalyse naar het effect van grote binnen- en buitendijkse slibvangs op de slibverdeling in de Waddenzee.

De tekst van dit rapport is een uitbreiding en herziening van de Nederlandse samenvatting van het rapport van 2018 (Herman et al., 2018). Figuren uit het rapport van 2018 die noodzakelijk zijn voor het begrip van de tekst zijn hier overgenomen. Ook zijn nieuwe figuren toegevoegd op basis van veldwaarnemingen en modelsimulaties. Voor details van de

analyses wordt waar mogelijk verwezen naar Herman et al. (2020), zodat het voorliggende rapport beknopt blijft.

## 1.5 Leeswijzer

Nu het belang van slib voor de Waddenzee en beleid en beheer duidelijk zijn, en de doelstellingen van de studie naar voren zijn gebracht, kunnen we in de volgende hoofdstukken het conceptueel model presenteren. Hoofdstuk 2 beschrijft de fluctuaties in zwevend stof op zowel de korte als de middellange termijn en geeft inzicht in de belangrijkste processen die de fluctuaties veroorzaken. Hoofdstuk 3 richt zich op veranderingen in bodemslibgehaltes, slibsedimentatie in de bekkens en positieve terugkoppelingen in slibsedimentatie. In hoofdstuk 4 wordt de rol van microfytobenthos in de slibdynamiek toegelicht. Het rapport sluit af met conclusies, een grafische weergave van het conceptueel model en aanbevelingen.

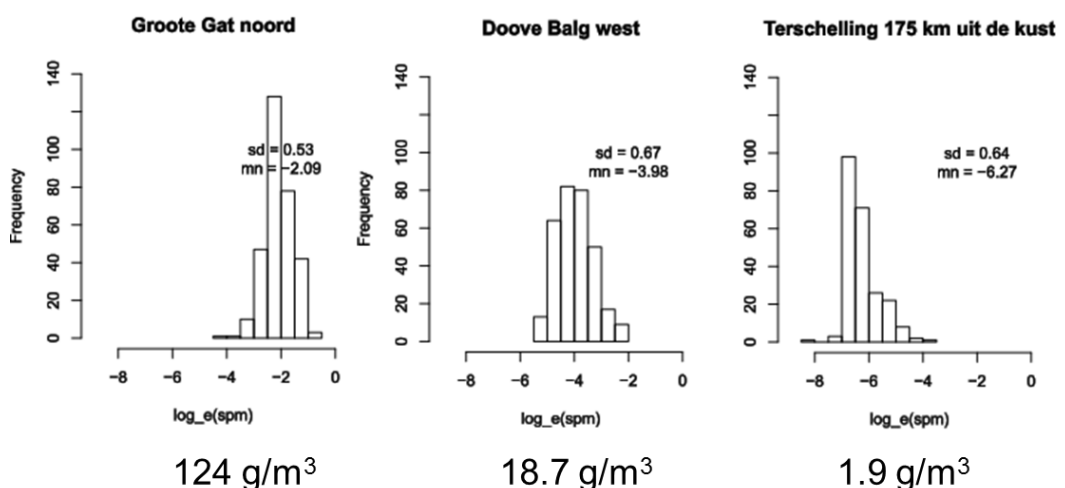
## 2 Fluctuaties in zwevende stof

### 2.1 Introductie

Een statistische analyse van de tijdseries sinds 1989 van zwevend stof van de beschikbare meetlocaties in de Waddenzee, Eems-Dollard en de Noordzee, verzameld in het kader van MWTL, leverde een aantal opvallende en soms onverwachte karakteristieken van de series op (Herman et al., 2018). We vermelden de volgende karakteristieken:

- 1) het type statistische waarschijnlijkheidsverdeling  
De statistische verdeling van de waarnemingen van gehalte zwevende stof is lognormaal, wat in de statistiek als een aanwijzing geldt dat de onderliggende processen multiplicatief zijn, d.w.z. de tijdserie van het zwevend stof kan worden beschreven als het product van een aantal onafhankelijke factoren.
- 2) de statistische verdelingen in verschillende stations vertonen opvallende gelijkenissen in de (relatieve) mate van variatie  
Stations met een zeer verschillende gemiddelde concentratie verschillen opvallend weinig in de spreiding van de lognormale verdeling.
- 3) de seizoensvariatie is op alle plaatsen, relatief tot het langjarig gemiddelde, zeer gelijkaardig  
Hoewel de processen die seizoensfluctuatie van SPM veroorzaken, zoals golfdynamiek, vastlegging van slib op intergetijdengebieden door algenmatten in de zomer, of flocculatie door algen in de zomer, zeer verschillend zijn voor de Waddenzee en de Noordzee, varieert op alle locaties het SPM over de seizoenen met ongeveer een factor 2 ten opzichte van het gemiddelde.

Figuur 2.1 geeft voor drie MWTL stations in de Waddenzee, het Eems estuarium en de Noordzee aan hoe de waarnemingen statistisch verdeeld zijn, wat de gemiddelde SPM waarde is en wat de spreiding (standaarddeviatie) is. Deze karakteristieken worden hieronder in meer detail toegelicht. Daarnaast is het numerieke model gebruikt om meer inzicht te krijgen in de processen die de karakteristieken bepalen en worden de resultaten daarvan hieronder besproken.



Figuur 2.1 Drie voorbeelden van verdelingen van waargenomen gehalten zwevende stof nabij het wateroppervlak ( $g\ m^{-3}$ ), getransformeerd door natuurlijke logaritmes te nemen. De drie stations (zie ligging in bijlage A) verschillen zeer sterk in hun geometrisch gemiddelde concentratie (aangeduid onder de figuren), maar hebben ongeveer dezelfde standaarddeviatie (aangeduid als 'sd' op de figuur). Figuur overgenomen uit Herman et al., 2018.

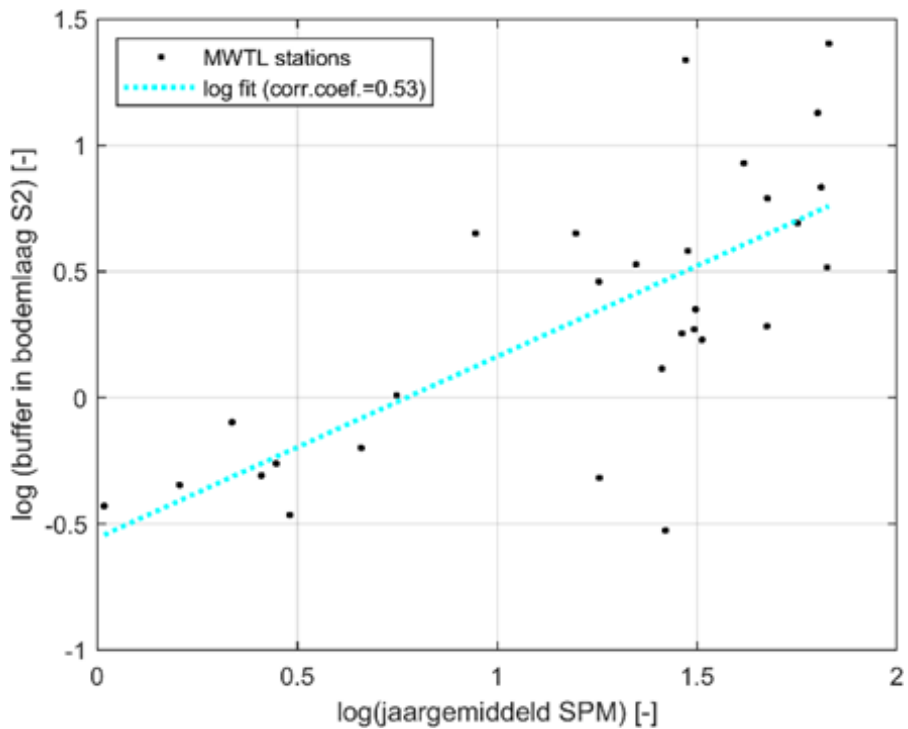
## 2.2 Het type statistische waarschijnlijkheidsverdeling van zwevende stof

De lognormale verdeling van de SPM waarden geeft aan dat de processen die deze concentratie bepalen vooral *multiplicatief* zijn, d.w.z. hoeveelheden toevoegen of wegnemen die in verhouding staan tot de hoeveelheden die in de waterkolom aanwezig zijn. Dit lijkt voor de hand liggend voor processen als sedimentatie of verticale herverdeling van het gesuspendeerd materiaal. Deze processen zullen immers per eenheid van tijd een bepaalde fractie van het aanwezige zwevende slib doen uitzakken of sedimenteren. Het is echter niet vanzelfsprekend voor resuspensie, omdat resuspensie in principe evenredig is met de hydrodynamische forcering en wordt gelimiteerd door de hoeveelheid slib die in de bodem aanwezig is en gemobiliseerd kan worden, en niet met de hoeveelheid slib in de waterkolom. Het is echter mogelijk dat, in de praktijk, de hoeveelheid slib beschikbaar voor resuspensie sterk gecorreleerd is met de hoeveelheid slib in suspensie. Die correlatie zijn wij nagegaan aan de hand van het numerieke model (Vroom et al. 2020, Smits et al. 2020), dat immers zowel de hoeveelheid slib in suspensie, de hoeveelheid in sedimentbuffers en de resuspensieflux berekent.

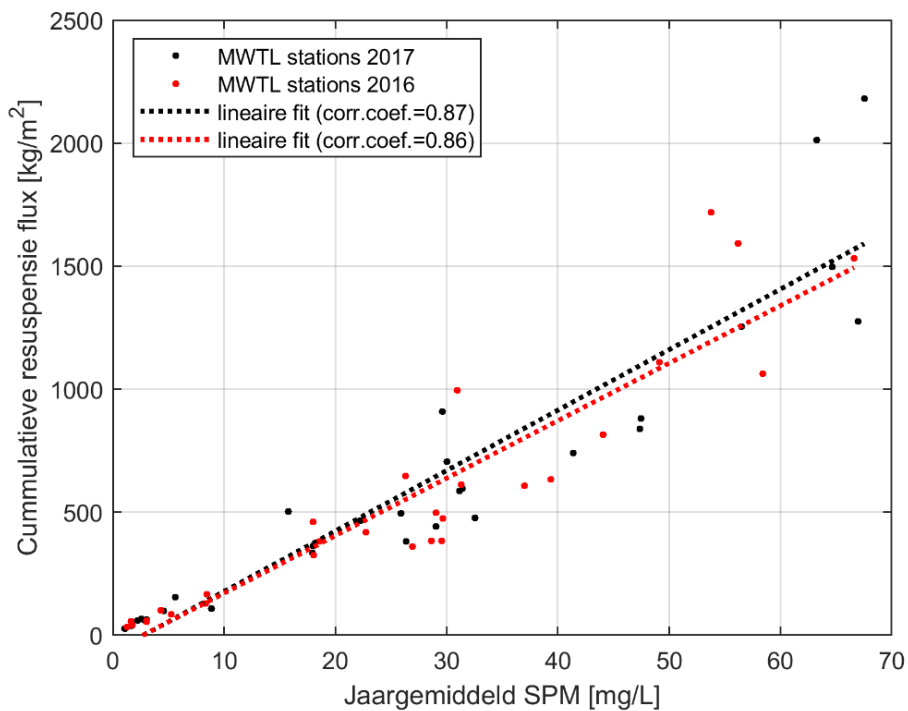
Aan de hand van het model zijn twee hypothesen onderzocht. Ten eerste is onderzocht of stations die gemiddeld een hoge concentratie zwevende stof hebben, ook een hoge waarde voor de sedimentbuffer hebben. De sedimentbuffer is gedefinieerd als het verschil tussen het moment van maximale en minimale slibconcentratie in de bodem. Daar waar veel slib kan worden afgezet en ook weer wordt geërodeerd, zou het SPM immers ook hoog kunnen zijn. Als dat het geval is, kan worden verwacht dat fluxen die (procesmatig) evenredig zijn met de grootte van de sedimentbuffer, in de praktijk ook ongeveer evenredig zullen zijn met de concentratie zwevende stof. Ten tweede is rechtstreeks onderzocht of er een correlatie is tussen het gehalte zwevende stof en de berekende resuspensieflux in het station.

De resultaten tonen dat er een correlatie is tussen jaargemiddeld gehalte aan zwevende stof en grootte van de sedimentbuffer (Figuur 2.2), maar de correlatie is niet zeer sterk. Er zijn stations met een relatief hoog jaargemiddeld gehalte aan zwevende stof, maar met een kleine sedimentbuffer in de bodem. Het is mogelijk dat op die plaatsen de concentratie in de waterkolom vooral bepaald wordt door transport van elders, eerder dan door lokale resuspensie. Het is echter ook mogelijk dat de lokale resuspensie niet evenredig is met de voorraad slib in de buffer (bodem), omdat de hydrodynamische forcering die resuspensie veroorzaakt niet overal gelijk is.

De relatie tussen jaargemiddeld gehalte zwevende stof en de lokale resuspensieflux (Figuur 2.3) toont een hoge correlatie. We vinden hier een aanzienlijk sterkere correlatie die een vrijwel perfecte evenredigheid suggereert. Het gehalte aan zwevende stof in de waterkolom is hoog waar de lokale resuspensieflux hoog is, waardoor niet alleen sedimentatie maar ook resuspensie in de praktijk een multiplicatief proces vormt. Deze correlatie verklaart waarom een lognormale verdeling geschikt is om de waarnemingen samen te vatten.



Figuur 2.2 Jaargemiddeld SPM (na log-transformatie) uitgezet tegen (log-getransformeerde) grootte van de buffer (max massa S2 – min massa S2; S2 is de bufferlaag in model) voor MWTL stations. De lineaire fit op log-log schaal is aangegeven in blauw.



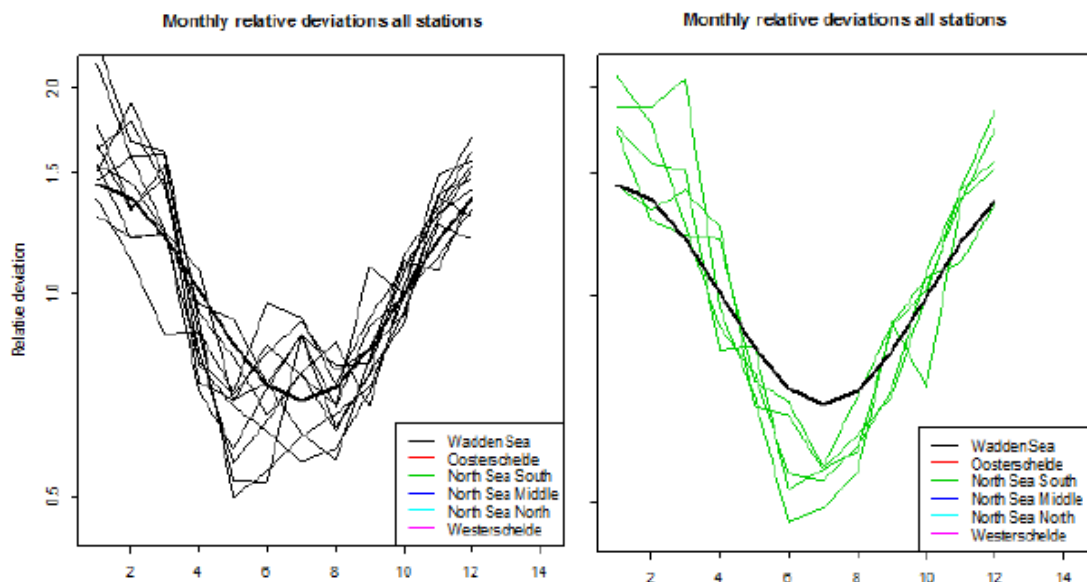
Figuur 2.3 Jaargemiddeld SPM uitgezet tegen de cumulatieve resuspensieflux vanuit de bodemlagen (som van S1, de zeer mobiele toplaag, en S2). In zwart de modelresultaten voor 2017 en in rood de modelresultaten met meteorologie uit 2016.

## 2.3 De gelijkaardige seizoensvariatie van zwevende stof

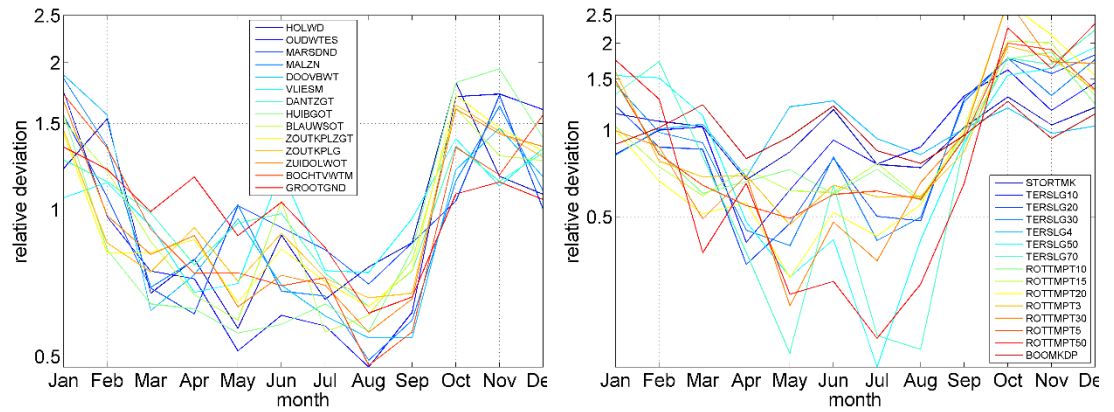
Een opvallende statistische vaststelling in de lange tijdseries van zwevende stof uit MWTL betreft de seizoenscomponent van de tijdseries. Die component is, relatief tot het gemiddelde, in alle stations ongeveer even groot. Bovendien is ook de fase gelijk, met maxima in januari en minima in juli. Er is enige variatie in het belang van de seizoenscomponent als fractie van de totale variatie: deze neemt een beetje af met de diepte van het station. Toch is de gelijkenis veel belangrijker dan deze verschillen.

Er zijn meerdere mogelijke verklaringen voor deze merkwaardig gelijke seizoensvariatie. De invloed van weersvariaties kan in ondiepe stations een uitstekende verklaring vormen voor de seizoensvariatie. Het sediment wordt regelmatig beroerd door golfwerking, en die is sterker in de winter dan in de zomer. Het effect van golven op het sediment neemt echter sterk af met de diepte. Herman et al. (2018) gingen ervan uit dat golfwerking geen verklaring meer vormt voor seizoensvariatie in zwevend stof bij diepe stations. De hypothese werd geformuleerd dat de verticale verdeling van het zwevend stof de rol van sedimentatie en resuspensie in zekere zin overnam: het materiaal zou in de zomer dieper uitzakken en in de winter homogener over de waterkolom worden verdeeld. Dat zou tot seizoensvariatie in de concentratie bij het oppervlak leiden. Deze hypothese is met het model nader onderzocht.

Een belangrijke vraag was of het model de seizoensvariatie zou reproduceren, die zo zichtbaar is in de veldwaarnemingen uit de lange tijdseries. Dat was het geval, al is de reproductie niet helemaal precies. De waarnemingen worden weergegeven in Figuur 2.4, en de overeenkomstige modelberekeningen in Figuur 2.5. De meeste series modelresultaten vertonen een seizoenaal signaal in dezelfde grootte-orde als de waarnemingen: een factor twee lager dan het gemiddelde in de zomer, en een factor 1.5-2 hoger in de winter. De stations op de Noordzee vertonen in het model meer variabiliteit. Bij sommige, vooral offshore, stations gaat de depressie in de zomer iets dieper dan in de waarnemingen, terwijl andere kustnabije stations een wat beperktere variatie vertonen. Toch zit de meerderheid van de stations vrij dicht bij de waargenomen variatie.

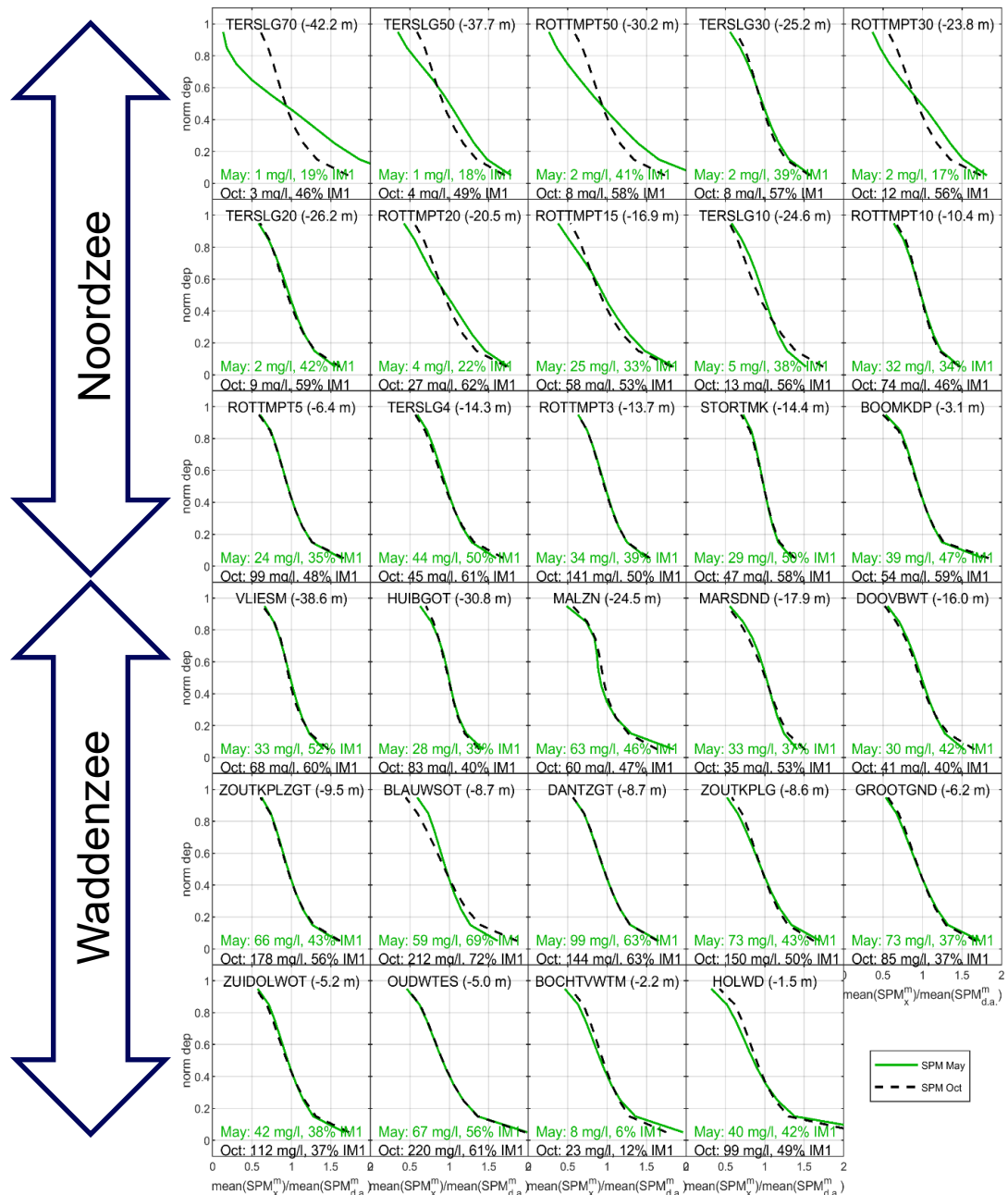


Figuur 2.4 Gemiddelde relatieve afwijking van het lange termijn gemiddelde in SPM per maand op basis van MWTL-metingen sinds 1989 in de Waddenzee (links) en in de Zuidelijke Noordzee (rechts). In beide figuren is, als referentie, het gemiddelde van alle Nederlandse MWTL stations aangegeven met een dikke zwarte lijn. Figuur overgenomen uit Herman et al. (2018).



*Figuur 2.5 Maandgemiddelde slibconcentratie bovenin de waterkolom in 2017 in de modelsimulatie op punten waar ook MWTL metingen worden uitgevoerd. Links de locaties in de Waddenzee en rechts de locaties in de Noordzee.*

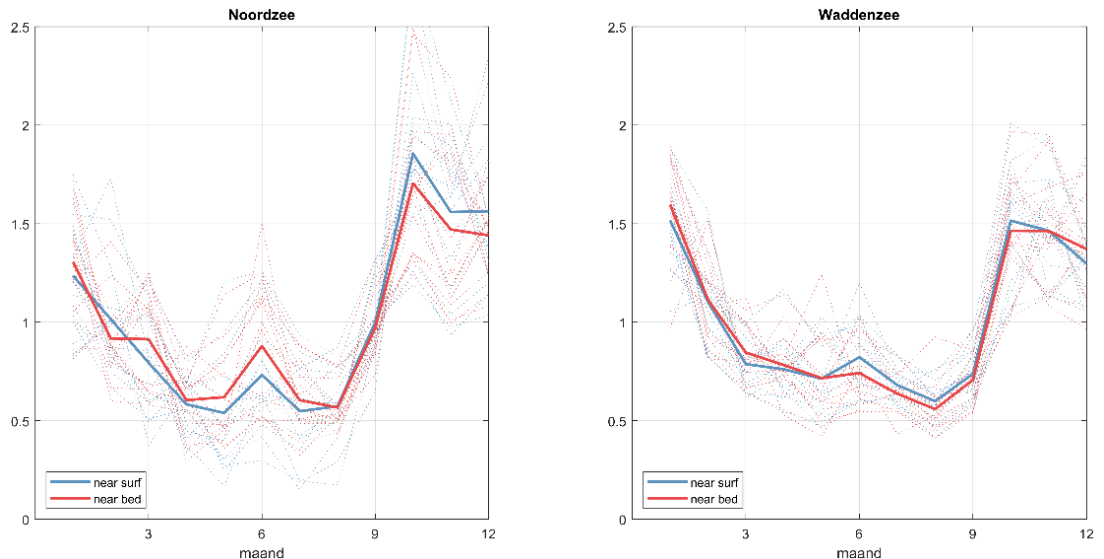
Nadat is vastgesteld dat het numerieke model de gemeten seizoensvariatie in SPM in voldoende mate reproduceert (Vroom et al. 2020) is geanalyseerd in hoeverre de seizoenspatronen gerelateerd zijn aan de verticale verdeling van het zwevend stof in de waterkolom, de golfwerking, of de zoetwaterafvoer. Bij analyse van de verdeling van SPM over de waterkolom, blijkt er een verschil op te treden tussen de Noordzee en de Waddenzee. In de Noordzee is de verticale verdeling van zwevend stof in de waterkolom verschillend tussen mei en oktober, terwijl dat in de Waddenzee niet het geval is (Figuur 2.6). Dat toont aan dat de verticale verdeling een zeker effect heeft op de seizoenscyclus van gehalte aan zwevend stof bij het oppervlak.



Figuur 2.6 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 als het gemiddelde SPM voor een bepaalde 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 weergegeven, 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).

Kwantitatieve evaluatie van het seizoenale patroon bij de bodem en bij het oppervlak kon echter niet bevestigen dat de verticale verdeling van de zwevende stof doorslaggevend is bij de verklaring waarom het relatieve seizoenale patroon gelijkaardig is voor diepe en ondiepe stations. Hoewel de seizoenpatronen bij bodem en oppervlakte in de Noordzee iets meer van elkaar verschillen dan in de Waddenzee, zijn deze verschillen bijna verwaarloosbaar ten opzichte van de grote seizoenale fluctuaties zelf (Figuur 2.7).





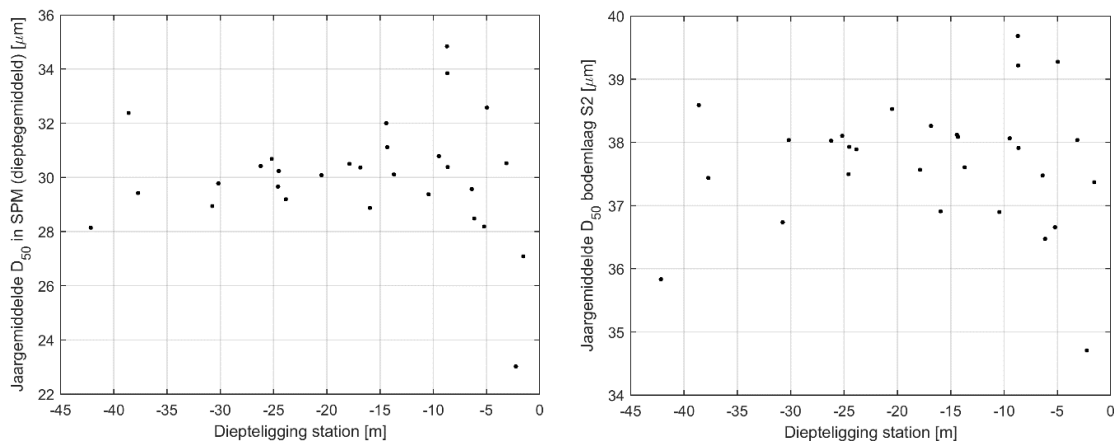
Figuur 2.7 Seizoenssignaal van de relatieve afwijking nabij de oppervlakte (blauw) en nabij de bodem (rood), beide voor de referentiesimulatie voor de Noordzee (links) en de Waddenzee (rechts).

Een bijkomende controle is uitgevoerd om zeker te zijn dat het seizoenale patroon in het model niet werd veroorzaakt door het seizoenpatroon dat wordt opgelegd aan de modelranden. De resultaten bevestigen dat simulaties met of zonder seizoenale variatie aan de randen vrijwel identiek zijn op de onderzochte (MTWL) stations. Daardoor bevestigen deze simulaties dat interne dynamiek van het slib in de kern van het modeldomein dominant is over transportprocessen, en dat het model dus niet sterk wordt aangestuurd door de randvoorwaarden.

Op een vergelijkbare manier is uitgesloten dat seizoenvariatie in saliniteit de verklaring zou vormen voor seizoenvariatie in zwevend stof. Zoetwaterafvoer heeft immers ook een sterk seizoen signaal. Een simulatie zonder saliniteit laat echter een vergelijkbaar seizoenpatroon zien als de referentiesimulatie met saliniteit.

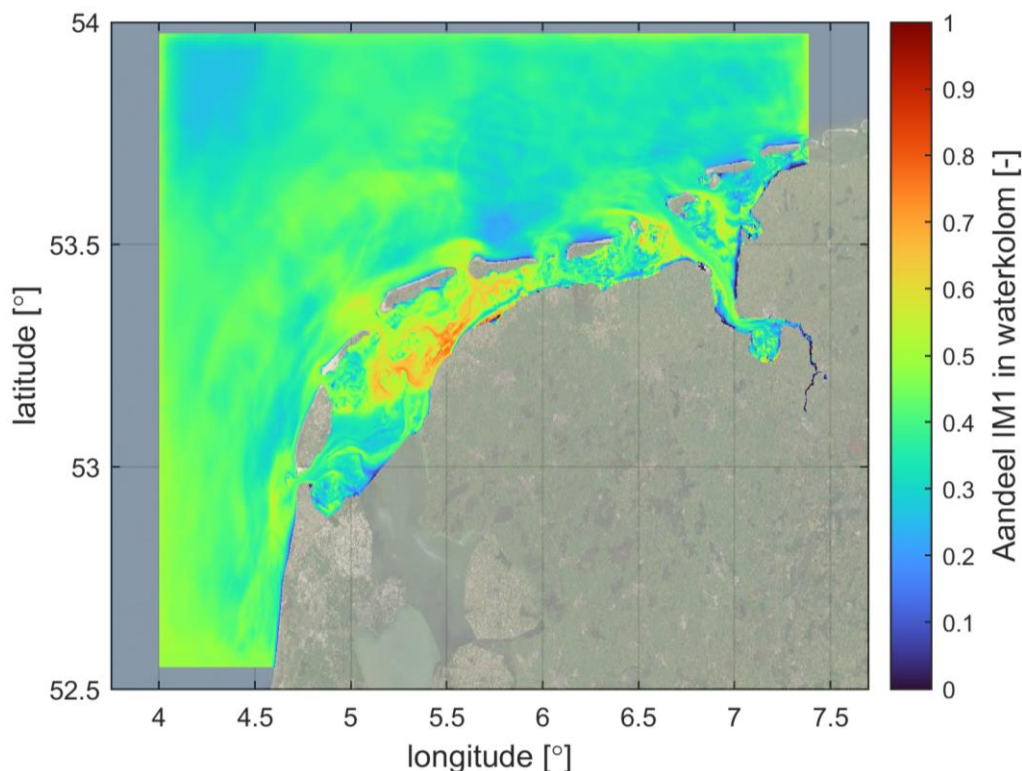
Op basis van deze analyses kan geconcludeerd worden dat de seizoensdynamiek in zwevend stof hoofdzakelijk veroorzaakt wordt door golfresuspensie. Daarbij is er een mogelijkheid dat het zwevend stof in diepere stations voornamelijk bestaat uit kleinere, trager uitzakkende deeltjes, terwijl de gemiddelde korrelgrootte hoger is in ondiepere stations. Daarmee zou in diepere stations een geringere bodemberoering toch aanleiding geven tot meer zwevend stof, omdat het materiaal trager uit de waterkolom zou zakken nadat het is geresuspendeerd. De hypothese is dat in diepere stations de zwaardere deeltjes uitzakken voordat ze kunnen worden geresuspendeerd, en dat dus alleen fijn materiaal in suspensie blijft. In ondiepere stations, waar de tijdschaal van depositie en resuspensie kleiner is, kunnen meer korrelgroottes naast elkaar voorkomen.

De modelresultaten verwerpen deze hypothese. Hoewel het model maar twee groottefracties van slib heeft, kan het daarmee toch een indicatie geven voor verschuivingen in het slibspectrum. Het blijkt dat dergelijke verschuivingen niet waarneembaar zijn. De gemiddelde korrelgrootte, gebaseerd op de twee fracties slib in het model, is onafhankelijk van de diepte. Hetzelfde geldt voor het slib dat in de bodem is opgeslagen (Figuur 2.8).



Figuur 2.8 De gemiddelde korrelgrootte in de waterkolom is onafhankelijk van de lokale waterdiepte (links, correlatiecoëfficiënt = 0.00). De gemiddelde korrelgrootte in de bodem is ook onafhankelijk van de lokale waterdiepte (rechts, correlatiecoëfficiënt = 0.00).

Binnen de Waddenzee neemt de gemiddelde korrelgrootte toe met de waterdiepte. Het ruimtelijk patroon van het aandeel grovere slibpartikels in het slibmengsel is duidelijk gerelateerd aan het geulenpatroon, maar het zijn vooral de geulen ten zuiden van Terschelling en Ameland die het sterkst worden benadrukt, terwijl andere diepe geulen nauwelijks opvallende verschillen met de omliggende platen vertonen (Figuur 2.9). Op de Noordzee worden eveneens forse ruimtelijke verschillen (range 0.2-0.6) gevonden. De oorzaak van die verschillen is op dit ogenblik niet duidelijk. Er is een algemene gradiënt van zuidwest naar noordoost, maar daar bovenop zijn er meer regionale verschillen. Aan de open randen van het model lijken verkeerde verhoudingen te worden opgedrukt, maar deze spelen slechts over een beperkt gebied een rol.

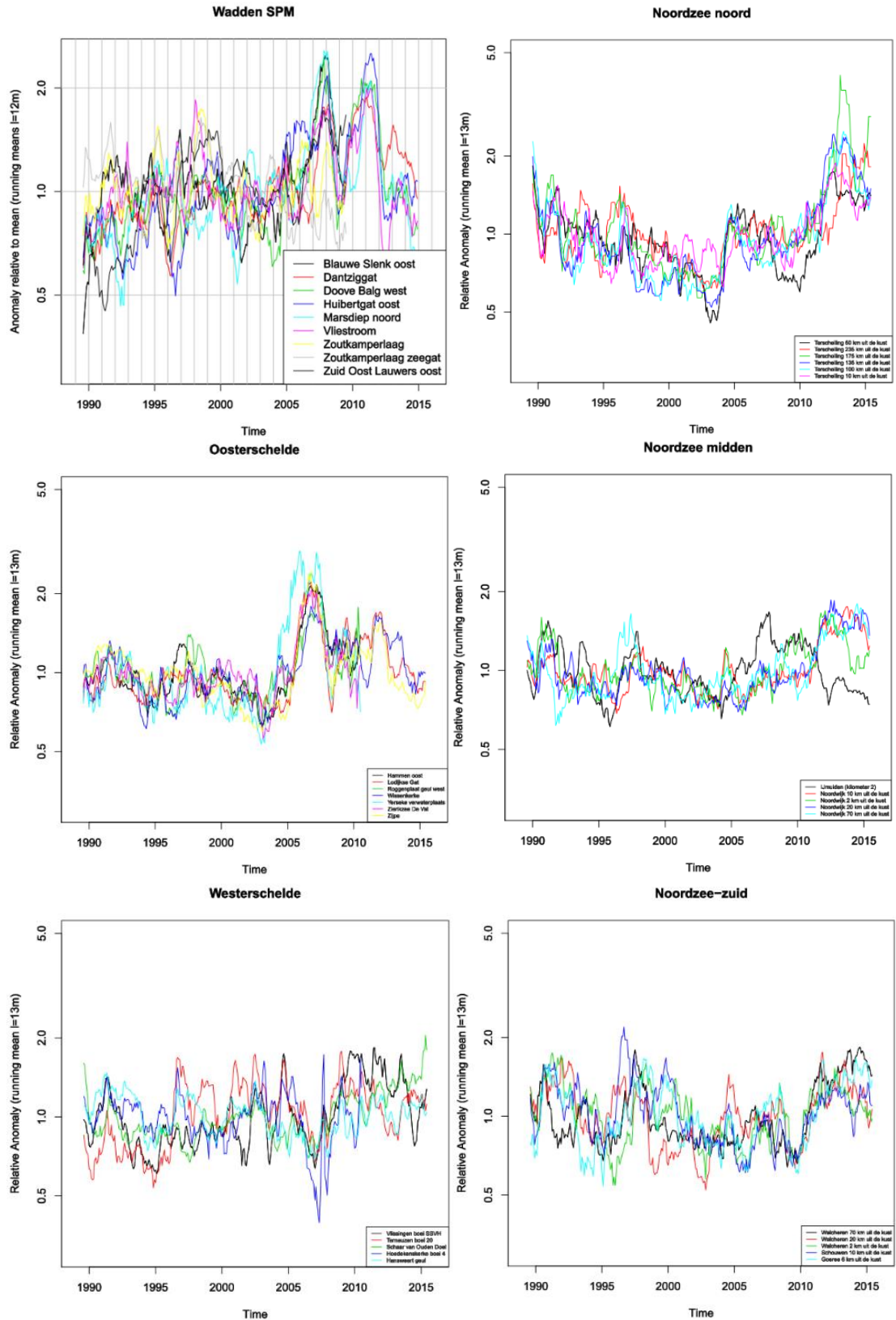


Figuur 2.9 Ruimtelijke verhouding van slibfracties in de waterkolom (dieptegemiddeld en jaargemiddeld), waarbij het aandeel van de zwaardere fractie (IM1) in het totale dieptegemiddelde SPM wordt weergegeven. Het restant is dus de lichtere fractie (IM2).

## 2.4 Fluctuaties in zwevende stof over meerdere jaren

Naast de fluctuaties van zwevende stof over de seizoenen, vertonen de tijdseries ook fluctuaties over meerdere jaren (Figuur 2.10). In de Waddenzee is rond 2018 en 2013 bijvoorbeeld een piek in zwevend stof concentratie te zien. Ook in de meeste andere watersystemen worden dergelijke fluctuaties met een tijdsduur van meerdere jaren geobserveerd. Voor beheer is het belangrijk te weten dat deze pieken over meerdere jaren bestaan, omdat ze niet mogen verward worden met onomkeerbare trends die een verandering in het systeem aanduiden. Indien we ook begrijpen waar deze fluctuaties door worden veroorzaakt, kunnen we inschatten of hier in de toekomst ook veranderingen in te verwachten zijn en of het beheer van de Waddenzee hier invloed op heeft.

De meerjarige trendcomponenten zijn in de meeste watersystemen een belangrijke component van de tijdseries. Variaties over de jaren tussen 50 en 200 % van het langjarige gemiddelde worden gevonden. De patronen van meerjarige trends zijn coherent tussen verschillende stations binnen een watersysteem (bv. Waddenzee), maar er is geen duidelijk verband tussen deze trendpatronen in verschillende watersystemen (bv. tussen Waddenzee en noordelijke Noordzee). Zo is het onduidelijk of, en hoe, meerjarige variatie in zwevend stof in de Noordzee doorwerkt in de concentraties zwevend stof van de Waddenzee. In de veldgegevens hebben wij geen duidelijke correlaties kunnen ontdekken tussen deze meerjarige patronen in de Noordzee en bekende antropogene verstoringen (bv. baggeren, suppleren, aanleg Maasvlakte II etc.) (Herman et al. 2018, De Vries et al. 2018). De meerjarige patronen kunnen dus niet worden geïnterpreteerd als het gevolg van verstoringen die verhoogde (of verlaagde) concentraties naar elders verplaatsen.



Figuur 2.10 Lange termijn trends in zwevende stof, uitgedrukt als 13-maand moving average, voor verschillende stations in de verschillende Nederlandse watersystemen. De trends zijn uitgedrukt relatief tot het lange termijn gemiddelde van de tijdserie op elk station. Figuren overgenomen uit Herman et al. (2018).

#### 2.4.1 Autocorrelatie en buffers van slib

Het feit dat belangrijke meerjarige trends worden gevonden in de tijdseries is consistent met de waarneming dat de statistische autocorrelatie in de tijdseries groot is (tot langer dan een jaar wordt statistisch significante autocorrelatie gevonden). Dit betekent dat als een waarneming hoger is dan het gemiddelde (na correctie voor seizoen), de kans groot is dat de daaropvolgende waarnemingen ook allemaal hoog zullen zijn. Waar dergelijke autocorrelatie wordt gevonden, heeft de tijdserie de neiging om relatief langzaam en quasi-trendmatig aanzienlijk te fluctueren, zoals ook te zien is in Figuur 2.10.

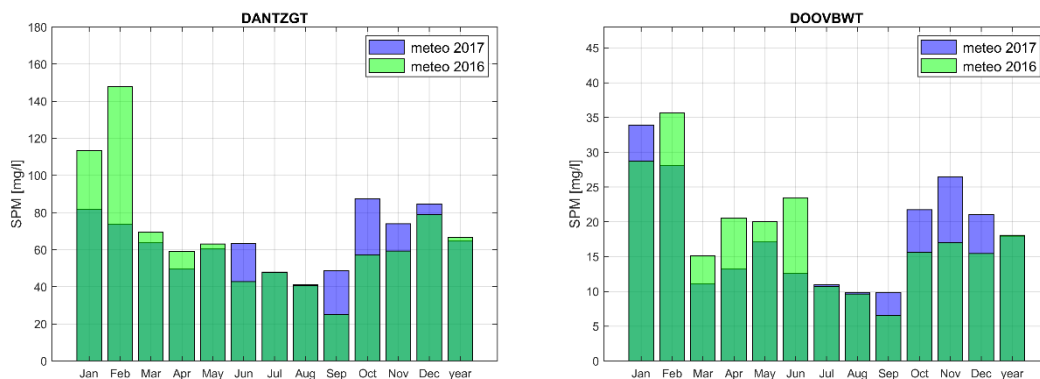
De dominante processen van depositie en erosie spelen zich voornamelijk binnen een getij (tot een doottij-springtij cyclus) af. Het is dus merkwaardig dat de tijdseries van gesuspendeerd materiaal wel belangrijke autocorrelatie over langere termijn hebben. Het suggereert dat er buffersystemen actief zijn, die sediment over langere perioden kunnen opslaan of vrijgeven, en daarmee de concentratie in de waterkolom een sterke autocorrelatie geven. De wisselwerking tussen buffers in het sediment, en concentraties in de waterkolom, zijn dubbel. Hoge waarden in de waterkolom kunnen zowel gevolg als oorzaak zijn van hoge waarden in sedimentbuffers.

Met het model in de huidige vorm is het nog niet mogelijk geweest lange periodes van meerdere jaren door te rekenen. We zijn beperkt in de mogelijkheden om deze meerjarige fenomenen met het model te onderzoeken. Toch zijn enkele zeer relevante bevindingen gedaan die kunnen helpen om dit aspect van de slibdynamiek beter te begrijpen. Details van de modellering zijn opgenomen in Smits et al. (2020), in de hierna volgende paragrafen worden de belangrijke bevindingen overgenomen.

#### 2.4.2 Het effect van meteorologische forcering

Met het model zijn twee simulaties met enkel verschillende meteorologische forcering gedraaid (meteorologie van 2016 en van 2017), waarbij onderzocht is wat het effect is van variatie in meteorologie op het gedrag van slib in het model. Om het effect van meteorologie zuiver te isoleren zijn alle andere randvoorwaarden (bv. zoetwaterafvoer, concentraties op de randen, hydrodynamische randvoorwaarden en initiële condities) in 2016 precies gelijk gehouden aan de randvoorwaarden van 2017. Alleen voor de forcering door het weer, en met name de windkracht en windrichting, zijn de echte meteorologische condities van 2016 met die van 2017 vergeleken. Geen van beide jaren was zeer extreem wat betreft weercondities, maar het patroon van windsnelheden en windrichtingen was natuurlijk niet gelijk.

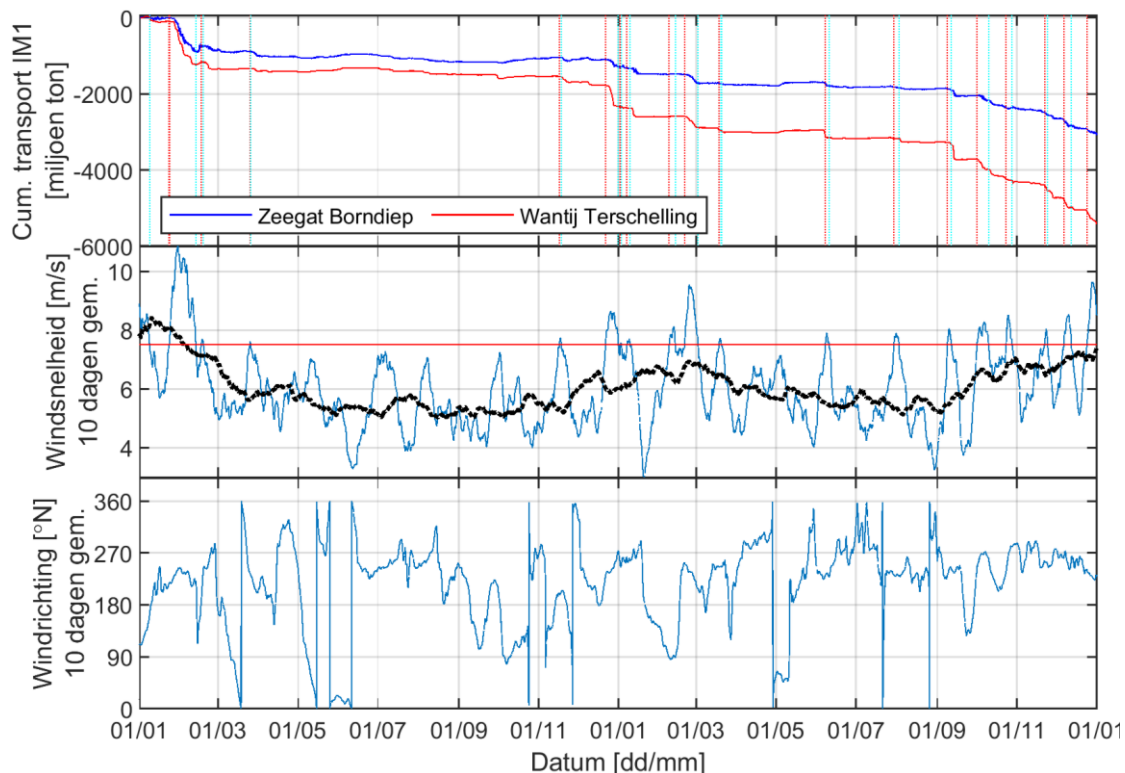
De maandgemiddelde concentraties zwevend stof tonen interessante verschillen tussen beide jaren. Hoewel er aanzienlijke verschillen optreden tussen beide jaren als we de data per seizoen bekijken, is de jaargemiddelde concentratie voor beide jaren ongeveer gelijk (zie de maandgemiddelden en het jaargemiddelde in twee MWTL stations in Figuur 2.11). Dat de jaargemiddelden gelijk zijn gebleven is wellicht toeval, maar omdat we slechts over deze twee jaren beschikken kan dat niet worden bewezen. Verder is opvallend dat opeenvolgende maandgemiddelden gecorreleerd zijn. Zo zien we begin 2016 hogere concentraties dan begin 2017 over meerdere maanden in Dantziggat, terwijl in dat station de 2017 waarden in de hele herfst hoger zijn (Figuur 2.11). Autocorrelatie in de weerpatronen, of in elk geval in de manier waarop de weerpatronen doorwerken in de concentraties, lijkt zich af te spelen over relatief lange periodes van meerdere maanden. De simulaties zijn te kort om dit statistisch nader te onderzoeken of om vast te stellen of er ook een meerjarige component is, maar de aanwijzing is interessant.



Figuur 2.11 Maand- en jaargemiddelde SPM nabij het wateroppervlak bij twee MWTL-stations voor modelsimulaties met meteorologische condities uit 2017 en 2016. Bijlage A toont de locaties van deze stations.

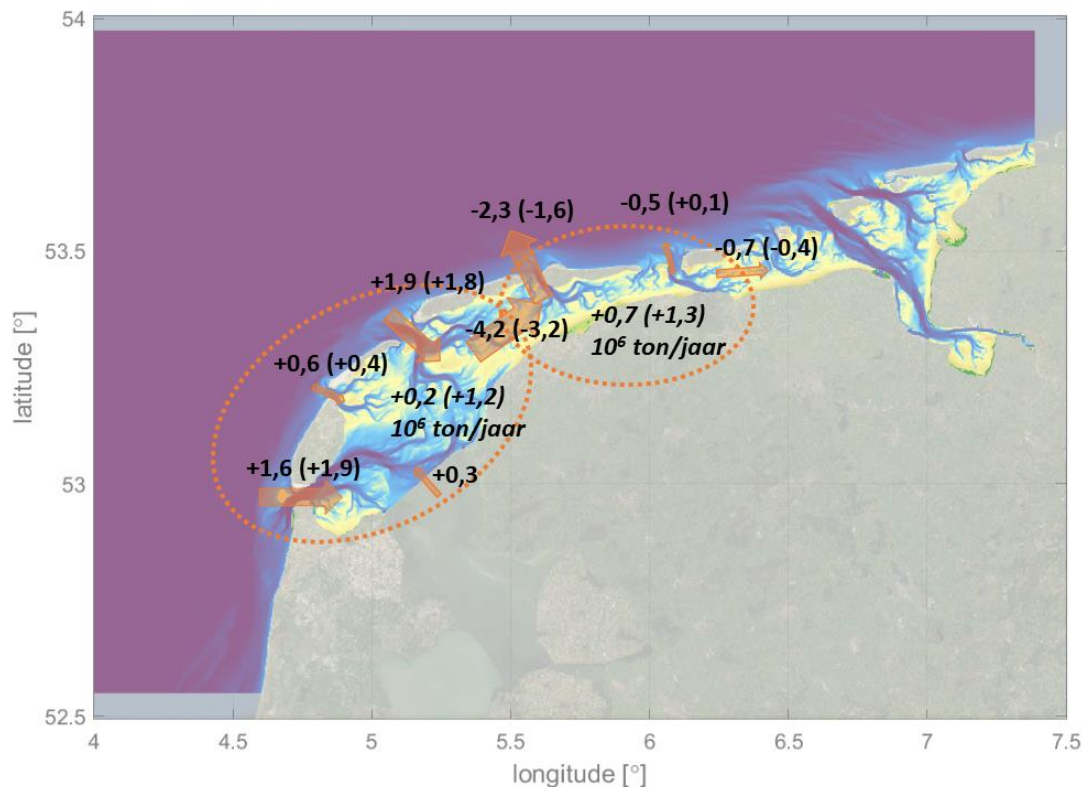
### 2.4.3 Slibimport in de Waddenzee

Er is een scherp contrast tussen de jaargemiddelde concentraties van zwevend stof in de waterkolom, die ongeveer gelijk blijven tussen 2016 en 2017, en de cumulatieve import/exportbudgetten van de Waddenzee. In die cumulatieve budgetten wordt een zeer groot verschil (ongeveer factor twee) tussen beide jaren gevonden (Figuur 2.12). De figuur beperkt zich tot de grovere slibfractie, die het gevoeligst blijkt te zijn voor windinvloed. Het cumulatieve transport over het wantij onder Terschelling (positief naar het westen om beide lijnen op de negatieve y-as te krijgen), en door het zeegat van Ameland, is veel groter in 2017 dan in 2016. Hieruit blijkt dat relatief beperkte, weinig extreme variaties in meteorologie, een grote invloed kunnen uitoefenen op de mate waarin de Waddenzee slib opslaat. In de figuur is ook heel duidelijk dat transport niet-lineair gerelateerd is aan windsnelheid. Beide series tonen op gelijke momenten sprongen met grotere transporten, die overeen lijken te komen met momenten waarop de 10 dagen gemiddelde windsnelheid hoger is dan 7.5 m/s (rode lijn in middelste subfiguur). Waarschijnlijk speelt ook windrichting hierin een rol, maar door de beperkte duur van de simulatie en de sterke correlatie tussen windrichting en windsnelheid, is het niet mogelijk geweest die invloed onafhankelijk te onderzoeken. Dit is een punt dat in verdere simulaties eventueel nader kan worden bekeken.



Figuur 2.12 Cumulatief transport van IM1 door het Zeegat van Ameland (blauw) en over het wantij van Terschelling (rood) met in verticale rode lijn aangegeven de start van een periode met 10-dagen gemiddelde windsnelheid boven de 7.5 m/s en in turquoise het einde van deze periode. Negatief is naar buiten (export) voor het Zeegat van Ameland en naar het oosten voor het wantij van Terschelling. Middelste figuur: 10-dagen gemiddelde windsnelheid (blauw) zoals gemeten bij Hoorn op Terschelling en 2-maandgemiddelde windsnelheid (zwart). Met een rode lijn is de windsnelheid van 7.5 m/s aangegeven. Onderste figuur: 10 dagen gemiddelde windrichting. Alle tijdseries voor 2 jaar: meteo 2016 direct gevolgd door simulatie met meteo 2017.

Behalve de hier geselecteerde transporten, heeft de meteorologie ook invloed op alle andere transporten, zoals geïllustreerd in Figuur 2.13. De accumulatie in de westelijke Waddenzee bijvoorbeeld was 0,2 miljoen ton in 2017, maar 1,2 miljoen ton als de meteorologie van 2016 wordt gebruikt. Alle fluxen veranderen, maar het transport over het wantij is van deze fluxen de meest veranderlijke en de belangrijkste voor de jaarlijkse balans. In de oostelijke Waddenzee is de balans van het model minder nauwkeurig door het fijnmazig patroon van geulen dat maar beperkt in de roosterresolutie wordt gevangen en het ontbreken van kwelders in het model, maar ook hier zien we een variatie van een factor twee tussen de jaren.



Figuur 2.13 Jaarlijkse netto sedimenttransporten in miljoen ton per jaar voor 2017 en (meteo 2016 tussen haakjes). Cursief gedrukt de resulterende sedimentatie in de bekkens binnen de cirkel.

## 2.5 Conclusies

De analyse van de zwevend stof concentraties, zowel op de waarnemingen uit het veld (Herman et al. 2018) als op basis van het model (Smits et al. 2020) leiden tot de volgende conclusies:

- De lognormale verdeling van de waarnemingen is een gevolg van het multiplicatief karakter van de belangrijkste processen die aan de concentratie van zwevend stof in de waterkolom bijdragen. Een multiplicatief karakter is voor de hand liggend voor processen van sedimentatie, maar is dat veel minder voor resuspensie. Er is een sterke correlatie tussen de concentratie zwevend stof in de waterkolom, en de tijdsgeïntegreerde resuspensieflux op die locatie. Als gevolg van die sterke correlatie is de bijdrage van resuspensie aan de concentratie benaderend evenredig met de concentratie, wat een verklaring vormt voor de multiplicatieve aard van de processen.
- De seizoenale variatie is in tegenstelling tot een eerder geformuleerde hypothese zeer waarschijnlijk vooral een gevolg van de seizoenale variatie in sedimentatie en (vooral) resuspensie als gevolg van golfwerking, ook op dieper water. Simulaties met andere modellen hebben bevestigd dat zonder golfmodellering het slib op de Noordzee in te grote mate op de bodem wordt afgezet. Er is dus geen sprake van een fundamenteel verschillend mechanisme voor dit proces tussen Waddenzee en Noordzee, of tussen diepe en ondiepe delen van de Noordzee.
- Met betrekking tot de meerjarige fluctuaties in zwevend stof hebben de modelsimulaties niet het definitieve antwoord kunnen geven op de vraag wat de belangrijkste onderliggende mechanismen zijn, maar zijn er wel sterke suggesties dat weerpatronen, en dan vooral langere periodes van aangehouden weertypes met bovendien pieken in windsnelheid, de potentie hebben om hieraan ten grondslag te



liggen. Relatief beperkte verschillen in meteorologie op het niveau van de Waddenzee kunnen leiden tot grote verschillen in de slibbudgetten van het hele watersysteem. Door aangehouden omstandigheden met sterke import kunnen buffers ontstaan, die door verhoogde resuspensie het systeem langere tijd in een conditie kunnen houden met hoge concentraties zwevend stof. Simulaties over langere periodes zouden nodig zijn om deze hypothese nader te testen, o.m. door de relatie tussen weerpatronen, sedimentbuffers en zwevend stof te analyseren.

## 3 Verandering in het bodemslibgehalte en de sedimentbalans

In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de veranderingen in het bodemslibgehalte, waarbij de observaties uit Herman et al. (2018) zijn bevestigd. Ook is er een sedimentbalans opgesteld om de langjarige slibsedimentatie in zowel de bekkens als de kwelders inzichtelijk te maken. De langjarige sedimentatietrends zijn gebruikt voor modelkalibratie, en zijn tevens belangrijk om de impact van menselijke ingrepen in het licht te plaatsen van de grootschalige dynamiek. De rol van kwelders op slibsedimentatie wordt kort toegelicht en is nu ook onderbouwd met eerste modelberekeningen. De positieve feedbackmechanismes die verslibbing van de bodem kunnen versterken zijn nader toegelicht en vormen de basis voor het volgende hoofdstuk. Aan het eind van dit hoofdstuk wordt vervolgens de relatie tussen SPM en bodemslibgehalte onderzocht.

### 3.1 Veranderingen in bodemslibgehalte over de afgelopen eeuw

In Herman et al. (2018) is een analyse gemaakt van de variatie in slibgehalte van de (bodem)sedimenten van de Waddenzee in ruimte en tijd. Resultaten van bepalingen van slibgehalte uit het SIBES programma zijn gebruikt om ruimtelijke variaties te onderzoeken en om een eerste analyse te maken van verschillen tussen jaren. Voor veranderingen op veel langere termijn is een vergelijking gemaakt met kaarten van Lely (1892), de Glopper (1967, data van de jaren 1950) en Zwarts (2004, data van de jaren 1990). Die analyse was visueel en op basis van kaarten die niet helemaal vergelijkbaar waren. De conclusie was dat er grote gelijkenissen bestaan in de patronen van slibgehalte van de sedimenten, ook op de lange termijn, maar dat er ook opvallende verschillen bestaan. Die verschillen hebben te maken met de grote ingrepen in het systeem (afsluiting van de Zuiderzee en van de Lauwerszee) en met de kwelderwerken, die slib hebben geaccumuleerd langs de vastelandskust, daardoor de komberging van de kleinere geulen hebben verminderd, en verdere aanslibbing waarschijnlijk ook indirect hebben bevorderd.

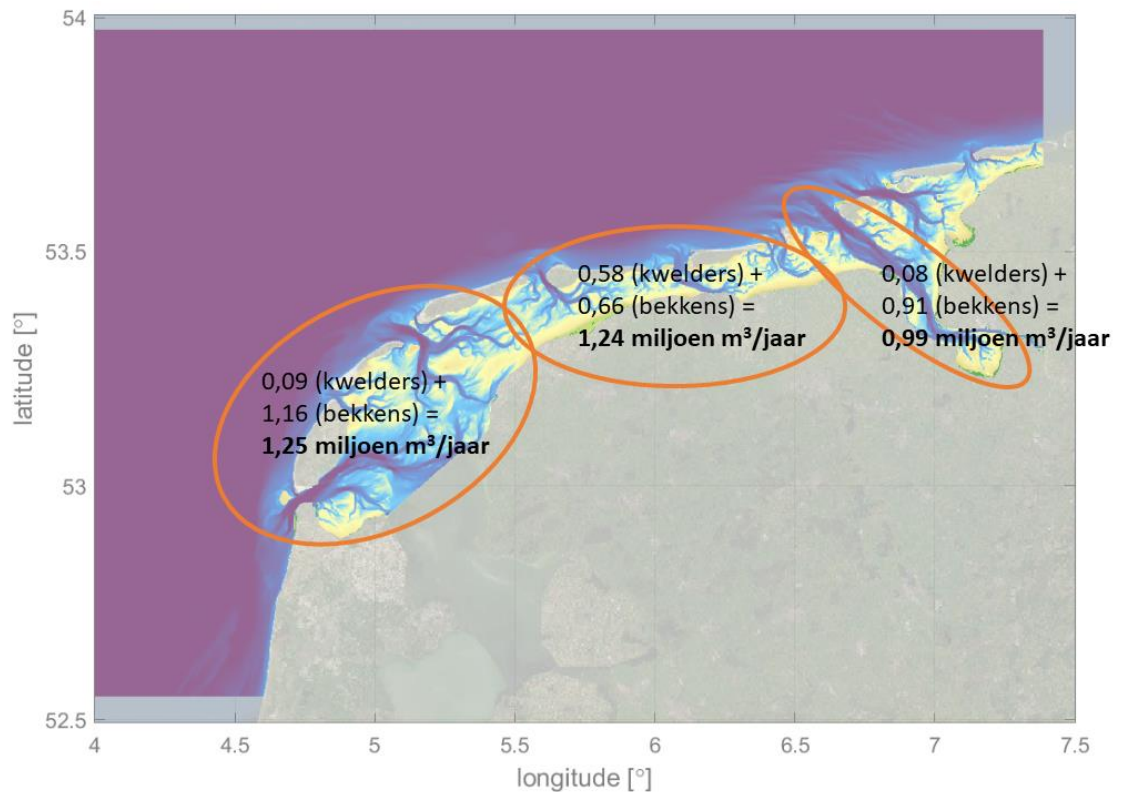
Deze preliminaire analyse is zorgvuldig overgedaan in GIS en nauwkeuriger gekwantificeerd door Colina Alonso (2020). Op een kwalitatief niveau worden de eerdere bevindingen bevestigd.

### 3.2 Sedimentbalans sinds 1990

De detailanalyse van Colina Alonso (2020) heeft toegelaten veel nauwkeuriger te bepalen in welke mate slib heeft bijgedragen aan de morfologische veranderingen van de Waddenzee in de afgelopen decennia. Een elementaire eerste schatting van het aandeel van slib in de volumeverandering zou kunnen worden gebaseerd op een vermenigvuldiging van de gebiedsgemiddelde hoogtetoeename met het gebiedsgemiddelde slibgehalte van het sediment. Deze benadering geeft echter een forse onderschatting van de werkelijke bijdrage van slib aan de volumeverandering. De reden daarvoor is dat slibgehalte en sedimentatie ruimtelijk met elkaar gecorreleerd zijn: vooral in slibbige zones van de Waddenzee is er veel netto sedimentatie geweest, terwijl de zandige zones veel constanter in hoogte zijn gebleven. Op basis van deze schattingen, en van de schattingen van slibsedimentatie op de kwelders door Cleveringa (2018), is een nieuwe gemiddelde slibbalans voor de drie delen van de Nederlandse Waddenzee (west, oost, Eems-Dollard estuarium) gemaakt. Slib draagt jaarlijks een sedimentvolume van 3,5 miljoen m<sup>3</sup> bij aan de Waddenzee en het Eems estuarium (Figuur 3.1). Ongeveer 20 % daarvan wordt afgezet in de kwelders, de rest in de bekkens. Het opvullen van te ruime geulen na de afsluitingen heeft in die slibsedimentatie een rol

gespeeld, maar de laatste jaren is de bijdrage van dat proces niet zeer groot meer. Wel van belang is de uitstralende hydrodynamische invloed van de kwelders en de kwelderwerken, vooral voor de Friese kust: door vermindering van de komberging wordt ook verder uit de kust de stroming beperkt en ontstaan omstandigheden waar grotere hoeveelheden slib kunnen bezinken en aan de morfologie bijdragen. Op de kwelders zelf wordt de slibsedimentatie beperkt door de hoge ligging van de kwelders, waardoor overstromingsfrequentie relatief laag is en sedimentatie dus ook beperkt.

Er zijn echter ook slibrijke gebieden die een netto eroderende ontwikkeling hebben, zoals bijvoorbeeld de Hond-Paap plaat in de Eems. Het is mogelijk dat deze gebieden op lange termijn als slibbron voor het systeem fungeren.



*Figuur 3.1 Samenvatting van de slibbalans voor drie hoofdsegmenten van de Nederlandse Waddenzee. Schattingen zijn gebaseerd op historische metingen van vaklodingen sinds 1990 en slibgehalte van de sedimenten. Details worden gegeven in Colina Alonso (2020) en Cleveringa (2018).*

De schattingen van netto slibsedimentatie in het slibmodel (Figuur 2.13) komen goed overeen met de veldobservaties op lange termijn. Daarbij moet worden aangestipt dat de kwelders niet in het model zijn opgenomen.

### 3.3 De rol van kwelders

Het model heeft ook bijgedragen aan een beter begrip van de uitstralende invloed van kwelderontwikkeling op het slibgehalte van de waterkolom en van de bodem in het omliggende deel van de Waddenzee. Eén van de geanalyseerde modelvarianten betreft het verwijderen van een flink deel van de kwelder voor de Friese kust (Smits et al. 2020). Daaruit blijkt dat het creëren van een groot bezinkingsbekken op deze plaats forse veranderingen veroorzaakt in de concentraties zwevende stof in de Waddenzee. Verder blijkt dat de geulen naar het gebied minder slibbig worden, als gevolg van de toename van de komberging en daardoor optredende forse erosie. Omdat wordt vergeleken met een situatie mét hoge platen,

kan worden geconcludeerd dat aanleg/ondersteuning van kweldervorming aanvankelijk leidt tot een verhoogde depositie en een vermindering van SPM in een aanzienlijk gebied, maar na verloop van tijd neemt SPM weer toe en treedt bovendien verslibbing van de geulen op. Dat is in overeenstemming met de hypothesen die eerder naar voren waren gebracht.

### 3.4 Zandige en slibrijke gebieden

De statistische verdeling van de waarnemingen van slibgehalte in de bodem vertoont een zeer opvallend en relevant kenmerk. De waarnemingen zijn bimodaal verdeeld. De meeste waarnemingen betreffen ofwel zandige sedimenten met een laag slibgehalte (~5 %) ofwel slibbige sedimenten met een hoog slibgehalte (25-50%), maar er vallen opvallend weinig waarnemingen tussen deze twee modes. Gebieden die in de hoge of lage mode vallen zijn weinig variabel in de tijd. Voor de gebieden met een gemiddeld slibgehalte zijn er twee smaken: sommige gebieden zijn erg variabel in de tijd, wat betekent dat ze tussen slibrijk en slibarm wisselen. Andere punten met een intermediair bodemslibgehalte zijn juist wel relatief stabiel. Dit patroon is ook nader onderzocht door Colina Alonso (2020). Er blijkt een verschil tussen de westelijke (meer zandig) en oostelijke (meer slibbige gebieden) Waddenzee te bestaan. Punten met intermediair slibgehalte, die op de grens tussen slibrijk en slibarm gebied liggen, blijken relatief stabiel te zijn in de tijd en lange tijd hun intermediair slibgehalte te bewaren. Punten die een vrij hoog slibgehalte hebben maar midden in zandig gebied liggen, of omgekeerd, zijn weinig stabiel in hun intermediair slibgehalte en keren meestal snel terug tot een vergelijkbaar slibgehalte met de omgeving.

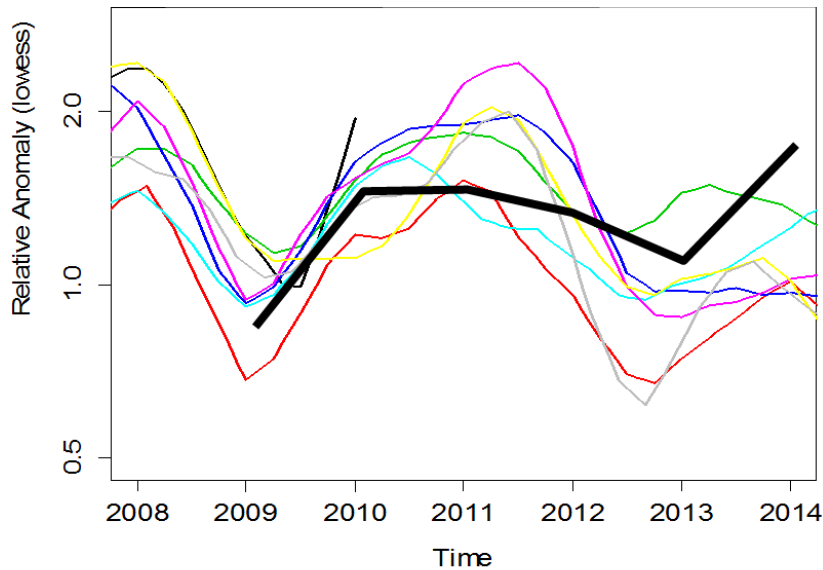
Zowel ecologische als fysische processen zouden dit fenomeen van bimodaliteit kunnen verklaren. Deze mechanismen hebben gemeenschappelijk dat sedimenten met een hoog slibgehalte de neiging hebben meer slib aan te trekken, terwijl zandige sedimenten de neiging hebben zandig te blijven.

- De fysische mechanismen werken via de ruwheid van de bodem. Slibbige bodems zijn gladder, waardoor voor een gelijke stroomsnelheid de bodemschuifspanning afneemt en dus ook de erosie van slib afneemt met toenemend slibgehalte. De fysische dynamiek die tot dit patroon aanleiding geeft, wordt nader onderzocht middels modellen door Colina Alonso, maar is nog niet gepubliceerd.
- Fysisch-ecologische mechanismen werken via microfytobenthos, de algen die op het sediment groeien. Aanwezigheid van deze algen wordt bevorderd door slibgehalte, omdat slibbige bodems meer nutriënten bevatten en graas op algen bemoeilijken. Anderzijds verminderen de algen de erodeerbaarheid van slib, waardoor het sediment slibbig zal blijven. Beide mechanismen sluiten elkaar niet uit, en de huidige gegevens laten ook niet toe om een duidelijke keuze te maken tussen beide verklaringen. Observaties jaarrond zouden beter uitsluitsel kunnen geven, omdat er een duidelijke seizoenscomponent is in de ecologische factor, terwijl dat voor de fysische factor niet het geval is. Helaas beschikken we nu alleen over zomerwaarnemingen. In hoofdstuk 4 wordt nader ingegaan op de eerste inspanningen om met een numeriek model het effect van microfytobenthos op het SPM te kwantificeren.

### 3.5 Correlatie SPM en bodemslibgehalte

Er is geen duidelijke correlatie tussen het gemiddelde slibgehalte van het sediment, waargenomen in de zomer, en de concentratie zwevend stof in het betreffende jaar. Er is een zwakke aanwijzing dat een hoog slibgehalte in het sediment tijdens een zomer, correleert met een hoog gehalte zwevende stof in het daaropvolgende jaar (Figuur 3.2), maar de aanwijzingen zijn zwak en laten geen sterke conclusie toe. Indien er langere tijdreeksen van het bodemslibgehalte (SIBES) ter beschikking worden gesteld, kan er meer inzicht in de correlatie worden verkregen. Het model laat ook een lage correlatie tussen slib in de buffers

en SPM zien op individuele punten. Het model zou voor een langere periode doorgerekend moeten worden om te kijken of de relatie over enkele jaren ook aanwezig is.



Figuur 3.2 Middellange termijn trend in SPM (gecorrigeerd voor seizoensinvloeden) voor verschillende MWTL stations in de Waddenzee (in kleur) en het gemiddelde bodemslibgehalte van de Waddenzee (dikke zwarte lijn, uit SIBES gegevens). De tijdserie van het bodemslibgehalte betreft enkel zomermetingen, en is een half jaar naar achteren verschoven.

### 3.6 Conclusies

De analyse van de bodemslibgehalten, zowel op de waarnemingen uit het veld (Herman et al. 2018; Colina Alonso 2020) als op basis van het model (Smits et al. 2020) leiden tot de volgende conclusies:

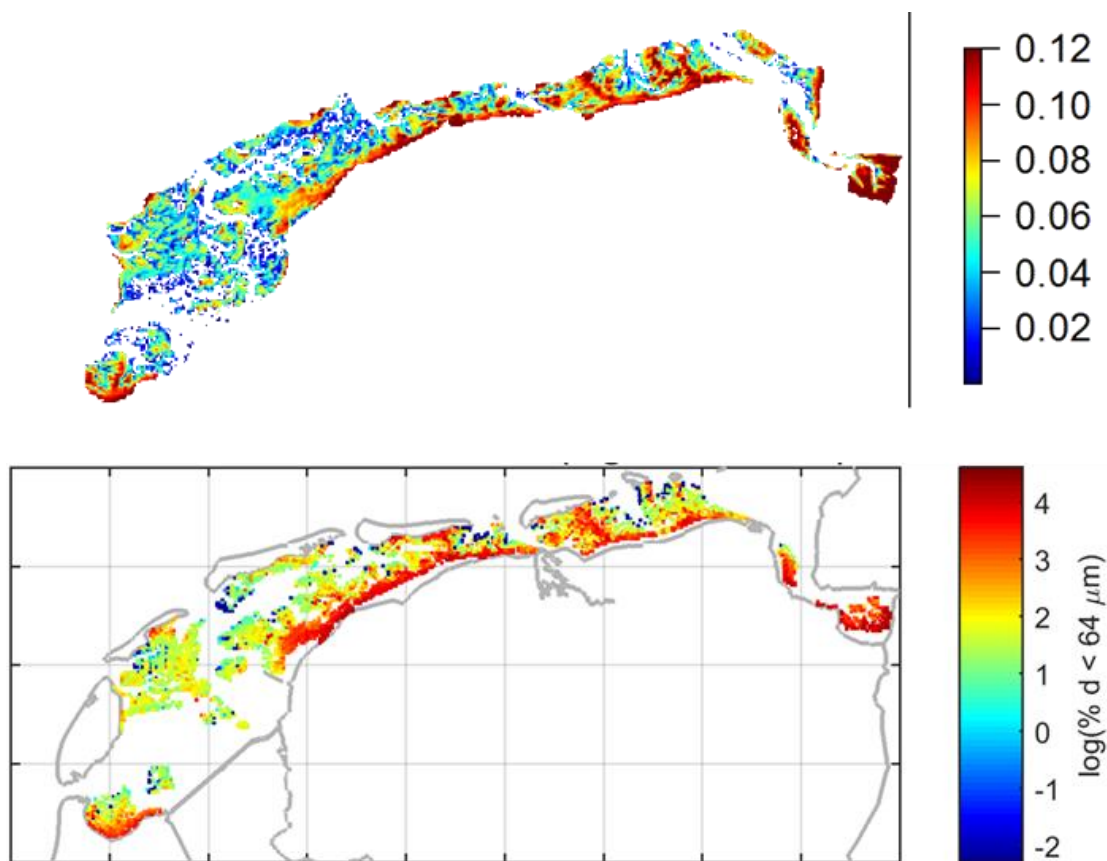
- De bodemslibgehalten zijn op de meeste plaatsen weinig veranderd in de afgelopen eeuw, er zijn enkele locaties die wel veranderd zijn zoals de Oude Vlieter geul en het wantij bij Terschelling.
- Sinds 1990 is er ongeveer 2,5 miljoen m<sup>3</sup> slib per jaar in de Waddenzee gesedimenteerd. In de oostelijke bekkens ligt ongeveer de helft hiervan in de kwelders.
- Kwelders kunnen leiden tot een verkleining van de komberging en daarmee tot slibsedimentatie in geulen.
- In de Waddenzee zijn er vooral erg zandige en erg slibbige gebieden te vinden, waarvan de laatste relatief veel bijdragen aan de sedimentatie. Er zijn fysische en biologische terugkoppelingen die ervoor zorgen dat slibrijke plekken slibrijk blijven. Gebieden met een intermediair slibgehalte zijn alleen stabiel als ze in een overgangsgebied tussen zandige en slibbige gebieden liggen.
- Er is een zwakke relatie tussen variatie in bodemslibgehalte en variatie in SPM.

## 4 De rol van microfytobenthos

In dit hoofdstuk worden de bevindingen over de relatie tussen microfytobenthos en zowel bodemslib als zwevend stof beknopt samengevat. Microfytobenthos kan leiden tot het vastleggen van slib op de bodem en daarmee mogelijk een invloed hebben op zwevend stof. Vervolgens wordt toegelicht tot welke resultaten de implementatie van microfytobenthos in een geschematiseerd model heeft geleid. In Smits et al. (2020) staan de details van deze implementatie beschreven in bijlage A.

### 4.1 Relatie tussen microfytobenthos en slib

Het microfytobenthos, de algen die groeien op de bodem van het intergetijdengebied van de Waddenzee, heeft een ruimtelijke verspreiding die opvallend sterk gecorreleerd is met het slibgehalte van het sediment. De sterke ruimtelijke correlatie tussen slibgehalte van het sediment en biomassa van het microfytobenthos verlenen geloofwaardigheid aan de hypothese dat de bimodaliteit van slibgehaltenes via het microfytobenthos zou kunnen verlopen. Nader onderzoek is nodig om deze hypothese verder te toetsen.



Figuur 4.1 Boven: kaart met tijdsgemiddelde (2003-2008) microfytobenthos biomassa zoals geschat van NDVI uit satellietbeelden (van del Wal et al. 2010). Onder: Tijdsgemiddelde (2008-2013) bodemslibgehaltenes voor de intergetijdengebieden zoals bemonsterd in het SIBES meetprogramma. Figuur overgenomen uit Herman et al. (2018).

In de tijd is er een opvallende omgekeerde correlatie tussen microfytobenthos en concentratie zwevende stof, tenminste voor wat betreft de seizoenale variatie (Figuur 4.2). De gegevens over het microfytobenthos laten slecht toe te controleren of er een correlatie is met de meerjarige trend in zwevende stof omdat de tijdserie van NDVI zo kort is, al zijn de gegevens ook niet in flagrante tegenspraak met deze hypothese. Door NIOZ (Daphne van der Wal) wordt de analyse uit onderstaande figuur van de ontwikkeling van het microfytobenthos in de Waddenzee uitgebreid tot de periode 2003-2018.



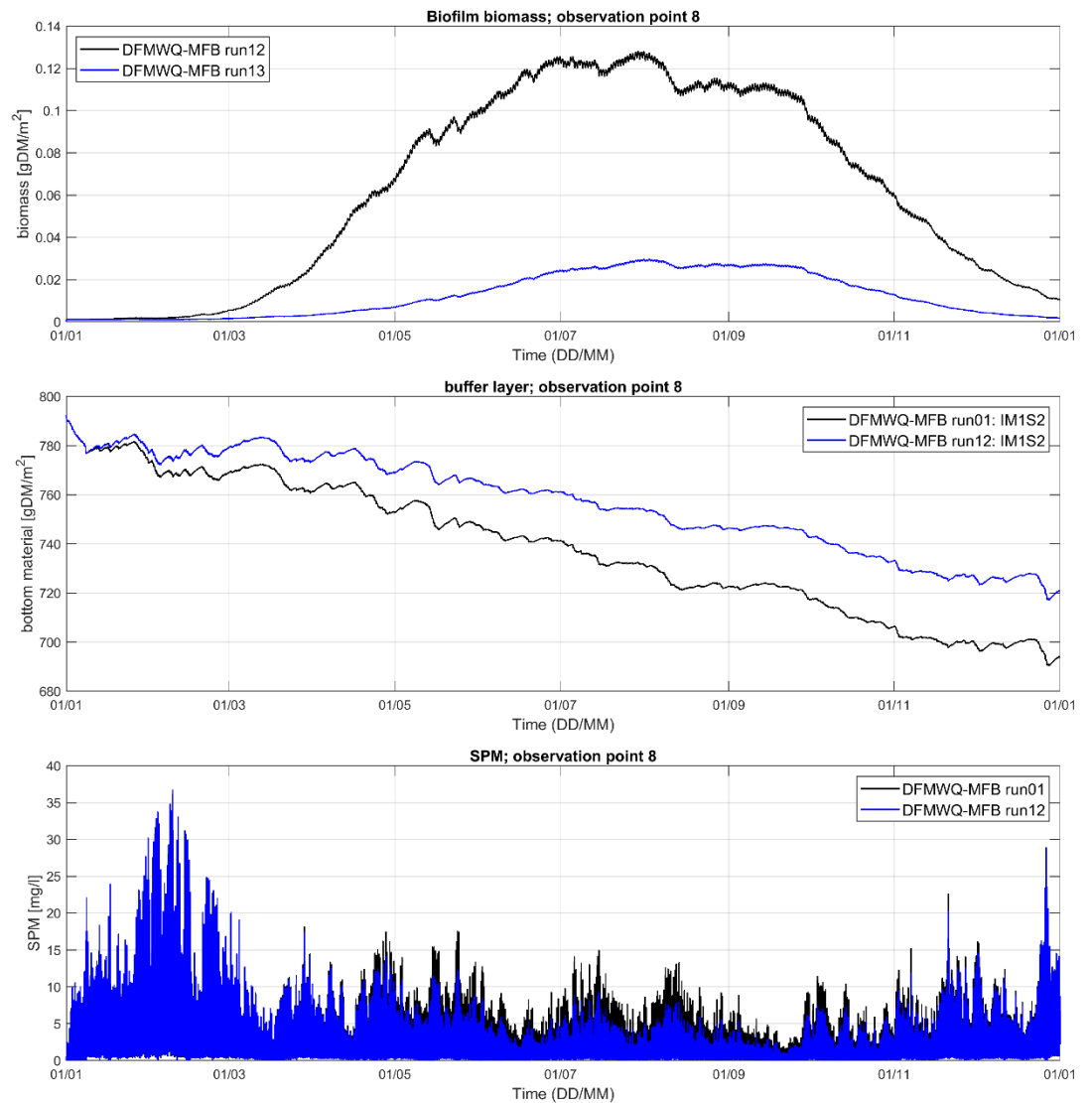
Figuur 4.2 Vergelijking van de gestandaardiseerde (gemiddelde 0, standaarddeviatie=1) seizoenale component van de microfytobenthos biomassa gemeten als NDVI, gemiddelde over de Waddenzee (van der Wal et al. 2010) en de seizoenale component of gemiddelde SPM over de Waddenzee (alle tijdseries behalve Vliestroom, Zoutkamperlaag en Zoutkamperlaag zeegat). De data in (b) zijn gelijk als in (a), maar NDVI is negatief weergegeven om de correlatie duidelijker te maken.

## 4.2 Eerste inschatting effect microfytobenthos op SPM met numeriek model

In een slibmodel van een geschematiseerd bekken is op experimentele basis een formulering voor de dynamiek van microfytobenthos toegevoegd (Smits et al. 2020). Dit is gedaan door de kritische bodemschuifspanning voor resuspensie te verhogen naarmate de microfytobenthos (of meer precies de biofilm daarvan) massa groter is. De microfytobenthos-groei is afhankelijk van de zonne-instraling. De modelresultaten laten een wezenlijk effect van het microfytobenthos op de slibdynamiek zien (Figuur 4.3), globaal in lijn met veldmetingen en analyse van satellietbeelden, waarbij de omvang van het effect afhankelijk is van de gekozen parameterinstellingen. Het reducerende effect van de microfytobenthos op het SPM-gehalte is het grootst in de zomer, waarbij in een geschematiseerd 2D testmodel maximaal tussen de 30% en 70% verlaging van de SPM-gehalten plaatsvond voor verschillende groeisnelheden op verschillende stations. Ook deze parameterinstellingen moeten gekalibreerd worden om een realistisch effect op de slibconcentratie te krijgen. Met een geschikte dataset om dit deel te kalibreren kan de nieuwe software-implementatie toegepast gaan worden op de Waddenzee.

Kalibratie van het model en toepassing op de Waddenzee vereist de beschikking over voldoende velddata. Aanbevolen wordt om in een later stadium de observaties uit remote sensing te verbinden met de modellering, om zodoende tot betere kalibratie en testen van het model te komen. Daarvoor is het van belang om niet alleen binnen een jaar naar seizoenale variatie te kijken, maar ook de ruimtelijke variatie mee te nemen en de jaar-tot-jaar variatie.

Deze variatie kan meer inzicht geven in de dynamiek van zowel microfytobenthos als slibgehalte.



Figuur 4.3 Bovenste paneel toont de ontwikkeling van de biofilm (geproduceerd door microfytobenthos) gedurende het jaar voor twee verschillende groeisnelheden. Middelste paneel toont het vastleggen van het slib in de bodem (blauw met en zwart zonder MFB). Onderste paneel toont het verlagende effect op het SPM-gehalte (blauw met en zwart zonder MFB).



## 5 Conclusies en aanbevelingen

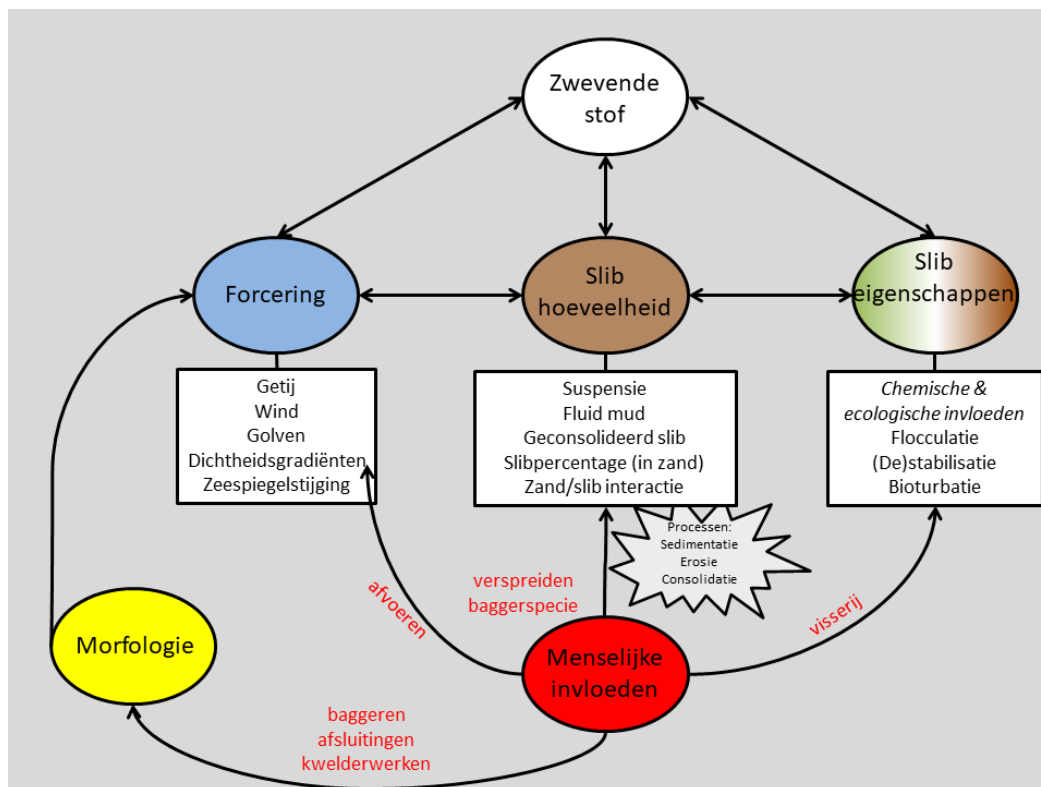
In dit hoofdstuk wordt de verbetering en verdere uitbouw van het conceptuele model samengevat. De resultaten van de numerieke modellering hebben aan deze verbetering bijgedragen. Dit verbeterd inzicht wordt teruggekoppeld naar de behoeften van beleid en beheer.

### 5.1 Inleiding

Herman et al. (2018) concludeerden uit statistische analyse van de gehalten zwevende stof in de MWTL meetstations, en van slibgehalten in de sedimenten van de Waddenzee, dat er variatie optreedt op drie belangrijke tijdschalen:

- De korte tijdschaal is de schaal van getijden en spring/doodtij variaties. Op deze tijdschaal vinden de belangrijkste processen van transport, erosie en depositie plaats. Ook wind-gerelateerde extreme omstandigheden spelen zich af op deze tijdschaal.
- De lange tijdschaal is de tijdschaal van decennia en langer, waarin morfologische ontwikkelingen plaatsvinden. Slib speelt in de Wadden een significante rol in deze morfologische ontwikkelingen.
- Tussen beide tijdschalen in speelt nog een derde tijdschaal, de mesoschaal, die loopt van seizoensvariatie tot enkele jaren. Het is de schaal waarin het 'geheugen' van het systeem resulteert in aanzienlijke (factor 2) variaties in zwevende stof van jaar tot jaar en van seizoen tot seizoen.

Uitgesplitst naar invloedsfactoren (Figuur 5.1) onderscheiden we hydrodynamiek, hoeveelheid slib en eigenschappen van het slib, naast morfologische ontwikkelingen. Op de korte tijdschaal (uren tot dagen) wordt de slibdynamiek gedomineerd door de hydrodynamica gegeven de aanwezige hoeveelheid slib in bodem en water 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. Op de lange tijdschaal (vele jaren) komt hier nog de interactie met morfologische ontwikkeling bij.



Figuur 5.1 Schematisch en generiek diagram van de belangrijkste processen die SPM gehalten beïnvloeden.

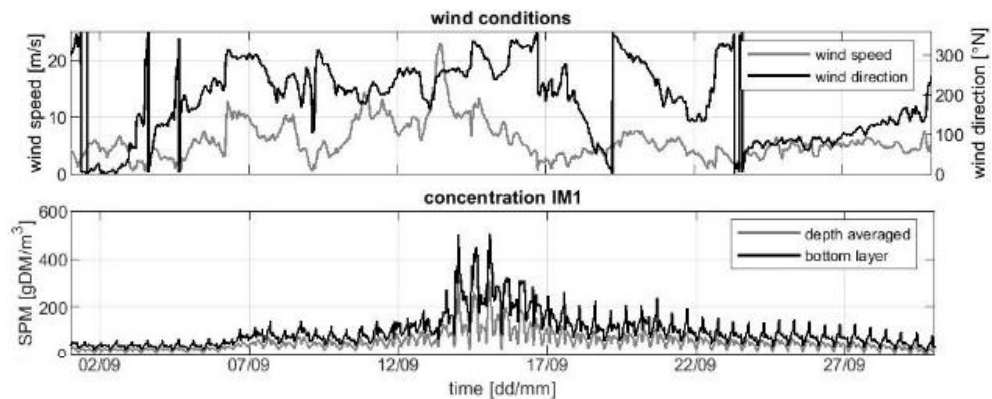
De ontwikkeling van het numeriek model (Vroom et al. 2020, Smits et al. 2020) is een belangrijke stap geweest in het verbinden van de korte tijdschaal, waarop de bepalende processen zich afspelen, en de mesoschaal en lange schaal waarop veranderingen in de slibgehalten van de waterkolom, en veranderingen in slibgehalten van de bodem en in morfologie, zijn waargenomen. De gedetailleerde analyse van die laatste fenomenen (Colina Alonso 2020) heeft bovendien toegelaten een scherper beeld te schetsen van de ontwikkelingen in slibgehalten van het sediment op lange termijn, van de bijdrage van slib in de morfologische veranderingen, en van de processen die slibgehalte van het sediment bepalen.

## 5.2 Slibdynamiek op korte tijdschaal

In de Waddenzee beschikken we niet over een uitgebreide set van metingen van zwevende stof in de waterkolom op de korte tijdschaal. Slechts occasioneel zijn op een paar punten dergelijke meetseries voorhanden. Figuur 5.1 toont het de reactie van het Waddensysteem op het optreden van een storm in de sedimentconcentratie in het numerieke model. Er zijn geen metingen beschikbaar om het model te kalibreren op dit gedrag, bijvoorbeeld de hoogte van de sedimentconcentratiepiek en de periode dat de sedimentconcentraties verhoogd blijven. Ook van de intragetijdendynamiek in de periode voor de storm zijn geen metingen voor handen. Het is vooralsnog niet mogelijk om op basis van metingen te onderzoeken of, en hoe, de resuspensie- en sedimentatiedynamiek van slib varieert van plaats tot plaats als functie van ruimtelijk variërende factoren zoals zand/slib verhouding, consolidatiegraad van het slib of blootstellingsduur. In algemene zin is veel bekend over het verband tussen hydrodynamische krachten op de bodem, en processen van sedimentatie, resuspensie en consolidatie. Die kennis is verwerkt in het numerieke model. Onbekende parameters zijn gekalibreerd aan de weinige gegevens uit de Waddenzee die voorhanden zijn (zie bespreking in het kalibratierapport Vroom et al. 2020). In het kalibratierapport is geconcludeerd dat het model de processen voldoende goed beschrijft in ieder geval voor

zover dat met de huidige metingen en ons huidige begrip van het systeem kan worden getoetst, maar dat er ook nog enkele modelverbeteringen doorgevoerd kunnen worden die de onzekerheden verder verkleinen.

### Amelander Zeegat boei51, bed level = -12.8 m NAP



Figuur 5.1 Tijdsreeks van modelresultaten bij observatiepunt Amelander Zeegat boei 51 gelegen in een geul (bodenniveau -12,8 m NAP) in september 2017. Het bovenste paneel toont de windsterkte (grijs) en richting (zwart); op 13 september treedt er een storm op met windsnelheden boven de 20 m/s. Het onderste paneel toont de sedimentconcentratie van een van de slibfracties (IM1) in de waterkolom en laat duidelijk de reactie op de storm zien.

Het numerieke model speelt een belangrijke rol voor de studie van de slibdynamiek in de Waddenzee, en voor de verdere ontwikkeling van het conceptueel model. Het laat immers toe om de hydrodynamische forcering te ‘vertalen’ naar patronen van slibvoorkomen. Dat betreft zowel patronen (in tijd en ruimte) in de concentraties van zwevend stof in de waterkolom, als van slibgehalte in de bodem. Aan de hand van numerieke experimenten (bijvoorbeeld het uitschakelen van zoutvariatie, of het simuleren van een jaar dat alleen in meteorologische condities verschilt van het standaardjaar) kan vervolgens worden nagegaan welke processen het meeste bijdragen aan de vorming van patronen in de ruimte, of variaties op langere termijn in de tijd.

## 5.3 Slibdynamiek op de mesoschaal

Het modelonderzoek heeft aangetoond dat de Waddenzee zeer gevoelig is voor meteorologische forcering, in lijn met eerdere studie van o.a. Duran-Matute (2016). Verschillen in windforcering per jaar kunnen zorgen voor grote verschillen in de slibbalans van de Waddenzee. Dat vertaalt zich in het opbouwen of leeglopen van dynamische slibbuffers. Indien er opeenvolgende jaren optreden waarin er extra slib wordt geborgen in de Waddenzee, zou dit een verhoogde SPM tot gevolg kunnen hebben. Dit is echter nog niet modelmatig aangetoond, omdat dat een langere periode van simuleren vereist. De specifieke karakteristieken van de windforcering waarbij meer of minder slibsedimentatie in de Waddenzee plaatsvindt zijn nog niet uitputtend ontrafeld, maar de huidige resultaten suggereren dat windsnelheden boven 7,5 m/s die voor langere periode aanhouden (orde dagen) uit westelijke richtingen, die grote invloed uitoefenen op het transport over de wantijen, een cruciale rol spelen.

Het eerder aangetoonde verband tussen seizoensale variatie in zwevend stof, en variatie in microfytobenthos is ook schematisch onderzocht, waarbij er een duidelijk verband is tussen SPM en microfytobenthos. Echter, de microfytobenthos-groei hangt ook samen met dezelfde grootschalige weerpatronen die ook veel invloed hebben via het wind-gedreven transport. Mogelijk zit dit effect impliciet al in bepaalde mate in het model via kalibratie van erosie van

de bodemlagen. Om dit met grotere mate van nauwkeurigheid te simuleren, zijn meer metingen van seizoenale variatie in slibgehalte in de bodem en microfytobenthos nodig, evenals meer inzicht in de bijdrage van microfytobenthos aan de erosie-resistentie of opbouw van sterkte van de bodem. Naar verwachting zullen hierover nieuwe inzichten ontstaan nadat langjarige metingen van microfytobenthos over de Waddenzee beschikbaar komen.

Modelsimulaties hebben ook aangetoond dat de zoetwaterafvoer, die zelf een seizoenssignaal heeft (met grotere afvoer in de winter en kleinere afvoer in de zomer), niet leidt tot een sterk seizoenssignaal in het SPM omdat de saliniteitsgradiënt ook in de zomerperiode met lagere afvoer voor een groot deel in stand blijft. Uiteraard is de saliniteitsgradiënt wel heel belangrijk voor het sedimenttransport naar de Waddenzee (import) via estuariene circulatie.

Ook in de Noordzeestations zijn er belangrijke schommelingen in zwevend stof op de mesoschaal. Deze schommelingen zijn binnen deelsystemen (bv. binnen de Waddenzee) onderling gecorreleerd, maar tussen systemen (bv. Waddenzee - Noordzee) vertonen ze weinig samenhang. Als de mesoschaal schommelingen vooral afhangen van weerpatronen en de daaruit volgende accumulatie of verlies van slib, is het logisch dat ze niet in fase zijn tussen verschillende systemen. Die systemen ondervinden immers andere invloed van de meteorologie. Eerdere analyses (Herman et al., 2018; de Vries et al., 2018) vonden geen correlatie met gedocumenteerde slibbronnen zoals zandwinning, storten van havenslib en andere menselijke verstoringen.

Studie van de verticale verdeling van sediment in het model heeft meer inzicht gegeven in de oorzaak van de seizoenale component in de tijdseries. Hoewel de verticale verdeling van het slib over de waterkolom in diepe stations een zekere seizoenale component blijkt te hebben, is dit niet de factor die veel bijdraagt aan het verklaren van de seizoenaliteit in het gehalte zwevende stof aan het oppervlak. Met het model is aangetoond dat er op de Noordzee een groter verschil is tussen de verticale menging in de verschillende seizoenen dan in de Waddenzee, maar dat dit effect wordt overschaduwd door golf-gedreven resuspensie. Hoewel vrij hoge golven nodig zijn om op een diepte van tientallen meters de bodem significant te beroeren, lijkt dat volgens het model toch frequent genoeg te gebeuren om een seizoenscyclus van sedimentatie en resuspensie te veroorzaken.

## 5.4 Slibdynamiek op de lange tijdschaal

Het numerieke slibmodel is nog niet gebruikt om berekeningen over vele jaren te maken. De rekentijd van het model is beperkend voor dergelijke toepassingen. Bovendien is het model (nog) niet afgeregeld om morfodynamiek mee te nemen. Indien het model zal worden uitgebreid met morfodynamiek, zou een morfologische procesformulering die rekening houdt met zand-slib interactie de voorkeur hebben in een sterk zand-slib gemengd systeem als de Waddenzee.

Niettemin zijn de modeltoepassingen wel zeer relevant voor het begrip van de interactie tussen slibdynamiek en morfologische ontwikkeling. De modelberekeningen van het effect van een slibvang (zowel binnendijs als buitendijs) hebben aangetoond hoe daarmee zowel de hydrodynamiek, het slibgehalte in het sediment van de voorliggende Waddenzee, als het gehalte zwevende stof in het water worden beïnvloed. De (zeer grote) slibvang-varianten (30 km<sup>2</sup>) die zijn doorberekend hadden substantiële effecten op deze drie variabelen. Het gehalte zwevende stof werd met tientallen procenten verlaagd in een gebied in de orde van een komberging als gevolg van de slibvang. Ook de effecten op komberging, en daarmee op de stroomsnelheid en het debiet door de geulen was aanzienlijk. Tezamen hebben deze effecten ook het slibgehalte van het sediment beïnvloed, al was het volle effect daarvan waarschijnlijk niet zichtbaar na één jaar simuleren.

Data-analyse (Colina Alonso 2020) had eerder aangetoond dat slib betrokken is bij drie belangrijke types van morfologische respons. Het eerste type heeft te maken met de grote afsluitingen (Zuiderzee, Lauwerszee) en de opvulling van afgesloten of overbodig gemaakte geulen. Deze veranderingen zijn goed bekend en zijn niet prioritair bestudeerd met het nieuwe model. Het tweede type heeft te maken met de kwelderwerken en de feedback daarvan op de komberging en de verslibbing van de zone nabij de vastelandskust. Daarover heeft het nieuwe model zeer relevante resultaten getoond. Het derde type heeft te maken met veranderingen op de wantijen, waarvan er sommige meer, andere minder slib in het sediment hebben gekregen. Deze veranderingen zijn in deze studie niet modelmatig onderzocht.

De studie van Colina Alonso (2020) heeft kwantitatief aangetoond dat slib aanzienlijk bijdraagt tot de totale netto sedimentatie in de Waddenzee. Vooral de slibrijke sedimenten (de hogere modus in de bimodale verdeling van slibgehalten) is hiervoor van belang. Het areaal met hoge slibgehalten betreft tientallen procenten van het totale intertidale areaal van de Waddenzee (waarbij rekening moet gehouden worden met het feit dat kwelders niet zijn bemonsterd in SIBES en het werkelijke percentage inclusief kwelders nog hoger is). Slibsedimenten zetten zich op andere plaatsen af dan zand, ook om die reden is het meenemen van slib in de morfologische evolutie op langere termijn van groot belang. De modelresultaten tonen hoe slibafzettingen bij de vastelandskust, deels als gevolg van kwelderwerken, ook een uitstralend 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 verder beïnvloeden.

De data-analyse van de MWTL gegevens over zwevende stof heeft wel aanzienlijke fluctuaties op de mesoschaal aangetoond, maar nauwelijks significante trends op lange termijn. Die 'lange' termijn is door de databeschikbaarheid beperkt tot ongeveer 30 jaar (sinds 1990). Het is, ondanks pogingen om uit historische bronnen meer informatie te verzamelen, ondoenlijk gebleken om betrouwbare gegevens te vinden over zwevend stof gehalte vóór 1990. We weten daarom niet goed of er sprake is van een toename of afname van zwevend stof in de Waddenzee in de recente decennia, vergeleken met veel vroeger (bv. voor afsluiten van de Zuiderzee, jaren 1950, jaren 1975-1990 op hoogtepunt van de eutrofiëring, etc.). Het is het overwegen waard te zoeken naar goede geologische proxys voor zwevend stof, maar voor zover wij weten zijn ook die niet beschikbaar. Ook kan dit modelmatig onderzocht worden door een simulatie met en zonder Zuiderzee te draaien. Hier zijn ook al eerste pogingen voor gedaan door Iwantoro et al. (ongepubliceerd), die hebben laten zien dat de afsluiting van de Zuiderzee tot een sterke toename in SPM in de westelijke Waddenzee hebben geleid.

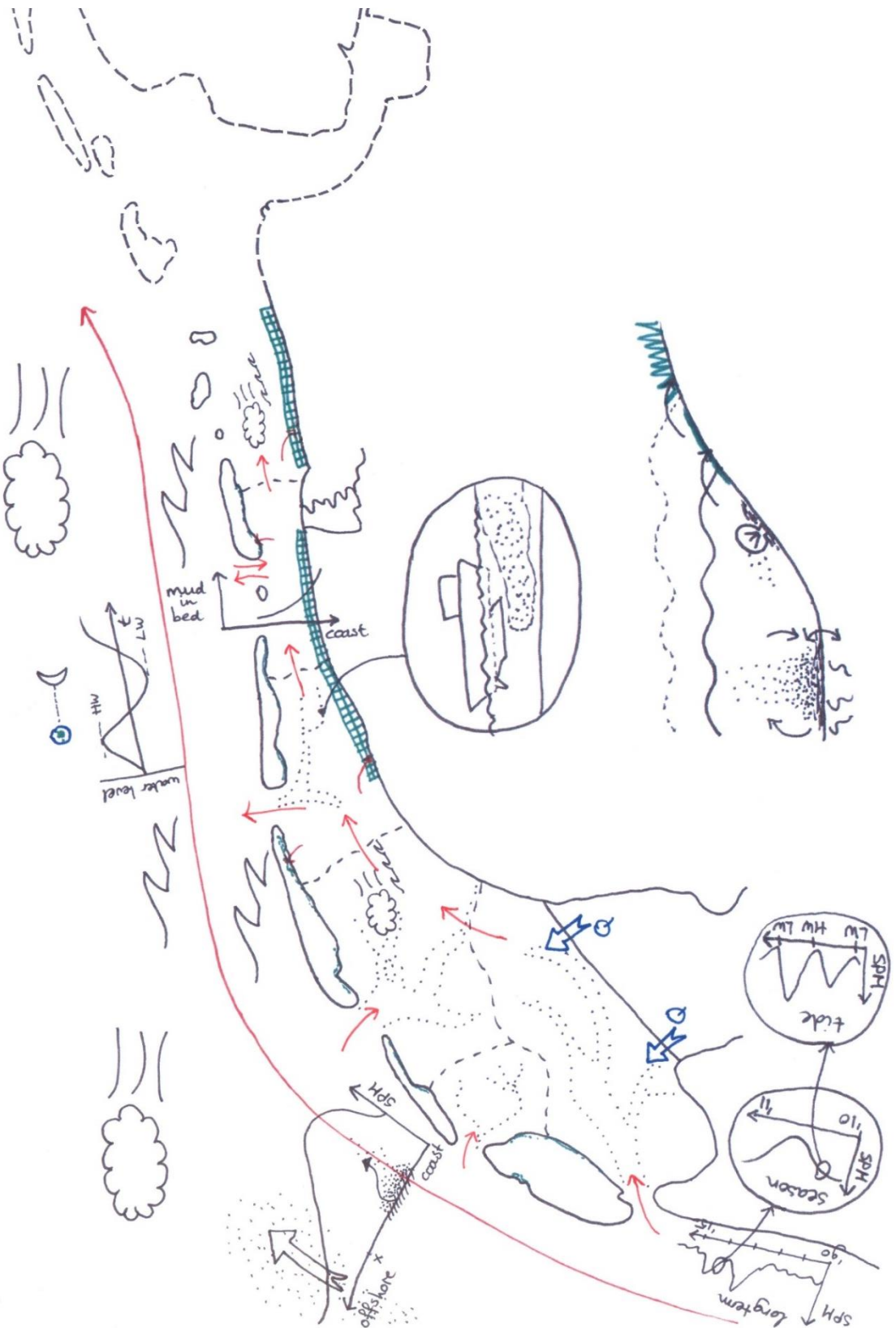
## 5.5 Grafische weergave van het conceptueel model

De elementen van het conceptuele model, zoals in dit document besproken, worden weergegeven in Figuur 5.2. Daarbij is de complexe problematiek van de Eems-Dollard, met een hyperturbide rivier die ook doorwerkt in de dynamiek van zwevend stof in het estuarium, niet weergegeven in deze schets. Wel geïllustreerd zijn transporten op grote schaal (bv. het langtransport van slib in de kustlangse rode pijl), op de schaal van bekkens (import en export door de zeegaten, transport over de wantijen) en op lokale schaal (bv. netto sedimentatie in de kwelders en in de kwelderwerken).

De zoetwaterafvoer (alleen aangegeven bij de Afsluitdijk maar ook elders van belang) en de estuariene circulatie zijn aangegeven als een belangrijke motor voor de uitwisseling van slib tussen Waddenzee en kustzone. Ook de kust-offshore gradiënt in zwevende stof is aangegeven. Zwevend stof neemt toe naar de kust; desondanks is er netto kustwaarts transport van slib.

Op de korte tijdschaal zien we de effecten van wind en golven, het getij en de springtij-doodtij cyclus als belangrijke motor van de fluctuaties in zwevend stof op de korte tijdschaal. Ook variaties op de seizoenale schaal en op de mesoschaal zijn aangegeven, als een resultaat van kleine variaties in de aandrijving en de dynamiek van belangrijke buffers in het systeem. Biologische processen, bijvoorbeeld biobouwers en microfytobenthos, zijn aangegeven als modificaties in het systeem langs de hoogtegradiënt.

Menselijke beïnvloeding van de slibdynamiek, tenslotte, is aangegeven voor enkele voorbeeldfactoren: effect van de kwelderwerken, baggeren en dumpen. Daarmee is de schets niet compleet en kan hij het achterliggende werk niet helemaal voorstellen. Toch geeft hij een beeld van de complexiteit en de samenhang van het systeem, en is hij daarmee een hulpmiddel om het denken over, en het beheersen van, de slibgerelateerde problematiek in de Waddenzee te bevorderen.



Figuur 5.2 Schets van de belangrijkste processen die de slibdynamiek in de Waddenzee beïnvloeden.

## 5.6 Model als instrument voor beleid en beheer

Het nieuwe numerieke slibmodel is in dit document vooral gebruikt om het conceptuele begrip van de slibdynamiek in de Waddenzee te verbeteren. Dat is niet alleen nuttig gebleken om een aantal openstaande inhoudelijke vragen te beantwoorden, het vormde ook een uitstekende toepassing om het model beter te kalibreren en te valideren. De nadruk is daarbij vooral gelegd op de abiotische processen van slibdynamiek. Alleen het microfytobenthos heeft aandacht gekregen als ecologisch proces, maar op dit moment wordt verdere ontwikkeling van dit modelaspect gelimiteerd door gebrek aan gegevens. Inmiddels is dit numerieke model, met enige lokale verfijning, reeds gebruikt om de problematiek van de vaarweg Holwerd-Ameland nader te bestuderen. Naar verwachting zullen vergelijkbare toepassingen voor lokale beheersproblematiek in de toekomst vaker voorkomen. De technische opbouw van het model in een flexibel rekenrooster laat toe om lokaal de resolutie te verfijnen, waardoor deze toepassingen beter worden gefaciliteerd. De fijnere kalibratie die met deze toepassingen gepaard gaat zal ook toelaten het model verder te verbeteren, wat de bruikbaarheid in de toekomst alleen maar zal bevorderen.

Een belangrijke toepassing op de schaal van de Waddenzee kan de verkenning van toekomstscenario's zijn, en de rol van slib daarin. Slib is een essentiële component in strategieën voor kustverdediging die uitgaan van een verbreding van de kustzone, bijvoorbeeld met dubbele dijken of wisselpolders. Een belangrijke vraag in deze concepten is of er voldoende slib is om de strategie op grote schaal toe te passen, en wat de uitstralende werking is op de Waddenzee. Het numerieke slibmodel is niet in staat om op lange termijn de implicaties voor morfologie dynamisch te berekenen, maar het kan wel een inschatting geven over uitstralingseffecten, zoals reeds aangetoond in Smits et al. (2020) en over vraagstukken van opschaling, bijvoorbeeld de vraag wanneer het kustlangse slibtransport beperkend wordt voor toepassingen in de Waddenzee.

Het belang van slib voor de morfologische evolutie op langere termijn, en zeker ook het belang van de grootschalige afsluitingen en ingrepen als 'kwelderwerken' daarin, kan helpen om de context van praktische problemen zoals het onderhoud van vaarwegen beter te begrijpen. Het kan ook aanleiding zijn om de doelstellingen van het beleid aan te passen.

Begrip van de tijdsdynamiek van SPM helpt om de tijdschaal vast te stellen waarop doelen van de Kaderrichtlijn Water worden gedefinieerd. Het langetermijngeheugen van het waddensysteem suggereert dat die op de tijdschaal van een decennium moet worden gesteld, en dat jaar-tot-jaar variaties inherent zijn aan de dynamiek van het systeem. Vragen naar het effect van slib op het ecologisch functioneren moeten ook op die tijdschaal worden benaderd. Het langetermijngeheugen 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 lokaal lang in het systeem blijft hangen, wat misschien reden is te zoeken naar alternatieve behandelingen. Dit vergt echter nadere en nauwkeurigere studie (zie ook de studie Vaargeul Holwerd-Ameland binnen dit KPP project, o.a. Grasmeyer en Van Weerdenburg, 2020).

Ook voor de verwachte effecten van versnelde zeespiegelstijging op de Waddenzee is de rol van slib in de morfologie van belang. Voorspellingen dienen niet alleen gebaseerd te zijn op zandtransport en -afzetting, maar moeten ook de rol van slib beter kwantificeren, zoals het vastleggen van slib in kwelders en op wadplaten. Er bestaan complexe terugkoppelingen tussen zeespiegelstijging, sedimentatie op de kwelders, ontwikkeling van de komberging en slibsedimentatie in geulen en platen voor de kwelders. Hoe deze terugkoppeling werkt voor de morfologie van de Waddenzee is onzeker, maar een belangrijke vraag voor de toekomst.

Wij verwachten dat in de toekomst een sterkere vraag zal ontstaan naar de toepassing van het model voor ecologisch beheer van de Waddenzee. Er is behoefte om een sterkere



koppeling te maken tussen het slibmodel en een ecologisch model van de Waddenzee op tenminste twee terreinen. Het eerste betreft de draagkracht en algemene productiviteit. De centrale vraag is of de productiviteit van de Waddenzee, uitgedrukt als primaire productie maar ook als voedsel voor trekvogels (de belangrijkste ecologische functie van de Waddenzee in internationaal perspectief) te lijden heeft onder beleid dat ongewild leidt tot verhoogde gehalten zwevende stof in de Waddenzee. In het bijzonder staat hierbij het beleid met betrekking tot het baggeren van vaarwegen, de ontwikkeling van havens en kustgebonden recreatie, en het visserijbeleid centraal. Ten tweede ligt er een vraag naar de indirecte effecten van de kwelderwerken, met name via het effect van kwelderwerken op de komberging van de kleinere geulen aan de landzijde van de Waddenzee. Het is onduidelijk welke positieve of negatieve ecologische effecten te verwachten zijn van een andere praktijk, bijvoorbeeld het wegnemen van slib uit het systeem voor nuttige toepassing elders. Gebruik van slib voor de kustverdediging, bijvoorbeeld in dubbele dijk systemen, kan een groot effect hebben op de slibdynamiek van de Waddenzee. Welk effect te verwachten is, en hoe dat door kan werken in de ecologie, is een belangrijke strategische vraag.

We vermelden eveneens de vragen die worden gesteld in het kader van PAGW, dat tot doel heeft middels inrichtings- en beheersmaatregelen de biodiversiteit en de Natura2000 bescherming van soorten te verbeteren. In de Waddenzee hebben zo goed als alle maatregelen een effect op slib, en via slib op de rest van het systeem. Ook hier is een goed gekalibreerd slibmodel van groot nut.

## 5.7 Aanbevelingen

### 5.7.1 Modeltoepassingen voor beheersvraagstukken

Wij bevelen aan het model te gebruiken, en tijdens het gebruik verder te kalibreren en valideren, voor de volgende beheersvragen die op korte, middellange en lange termijn spelen.

- Korte termijn: beheer van de baggerspecie uit het onderhoud van de vaargeulen. Te onderzoeken valt in welke mate het gestorte slib snel terugkeert naar de vaarweg, en welke verandering in stortstrategie de terugkeer (en daarmee het totale baggerbezwaar) kan beperken. Dit sluit aan bij lopend onderzoek naar de Vaargeul Holwerd-Ameland binnen dit overkoepelende KPP project.
- Middellange termijn: beheer van de kwelderwerken in relatie met de komberging en het openhouden van vaargeulen. Te onderzoeken valt of het vergroten van de komberging, bijvoorbeeld door het afgraven van kwelders of het creëren van binnendijkse slibvang, een verruimend effect kan hebben op vaargeulen en daardoor het baggerbezwaar structureel zou kunnen verminderen. Omgekeerd kan onderzocht worden welke invloed het baggeren en terugstorten heeft op de snelheid van opslibbing in de kwelders landwaarts van de vaargeul, en of hier optimalisatie mogelijk is.
- Lange termijn: onderzoek van het effect van zeespiegelstijging op de slibdynamiek in de Waddenzee. Ook kunnen in deze verkenningen mogelijke oplossingen als dubbele dijk, wisselpolders en andere oplossingen die van slib afhangen onderzocht worden. Het model kan niet gebruikt worden om de morfologische respons door te rekenen, maar er kunnen wel verschillende modelbodems in het model worden gezet om daarmee het effect op de slibdynamiek (SPM, slibsedimentatie) te onderzoeken.

### 5.7.2 Modeluitbreidingen richting ecologisch modelleren

Modeltechnisch vereisen de toepassingen van het model voor ecologische vraagstukken een uitbreiding van het model richting ecologische modellering, specifiek op drie terreinen. Indien de analyse van de microfytobenthosbedekking in relatie tot SPM correlatie over een langere periode vertoont (werk in uitvoering, zie paragraaf 4.1), verdient het aanbeveling de

microfytobenthos-module verder te ontwikkelen tot een module voor generieke biologische invloed op slibresuspensie. Ten tweede verdient het aanbeveling de parametrisatie van kwelders in het model te onderzoeken. In de oostelijke Waddenzee dragen kwelders tot wel 50% bij aan slibsedimentatie over de lange termijn. Door kwelders op te nemen in het model zal deze verdeling tussen kwelder en bekken ook beter gereproduceerd worden. Ten derde zal een koppeling tussen waterkwaliteitsmodellering en slibdynamiek moeten worden gerealiseerd. Alle drie de modeluitbreidingen kunnen gebaseerd worden op bestaande modelformuleringen, zoals die voor microfytobenthos binnen het huidige project zijn uitgevoerd (Smits et al. 2020), voor kwelders binnen parallelle projecten (bijvoorbeeld Willemsen et al., in prep), en voor waterkwaliteit binnen het bestaande modelinstrumentarium. Toch zal de koppeling met het slibmodel een grote inspanning voor kalibratie en validatie vereisen, omdat in een gekoppeld model de dubbele onzekerheid over de slibdynamiek en over de ecologische dynamiek speelt.

### 5.7.3 Metingen en data-beschikbaarheid

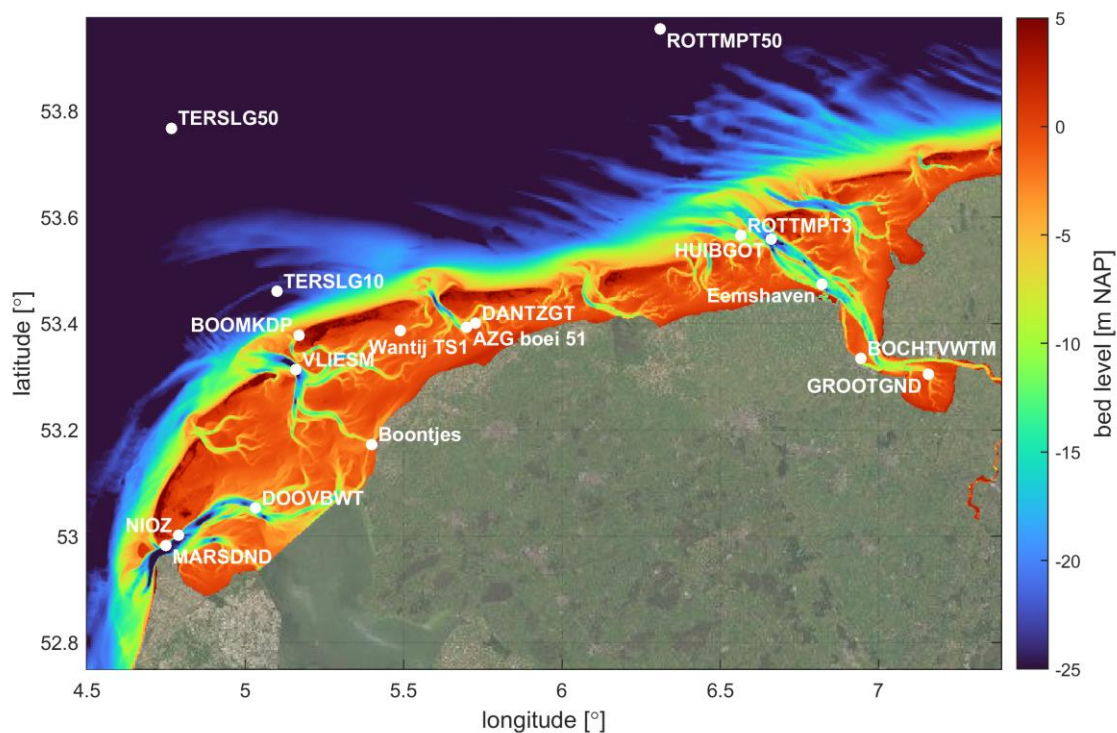
Wij bevelen aan om een aantal observaties uit te voeren die kunnen helpen om een beter inzicht te verwerven in de dynamiek van slib in de Noordzee en Waddenzee:

- routinematig niet alleen zwevend stof meten aan de oppervlakte, maar ook verticale profielen in samenhang met CTD opnames maken. Dit zou een relatief beperkte uitbreiding van MWTL kunnen vormen.
- een aantal permanente meetstations installeren in Noordzee en Waddenzee die over langere periodes de verticale verdeling van zwevende stof monitoren, en in verband brengen met stroomsnelheden en golfactiviteit.
- In een aantal meetpunten van het SIBES programma met hogere temporele resolutie (maandelijks) het slibgehalte van het sediment opvolgen.

# 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.
- 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.
- De Glopper, R.J. (1967). *Over de bodemgesteldheid van het Waddengebied*. Vol. 43 in: *Rapporten en mededelingen inzake de droogmaking, ontginning en sociaal-economische opbouw van de IJsselmeerpolders*. Tjeenk Willink uitgeverij. Zwolle.
- 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.
- Iwantoro, A., van Kessel, T. and van der Vegt, M. (unpublished). The effect of Afsluitdijk construction on salinity and fine sediment dynamics in the Western Wadden Sea: a modelling study.
- Lely, C. (1892). *Resultaten van het Technisch Onderzoek 1886-1892*. E.J. Brill, Leiden.
- Smits, B., Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Cleveringa, J., Dankers, P. (2020). *Analyse fysische processen Waddenzee. Inzet numeriek model voor analyse systeemwerking en gevoeligheidsscenario's*. Deltares rapport 11205229-002-ZKS-0003.
- De Vries, B., P. Dankers, J. Vroom (2018). *Sedimentconcentraties en -samenstelling: uitwisseling water en bodem*. HaskoningDHV rapport BG2802WATRP1807230758.
- Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B. en Herman, P. (2020). *Modellering slibdynamiek voor de Waddenzee. Kalibratie voor KRW slib*. Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0001.
- Zwarts, L. (2004). *Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee*. Rapport RIZA/2004.028.

# A Observatiepunten



Figuur 5.2 Locaties van observatiepunten. De bodemligging is aangegeven in kleur. GROOTGND = Grote Gat Noord; DOOVBWT = Doove Balg west; AZG boei 51 = Amelander Zeegat boei 51.

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](http://www.deltares.nl)