

## Rapport

# Slib in de Waddenzee

Een analyse en verklaring van de langjarige fluctuaties van sedimentconcentraties in water en bodem i.h.k.v. project KRW slib

Klant: RWS

Referentie: BG2802WATRP1812170918

Status: 1.0/Finale versie

Datum: 17 december 2018

**HASKONINGDHV NEDERLAND B.V.**

Jonkerbosplein 52  
6534 AB NIJMEGEN  
Water  
Trade register number: 56515154

+31 88 348 70 00 **T**  
+31 24 323 93 46 **F**  
info@rhdhv.com **E**  
royalhaskoningdhv.com **W**

Titel document: Slib in de Waddenzee

Ondertitel: Een analyse en verklaring van de langjarige fluctuaties van sedimentconcentraties in water en bodem i.h.k.v. project KRW slib  
Referentie: BG2802WATRP1812170918  
Status: 1.0/Finale versie  
Datum: 17 december 2018  
Projectnaam: KRW Slib  
Projectnummer: BG2802  
Auteur(s): Bente de Vries, Petra Dankers, Julia Vroom

Gecontroleerd door: \_\_\_\_\_  
Petra Dankers

Datum/Initialen: 15-11-18 PD 

Goedgekeurd door: \_\_\_\_\_

Datum/Initialen: \_\_\_\_\_

Classificatie

Projectgerelateerd



## Disclaimer

*No part of these specifications/printed matter may be reproduced and/or published by print, photocopy, microfilm or by any other means, without the prior written permission of HaskoningDHV Nederland B.V.; nor may they be used, without such permission, for any purposes other than that for which they were produced. HaskoningDHV Nederland B.V. accepts no responsibility or liability for these specifications/printed matter to any party other than the persons by whom it was commissioned and as concluded under that Appointment. The integrated QHSE management system of HaskoningDHV Nederland B.V. has been certified in accordance with ISO 9001:2015, ISO 14001:2015 and OHSAS 18001:2007.*

## Inhoud

<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Methodiek lange termijn trend slibconcentraties in de waterkolom</b>	<b>2</b>
2.1	Data	2
2.2	Analysestappen MWTL-data	4
<b>3</b>	<b>Trends in zwevendstofgehalte</b>	<b>6</b>
3.1	Globale trend in de Waddenzee	6
3.2	Vergelijking waarnemingen binnen de komgebieden	7
3.3	Vergelijking waarnemingen tussen de komgebieden	9
3.4	Vergelijking waarnemingen Waddenzee en de Noordzee	10
<b>4</b>	<b>Verklaring van trends</b>	<b>10</b>
4.1	Opstellen hypothesen	10
4.2	Veranderingen slibconcentraties in de Noordzee	12
4.3	Verandering slibvolume in de kwelders	14
4.4	Verandering slibgehalte in de bodem van de Waddenzee	20
<b>5</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen voor beleid en beheer</b>	<b>37</b>
5.1	Conclusies	37
5.2	Aanbevelingen voor beleid en beheer	39
5.3	Aanbevelingen voor monitoring en onderzoek.	39
<b>6</b>	<b>Bronnen</b>	<b>41</b>

## Bijlagen

A1	MWTL meetlocaties gebruikt voor analyse lange termijn trends slibconcentratie in de waterkolom
A2	Trend in zwevend stofgehalte per meetlocatie
A2.1	Meetlocaties in Marsdiep
A2.2	Meetlocaties in het Vlie
A2.3	Meetlocaties kust Terschelling
A2.4	Meetlocatie Borndiep
A2.5	Meetlocaties Zoutkamperlaag
A2.6	Meetlocatie Lauwers
A2.7	Meetlocaties Eems-Dollard
A3	SIBES

Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee zijn 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 behevraagstukken op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, natuur en overige gebruiksfuncties. Hiertoe wordt afstemming gezocht met beleidsmakers, beheerders, adviseurs, wetenschappers en gebruikers van het wad.

In het kader van het programma worden ter bevordering van de onderlinge uitwisseling en borging van de morfologische kennis ook onderzoeksopdrachten uitgevoerd vanuit een specifiek project. 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 project KRW-slib is een samenwerkingsproject tussen Royal HaskoningDHV, Arcadis en Deltares.

## Samenvatting

Voor de planperiode 2016-2021 van de Kaderrichtlijn Water (KRW) voor de Waddenzee wordt onderzoek gedaan naar de slibhuishouding. Slib is een belangrijke factor als wordt gekeken naar het ecologische functioneren van de Waddenzee en de KRW- onderdelen waterkwaliteit en habitats. In het kader van KRW-slib wordt onderzoek gedaan naar de variatie in sedimentconcentraties in de Waddenzee.

De sedimentconcentratie in de Waddenzee is een gevolg van de complexe interactie tussen verschillende processen en activiteiten op verschillende tijd- en ruimteschalen. In voorliggend rapport is geprobeerd deze interacties zichtbaar te krijgen. Hierbij is in eerste instantie gebruik gemaakt van de beschikbare MWTL-monitoringsgegevens van sedimentconcentratie in het water. Vervolgens is geprobeerd om deze te verklaren aan de hand van andere beschikbare gegevens, zoals SIBES-data, meteorologische data en ecologische data, tezamen met de kennis zoals die beschikbaar is bij Deltares, RWS, Arcadis en Royal HaskoningDHV. Er is voor deze studie geen nieuwe data verzameld. In voorliggende studie zijn de meest recente MWTL-gegevens opgenomen en is de SIBES data gebruikt. Deze laatste was eerder nog niet beschikbaar. Daarnaast onderscheidt deze studie zich door de analysemethode waarbij op hoofdlijnen naar de data wordt gekeken door de data te log-transformeren en anomalieën (afwijking t.o.v. het langjarig gemiddelde) te bepalen. Hierdoor kunnen gemakkelijker patronen worden herkend.

Er is gebruik gemaakt van MWTL-gegevens vanaf 1990. In de periode voor 1990 zijn andere methodes gebruikt waardoor deze data niet te vergelijken is. Omdat pas vanaf 1990 is gekeken zijn veranderingen t.g.v. grootschalige afsluitingen zoals die van de Zuiderzee en de Lauwerszee, niet meegenomen.

Opvallend in de analyse van de MWTL-gegevens zijn de langere periodes met hogere en/of lagere sedimentconcentraties in het water t.o.v. het langjarig gemiddelde. Dit is duidelijk te zien als de data wordt log-getransformeerd en de anomalie vervolgens wordt bepaald. Blijkbaar zijn er grootschalige processen die zorgen dat het systeem als het ware wordt opgeladen met sediment waardoor er langere tijd gemiddeld hogere concentraties aanwezig zijn. Dit speelt bijvoorbeeld in de periode 2006 – 2011 waar de gemiddelde sedimentconcentratie in de gehele Waddenzee hoger is dan in de periode daarvoor. Na 2011 neemt deze hogere gemiddelde concentratie weer af.

Verder valt op dat de sedimentconcentraties in de Noordzee significant lager zijn dan in de Waddenzee, maar dat de orde grootte van de relatieve schommelingen in concentraties vergelijkbaar is met die in de Waddenzee. Tevens loopt de verhoging van de sedimentconcentraties in de Waddenzee niet synchroon met die in de Noordzee, ook volgt hij niet op de Noordzee. Het is juist zo dat de langdurig hogere gemiddelde concentratie in de Waddenzee eerder aanwezig is dan de hoge concentratie in de Noordzee.

Voor het verklaren van de variaties in sedimentconcentratie is er gewerkt aan de hand van een aantal hypothesen. Deze zijn stap voor stap benoemd en geanalyseerd in het rapport:

- Hypothese 1: De concentratie van zwevend stof in de Waddenzee verandert door een verandering van slibconcentratie in de Noordzee (t.g.v. 2<sup>de</sup> Maasvlakte, toename in storm-/golfintensiteit of periodes met hogere sedimentaanvoer vanuit de rivieren).
- Hypothese 2: De concentratie van zwevend stof in de Waddenzee verandert ten gevolge van veranderingen in volumes aan slib in de kwelders (t.g.v. veranderingen aan kwelderonderhoud of getijkarakteristieken en golfintensiteit welke tot erosie/aanwas leiden).
- Hypothese 3: De concentratie van zwevend stof in de Waddenzee verandert ten gevolge van veranderingen in slibgehalte van de bodem van de Waddenzee (t.g.v. golfintensiteit, baggerwerkzaamheden, morfologische veranderingen, biomassa filtervoeders, bioturbatie-intensiteit).

In grote lijnen kan worden geconcludeerd dat de vele aspecten die worden genoemd in deze studie mogelijk allemaal bijdragen (in kleinere of grotere mate) maar dat voor geen enkel aspect hard geconcludeerd kan worden dat er een direct verband is met de sedimentconcentratie. Voor een deel komt dit omdat Waddenzee breed wordt gekeken naar de grootschalige veranderingen in sedimentconcentraties (als een gevolg van de beschikbare data). Het is lastig om dit te koppelen aan processen waarvan verwacht wordt dat ze vooral op kleinere schaal effect zullen hebben (bijvoorbeeld baggerwerkzaamheden, veranderingen in kwelderbeheer). Van grootschalige processen, zoals meteorologische veranderingen, wordt wel verwacht dat dit terug is te zien in de sedimentconcentraties. Ook hiervoor is echter gebleken dat er geen duidelijke relaties te vinden zijn. Waarschijnlijk omdat alle verschillende processen een bepaalde mate van invloed hebben en dat juist die interactie van processen de uiteindelijke sedimentconcentratie in de Waddenzee bepaalt.

## 1 Inleiding

Voor de planperiode 2016-2021 van de Kaderrichtlijn Water (KRW) voor de Waddenzee wordt onderzoek gedaan naar de slibhuishouding. Slib is een belangrijke factor als wordt gekeken naar het ecologische functioneren van de Waddenzee en de KRW- onderdelen waterkwaliteit en habitatten. In het kader van KRW-slib wordt onderzoek gedaan naar de variatie in sedimentconcentraties in de Waddenzee. Het doel van dit onderzoek is het beter begrijpen van de fluctuaties in slibconcentratie zodat de beheerstrategie van het slib in de Waddenzee kan worden geoptimaliseerd en het ecosysteem kan worden beschermd tegen fluctuaties in slibtoevoer als gevolg van menselijke activiteiten en natuurlijke variatie buiten of binnen de Waddenzee. Het KRW-slib onderzoek is opgedeeld in verschillende deelonderwerpen, zoals beschreven in het projectplan van KRW-slib (06-06-2018). Het voorliggende rapport bevat resultaten van het tweede deelonderwerp uit dit projectplan, met als titel 'sedimentconcentraties en samenstelling: uitwisseling water en bodem'.

Voor dit onderzoek zijn historische veranderingen in de slibgehalten in de waterkolom en bodem in de Wadden over tientallen jaren onderzocht. Hierbij is gebruik gemaakt van bestaande informatie en data. Verklaringen voor deze veranderingen zijn gezocht waarbij relaties zijn gelegd met de natuurlijke dynamiek en menselijke ingrepen. Tevens is gekeken naar de toekomstige autonome veranderingen en welke gevolgen deze mogelijk zullen hebben voor de slibgehalten in de waterkolom en bodem. Ten slotte zijn de gevolgen voor beleid en beheer toegelicht.

## 2 Methodiek lange termijn trend slibconcentraties in de waterkolom

Om de veranderingen in de sedimentconcentraties in de waterkolom te kunnen bepalen en te relateren aan forceringen is de data van de MWTL meetlocaties in de Waddenzee geanalyseerd. Op basis van de gevonden trends zijn hypothesen opgesteld die stuk voor stuk zijn getest met aanvullende data.

### 2.1 Data

De analyse van de trend in slibconcentraties is gebaseerd op MWTL-metingen van Rijkswaterstaat van (totaal) zwevend stofconcentraties. De metingen worden gedaan op 1,5 m onder het wateroppervlak en vinden steeds in dezelfde fase van het getij plaats. Hoewel slibconcentraties niet exact gelijk zijn aan het zwevend stofgehalte is voor dit rapport aangenomen dat ze hetzelfde zijn.

Data van de (totaal) zwevend stof concentratie in de waterkolom in de Waddenzee is gedownload uit de MWTL database van Rijkswaterstaat in het OpenEarth systeem, dat wordt beheerd door Deltares (url: <http://opendap.deltares.nl/thredds/dodsC/opendap/rijkswaterstaat/waterbase/>). Data is hierin opgeslagen als netcdf bestanden voor een groot aantal meetlocaties. Voor de analyse zijn alleen de meetreeksen sinds 1990 gebruikt, omdat ongeveer vanaf deze tijd (om precies te zijn 1988) de meet-/kalibratiemethode stabiel is. Meetlocaties met meetreeksen korter dan 16 jaar zijn niet meegenomen, omdat hierbij lastig onderscheid kan worden gemaakt tussen tijdelijke en langjarige trends. De meetlocatie Boomkensdiep, waar data beschikbaar is over de afgelopen 10 jaar, vormt een uitzondering en is meegenomen vanwege de interessante ligging tussen nabije meetstations in het zeegat van Terschelling en verderop in de Noordzee. Voor iedere meetlocatie die is meegenomen in de analyse zijn minstens 9 metingen per jaar beschikbaar met uitzondering van de meetlocatie Bocht van Watum in de periode 1996-2005. Deze meetlocatie is toch meegenomen vanwege de lange meetreeks en het feit dat er wel voldoende metingen waren in de periodes voor 1996 en na 2005. Naast de data uit de Waddenzee is ook data van de Noordwijkmeetlocaties op 2 en 10 km uit de kust en van de Terschellingmeetlocaties 4 en 10 km uit de kust gebruikt om de concentraties tussen de Noordzee en de Waddenzee te kunnen vergelijken. Een overzicht van de gebruikte meetlocaties is gegeven in Figuur 1.

Het is belangrijk te beseffen dat er per jaar slechts 10 – 20 metingen beschikbaar zijn per meetlocatie en dat dit gevolgen heeft voor de betrouwbaarheid van de analyses. Er kan met deze data niet goed naar veranderingen tussen specifieke jaren worden gekeken. Wel kan er naar algemene trends worden gekeken waarbij verschillende jaren achterelkaar eenzelfde soort ontwikkeling laten zien.





*Figuur 1 Locatie van de meetlocaties in de Waddenzee gebruikt voor de analyse van het slibgehalte in de waterkolom (hiernaast is ook gebruik gemaakt van de meetlocatie NOORDWK 2 en 10 die op 2 en 10 km afstand van de kust bij Noordwijk liggen). NB in 2011 is de meetlocatie van BOCHTVWTM een kleine 3 km naar het noordoosten verschoven. Zie Appendix A1 voor een overzicht met de volledige namen van de meetlocaties incl. de lengte van de meetreeks. Achtergrond: OpenTopo.*

## 2.2 Analysestappen MWTL-data

De data worden op verschillende manieren gepresenteerd, afhankelijk van welke vraag er beantwoord dient te worden. Er zijn tijdreeks figuren gemaakt van:

- Gemeten waarden;
- Jaargemiddelden;
- Relatieve afwijking (relatieve anomalie) van lopend gemiddelde op het langjarig gemiddelde;
- Jaargemiddelden en relatieve afwijking t.o.v. het langjarig gemiddelde per (kom)gebied;
- Jaargemiddelden gemiddeld per (kombergings)gebied.

### Jaargemiddelde waardes

Als basis zijn er altijd jaargemiddelde waardes gebruikt. Hiervoor zijn eerst de metingen per maand (over het algemeen 1-2 metingen) gemiddeld en vervolgens is een jaargemiddelde berekend. Dit voorkomt een zwaardere weging van maanden met meerdere metingen. Jaargemiddelde minima en maxima zijn berekend op basis van de gemiddelden per maand.

De berekening van jaargemiddelden is uitgevoerd over de periode jan-dec wat zou kunnen leiden tot een andere positie van pieken in de slibconcentratie in de tijd in vergelijking met wanneer een lopend gemiddelde zou zijn berekend. Slibconcentraties zijn over het algemeen het hoogst in de winter en het laagst in de zomer. Indien piekconcentraties in jaar x voorkomen in januari én in december zou het kunnen voorkomen dat de slibconcentratie in jaar x wordt overschat (doordat 2 pieken in de slibconcentratie worden meegerekend) en in het jaar ervoor en erna wordt onderschat (doordat pieken net niet binnen deze jaren vallen). Vergelijking met grafieken met jaargemiddelden door de tijd laten echter zien dat het verschil in berekening niet tot significante verschillen leidt in slibconcentraties en de timing van het voorkomen van hoge en lage slibconcentraties.

### Variatie t.o.v. het gemiddelde

Om de toe- en afname in slibconcentratie in kaart brengen zijn er grafieken gemaakt met de anomalieën van de logaritmische zwevend stofgehalten. In deze grafieken is de afwijking van het (lopend) jaargemiddelde weergegeven ten opzichte van het gemiddeld zwevend stofgehalte over de gehele meetperiode sinds 1990. De oorspronkelijke data zijn daarvoor eerst log-getransformeerd (natuurlijke logaritme) i.v.m. de zeer scheve verdeling van de waarden. Daarna zijn maandgemiddelden berekend om zwaardere weging van observaties die vlak na elkaar zijn gedaan in de tijd te voorkomen. Op basis van de maandgemiddelden is een langjarig gemiddelde berekend over alle beschikbare data sinds 1990. Verder is er een lopend gemiddelde berekend met een lengte van 13 maanden. Hierbij zijn ontbrekende data genegeerd, met andere woorden, als er minder dan 13 maanden aan data beschikbaar was binnen een bepaald tijdframe dan is het gemiddelde alleen op de overige beschikbare maanden gebaseerd. Het langjarige gemiddelde is afgetrokken van het lopend gemiddelde. Door de exponent van deze datareeks te plotten zijn datapunten die op de y-as op 2/-2 liggen 2x zo groot/klein als het langjarig gemiddelde.

### Trends in slibconcentratie

Alle jaarlijkse gemiddelden zijn in één plot weergegeven om deze onderling te vergelijken. Daarnaast zijn er figuren gemaakt van de jaarlijkse gemiddelden en de anomalie van alle meetlocaties binnen één komgebied om te kijken of deze vergelijkbare trends vertonen. Wanneer meerdere meetlocaties binnen één komgebied gelijke trends vertoonden zijn deze meetlocaties bij elkaar genomen en is daarvan een jaarlijks gemiddelde bepaald.

De meetlocaties bij Noordwijk en de kust van Terschelling zijn onderling vergeleken en ze zijn vergeleken met de meetlocaties in de Waddenzee. Dit is gedaan om te kijken of de Noordzee meetlocaties een gezamenlijke trend vertonen en in hoeverre deze afwijkt van die in de Waddenzee.

### Hypothesevorming

Hypotheses zijn opgesteld om de gevonden trends in de slibconcentratie te verklaren. Deze hypothesen zijn vervolgens getest aan de hand van weerscondities/hydrodynamiek, ecologische ontwikkelingen en menselijke ingrepen. Deze informatie is als volgt verzameld:

- Data van significante golfhoogtes en de golfrichting is gebruikt van een meetlocatie op de Noordzee (15 km uit de kust bij het Eierlandse Gat) als indicatie van de weerscondities/het voorkomen van stormen. De jaargemiddelden hiervan zijn berekend met dezelfde methode als bij het jaargemiddelde van de slibconcentratie. Daarnaast zijn er ook jaargemiddelden berekend nadat de data tot de 3<sup>e</sup> macht is verheven om rekening te houden met het relatief grote effect van stormen op het sedimenttransport.
- Ontwikkelingen in de kwelders zijn opgezocht in literatuur. Op basis van gegevens van kwelderoppervlak en aanslibbing uit het WOt rapport van Van Duin et al. (2016) zijn afschattingen gemaakt van de hoeveelheid slib in de kwelders.
- Ontwikkelingen in filterfeeders, Wadpieren en baggeren en storten zijn opgezocht in literatuur.
- Data m.b.t. sedimentconcentraties in de bodem is afkomstig uit de literatuur en uit de door het NIOZ verzamelde SIBES data. Deze data is door het NIOZ aan Deltares ter beschikking gesteld.

Per hypothese is aangegeven in hoeverre met bovenstaande aspecten de trends in slibconcentratie verklaard kunnen worden.

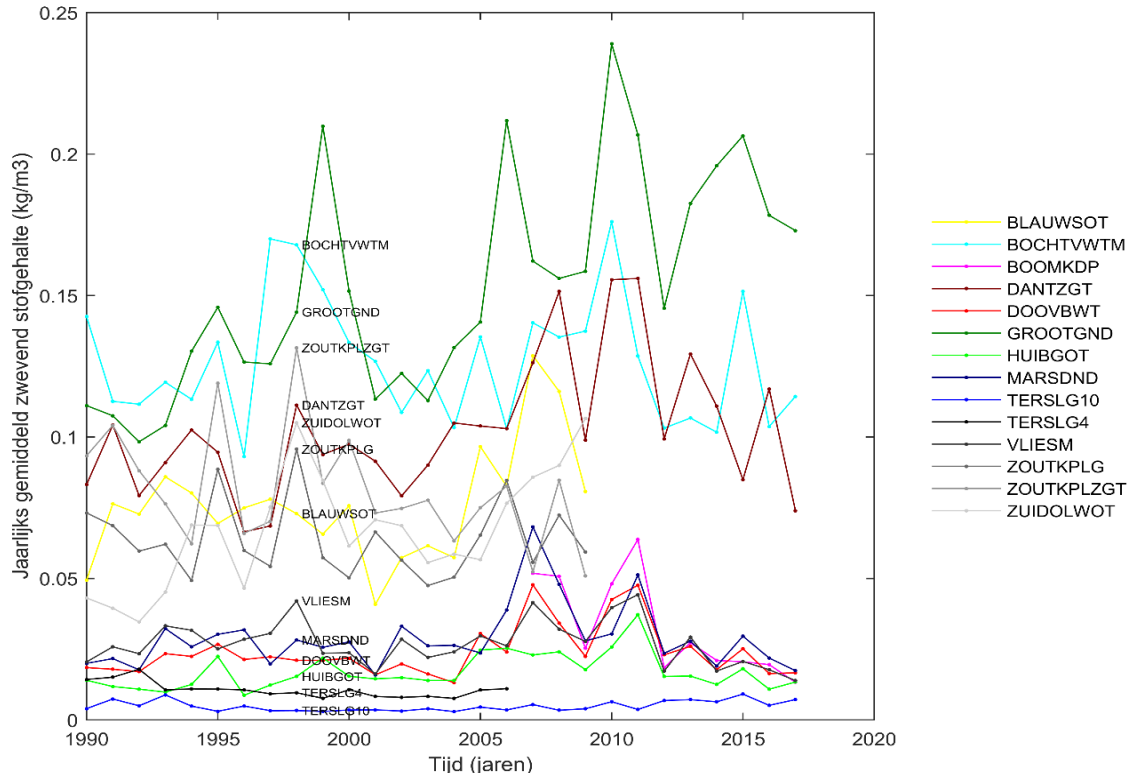
### 3 Trends in zwevendstofgehalte

#### 3.1 Globale trend in de Waddenzee

Voor het bepalen van de globale trend in de Waddenzee wordt er gekeken naar het jaarlijks gemiddelde zwevend stofgehalte van alle meetlocaties zoals weergegeven in Figuur 2. Tevens zijn in Appendix A2 per meetlocatie grafieken te zien met het langjarige zwevend-stofgehalte, gemiddelde zwevend-stofgehalte per jaar en de relatieve anomalie.

Uit figuur 2 blijkt dat over het algemeen de slibconcentratie stijgt tussen 2002/2003 en 2011 waarna de slibconcentratie een dalende trend laat zien. Figuren met relatieve anomalieën in Appendix 2 laten zien dat tussen 1990 en 2006 de slibconcentraties schommelen rondom een min of meer constant niveau. Er is dus in die periode een beperkte afwijking naar boven en naar beneden rond het langjarig gemiddelde. In de periode 2006 – 2011 ligt de anomalie echter continu hoger. Dit betekent dat de jaarlijks gemiddelde slibconcentraties in die periode continu hoger liggen dan het langjarig gemiddelde. Dit is te wijten aan een gemiddeld hogere concentraties gedurende het hele jaar en niet aan individuele pieken.

Er zijn een aantal meetlocaties binnen de Waddenzee die afwijken van de algemene trend. Bij Blauwe Slenk Oost (BLAUWSOT) lijken de slibconcentraties al vanaf 2007 te dalen (Figuur 2). Er zijn echter geen data na 2010 beschikbaar, waardoor niet zeker is of deze dalende trend zich voortzet. Bij Zoutkamperlaag (ZOUTKPLG) schommelt het slibgehalte rondom een relatief constant gemiddelde en laat geen duidelijke toename zien vanaf 2002. Bij het in hetzelfde komgebied gelegen Zoutkamperlaag Zeegat nemen de slibconcentraties af sinds 1998.



Figuur 2 Jaarlijks gemiddeld zwevend stofgehalte gebaseerd op maandgemiddelden voor de Waddenzee meetlocaties. Volledige namen van de meetlocaties staan in Appendix A1.

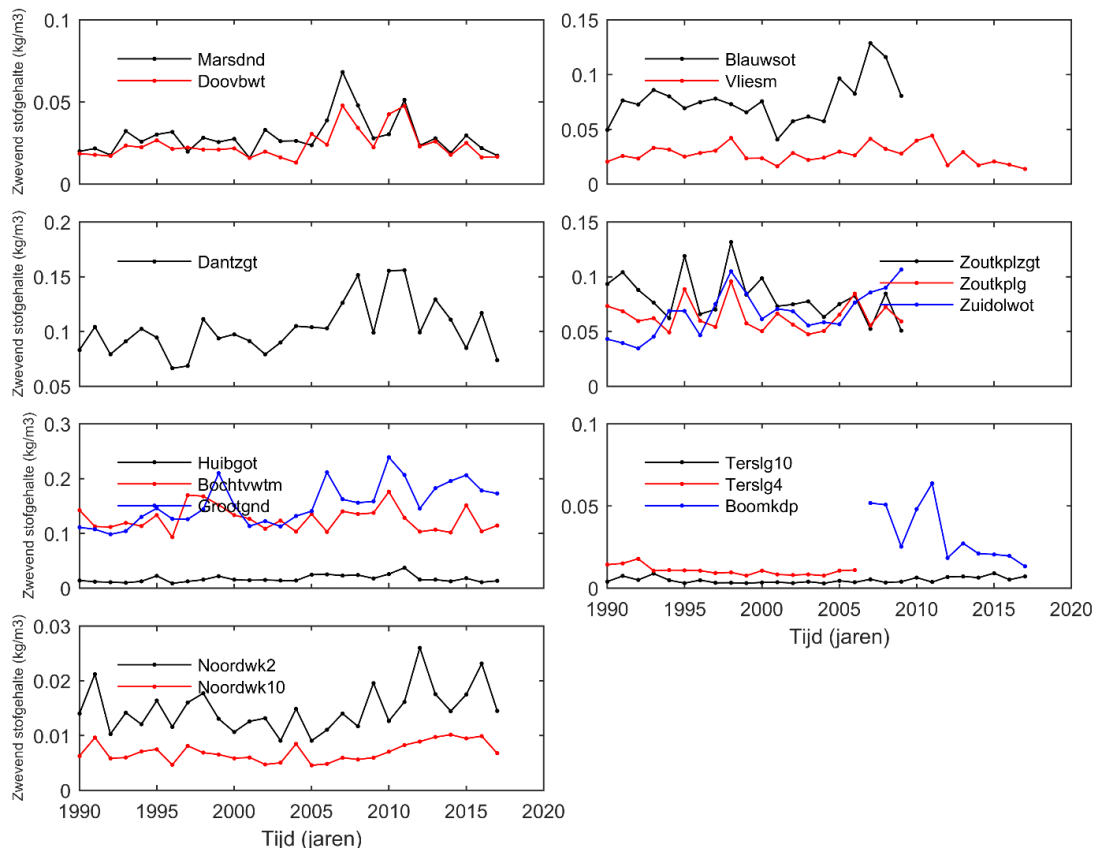
### 3.2 Vergelijking waarnemingen binnen de komgebieden

Het slibgehalte op verschillende locaties binnen één komgebied vertoont over het algemeen een vergelijkbare trend waarbij pieken en dalen in het jaargemiddelde slibgehalte vaak samenvallen (Figuur 3). Ook de variatie t.o.v. het langjarige gemiddelde is grotendeels van dezelfde orde grootte (Figuur 4). De beelden in Figuur 4 kunnen het best gebruikt worden om algemene trends te bepalen omdat in deze figuur de waarden een logtransformatie hebben gehad en de afwijking t.o.v. een langjarig gemiddelde laten zien. De beelden in Figuur 3 geven meer zicht op het stijgen en dalen van de gemiddelde slibconcentratie over meerdere jaren. Een stijgende trend betekent niet per sé dat de gemiddelde waarden ook hoger liggen dan het langjarig gemiddelde.

In het Marsdiep schommelen de slibgehalten bij beide meetlocaties (MARSDND en DOOVBWT) rondom een constant gemiddelde tussen 1990 en 2003 waarna de slibconcentratie hogere concentraties laat zien in de periode 2005 – 2012 (Figuur 4).

In het Vlie vertonen de slibconcentraties bij de twee meetlocaties (BLAUWSOT en VLIESM) eenzelfde patroon, maar hebben verschillende waarden. Bij de Blauwe Slenk Oost, meer achterin het bekken, zijn de concentraties hoger. Het slibgehalte schommelt rondom een relatief constant gemiddelde maar ook hier liggen de gemiddelde sedimentconcentraties wat hoger in de periode van ongeveer 2005 – 2012/13.

In het Borndiep is maar één meetlocatie. Hier is duidelijk een onderscheid te maken tussen de periode voor 2005, met gemiddelde concentraties net onder of rond het langjarig gemiddelde, en de periode van ongeveer 2005 tot 2012/13 met gemiddelde concentraties vooral ruim boven het langjarig gemiddelde. De laatste jaren is de afwijking t.o.v. het langjarig gemiddelde minder groot dan in de periode daarvoor en zit de variatie om het langjarig gemiddelde heen.



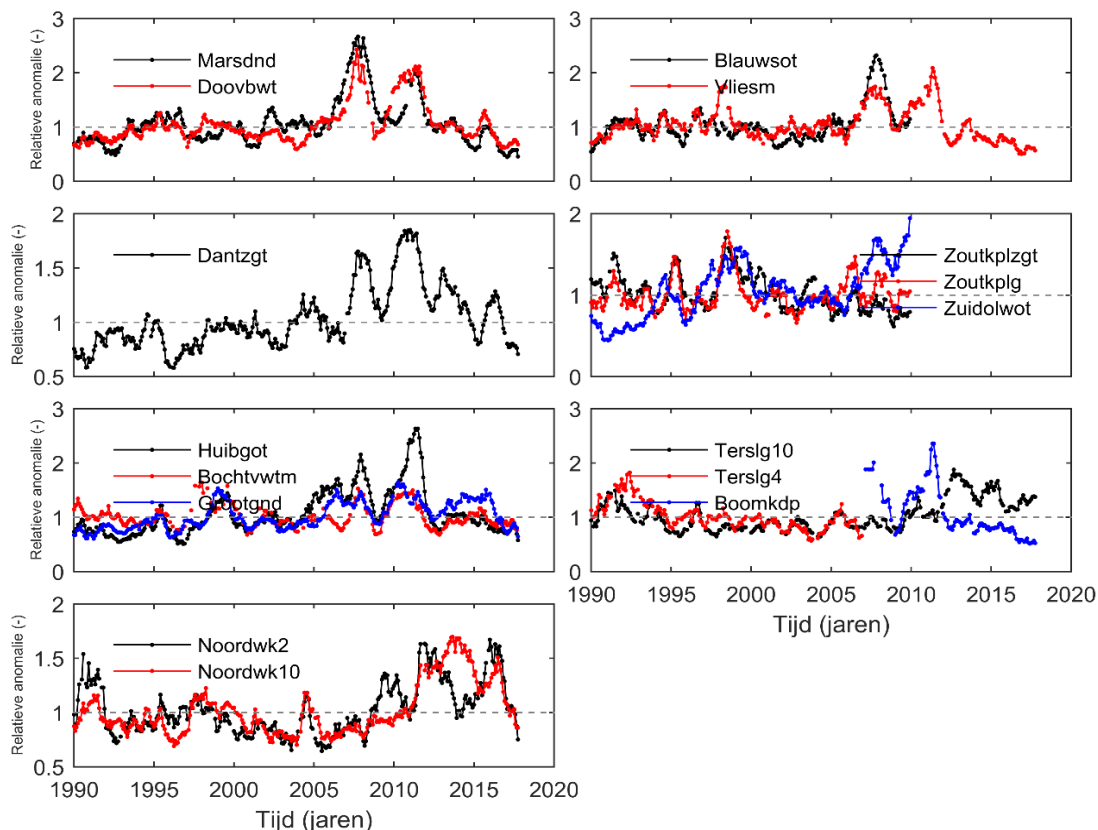
Figuur 3 Jaarlijks gemiddeld zwevend stofgehalte gebaseerd op maandgemiddelden voor de Waddenzee en Noordzee meetlocaties per (kom)gebied. Volledige namen van de meetlocaties staan in Appendix A1.

De slibconcentraties bij de twee meetlocaties bij het komgebied van de Zoutkamperlaag (ZOUTKPL en ZOUTKPLZGT) en bij de meetlocatie in het Lauwers (ZUIDOLWOT) hebben vergelijkbare slibconcentraties en tonen pieken in slibconcentratie op hetzelfde moment. De lange termijn trend verschilt voor de meetlocaties in het komgebied van de Zoutkamperlaag en het Lauwers: bij de meetlocaties ZOUTKPL en ZOUTKPLZGT schommelt het slibgehalte rondom een constant gemiddelde, terwijl bij ZOUTOLWOT de concentraties langzaam lijken toe te nemen over de periode 1990-2009.

Het slibgehalte bij de meetlocaties bij de Eems-Dollard (HUIBGOT, BOCHTVWTM en GROOTGTND) heeft dezelfde trend relatief gezien. De slibconcentraties bij HUIBGOT zijn echter veel lager dan bij de andere 2 meetlocaties die veel verder binnen het estuarium liggen. In 2006 valt op dat de slibconcentratie een klein dal vertoont bij BOCHTVWTM, terwijl er een kleine piek is bij GROOTGTND.

In de figuren met relatieve anomalieën (Figuur 4) is goed te zien dat de periodes met gemiddeld hogere en lagere slibconcentratie veelal samenvallen binnen kombergingsgebieden en deels ook tussen de kombergingsgebieden. In deze figuur is ook goed te zien dat de hogere zwevend stofgehalten in de periode 2005/2006 -2011/12/13 voornamelijk optreden binnen de kombergingsgebieden. Op de Noordzee meetlocaties is deze verhoging niet terug te zien. De Noordwijk meetlocaties laten wel een toename van het zwevend stofgehalte zien voor de periode na 2010.



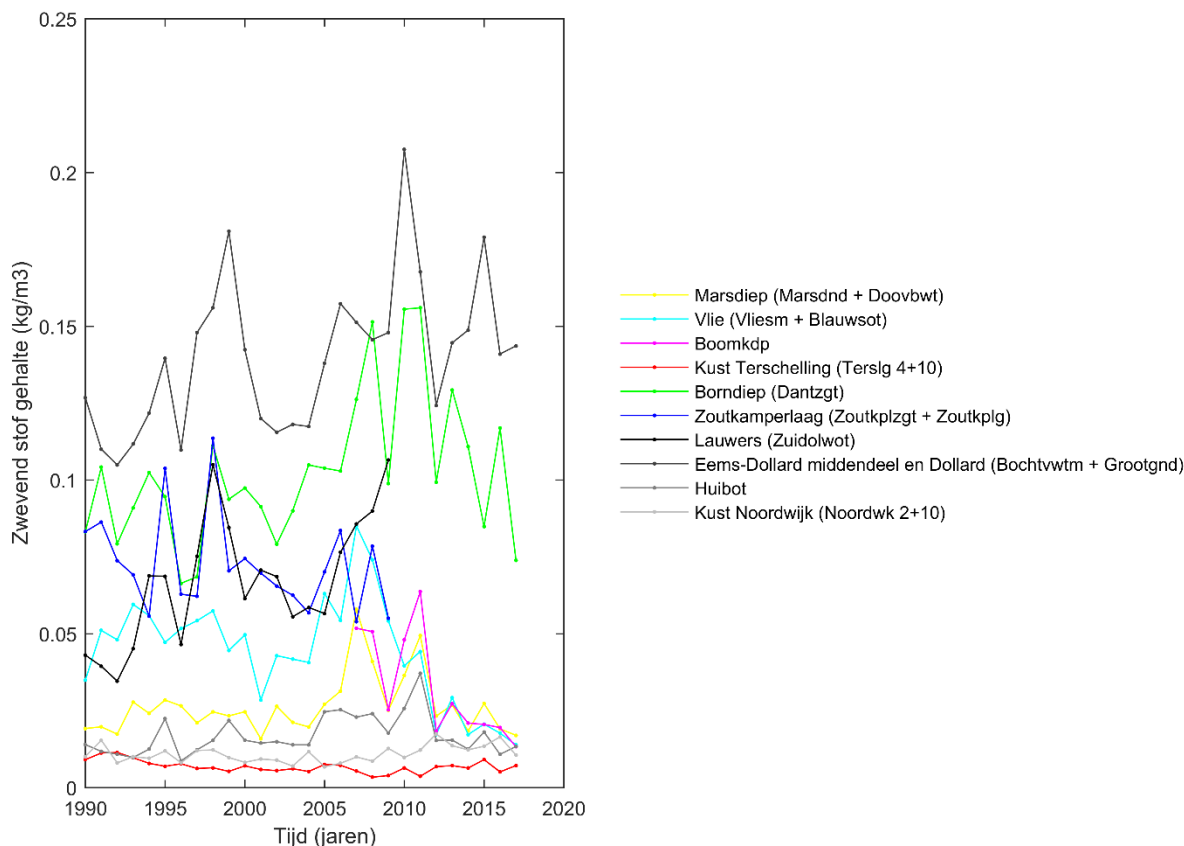


Figuur 4 Relatieve verandering in het zwevend stofgehalte voor de Waddenzee en Noordzee meetlocaties per (kom)gebied. Een waarde 2/0,5 geeft een 2x/0,5x zo hoog zwevend stofgehalte ten opzichte van het langjarig gemiddelde. Volledige namen van de meetlocaties staan in Appendix A1.

### 3.3 Vergelijking waarnemingen tussen de komgebieden

Globaal gezien zijn de veranderingen in slibconcentraties in de verschillende komgebieden vergelijkbaar. Hogere en lagere zwevend stofgehalten komen ongeveer in dezelfde periodes voor (Figuur 5). Het lijkt erop dat de trends in slibconcentratie het meest op elkaar lijken voor de kombergingsgebieden welke dicht bij elkaar liggen (vergelijk de vorm van de grafieken in Figuur 5 van het Marsdiep en Vlie met die van het Lauwers en de Eems-Dollard). Dit onderbouwt de veronderstelling dat transport van slib over het wantij mogelijk is. Ten slotte valt op dat in de meest westelijke komgebieden Marsdiep en Vlie de piekconcentratie in slib voorkomt rond 2007/2008, terwijl deze in de komgebieden van het Borndiep en in de Eems-Dollard pas later, rond 2010/2011, zichtbaar is.

De absolute slibgehalten in de waterkolom zijn relatief laag bij de meetlocaties in de meest westelijke komgebieden Marsdiep en het Vlie en het hoogst bij de meetlocaties in het Borndiep en de Eems-Dollard (met uitzondering van het nabij de in het zeegat gelegen meetlocatie HUIBGOT) (Figuur 5). Dit kan te maken hebben met de geometrie van de kombergingsgebieden maar ook met de ligging van de monsternamenpunten. In de toekomst zou dit met satellietbeelden bekeken kunnen worden.



Figuur 5 Zwevend stofgehalte voor verschillende gebieden in de Waddenzee en Noordzee. Volledige namen van de meetlocaties staan in Appendix A1

### 3.4 Vergelijking waarnemingen Waddenzee en de Noordzee

De sedimentconcentraties in de Noordzee zijn significant lager dan in de Waddenzee, maar de orde grootte van de relatieve schommelingen in concentraties is vergelijkbaar met die in de Waddenzee (Figuur 3; Figuur 4). Alle Noordzeemeetlocaties, bij de kust van Noordwijk (NOORDWK 2 en 10) en Terschelling (TERSLG 4 en 10) geven een zeer geleidelijke afname in slibconcentratie aan tussen 1991/1992 en 2003 en vervolgens een geleidelijke toename tot 2014-2016 (metingen bij TERSLG 4 stoppen in 2006). De afname in sedimentconcentraties vanaf ongeveer 2011, zoals waargenomen bij de meeste Waddenzeemeetlocaties, blijft uit of zet pas in rond 2014. De trend in slibconcentratie bij de meetlocaties in Noordzee op 4 en 10 km voor de kust van Terschelling verschilt dus van de trend binnen het Vlie (VLIESM en BLAUWSOT). Opvallend is dat de metingen in de Noordzee dichtbij de kust van Terschelling bij het Boomkensdiep (BOOMKDP) wel een daling in de slibconcentratie laten zien vanaf ongeveer 2011.

## 4 Verklaring van trends

### 4.1 Opstellen hypothesen

Om de gevonden toe- en afnames van de slibconcentratie in de waterkolom te kunnen verklaren zijn verschillende hypothesen opgesteld. Deze hypothesen zijn opgesteld aan de hand van discussies met Deltares, Arcadis en RWS over de werking van het systeem en de uitkomsten van eerdere onderzoeken. Ze hangen samen met veranderingen in de putten en bronnen van slib in de Waddenzee,



hydrodynamische condities en specifieke antropogene invloeden. Hieronder volgt een overzicht van de gestelde hoofdhypothesen en onderliggende hypothesen.

### **Hypothese 1: De concentratie van zwevend stof in de Waddenzee verandert door een verandering van slibconcentratie in de Noordzee**

- 1a: de aanleg van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte heeft slibpluimen veroorzaakt die de concentratie van slib in de Waddenzee tijdelijk verhoogd hebben;
- 1b: toename in de storm-/golfintensiteit heeft geleid tot meer aanvoer van sediment vanuit de Noordzee richting de Waddenzee en daarmee hogere sedimentconcentraties in de Waddenzee;
- 1c: Tijdelijke periodes met hogere sedimentaanvoer vanuit de rivieren heeft geleid tot hogere concentraties in de Noordzee en vervolgens tot hogere concentraties in de Waddenzee.

### **Hypothese 2: De concentratie van zwevend stof in de Waddenzee verandert ten gevolge van veranderingen in volumes aan slib in de kwelders**

- 2a: Veranderingen in kwelderaanleg kwelderonderhoud hebben geleid tot veranderingen in slibgehalten in de Waddenzee;
- 2b: Veranderingen in getijkarakteristieken en golfintensiteit hebben geleid tot erosie of aanwas van kwelders en daarmee tot veranderingen in sedimentconcentraties in de Waddenzee.

### **Hypothese 3: De concentratie van zwevend stof in de Waddenzee verandert ten gevolge van veranderingen in slibgehalte van de bodem van de Waddenzee**

- 3a: Veranderingen in slibgehalte van de bodem zijn opgetreden en hebben de concentratie zwevend stof in de Waddenzee beïnvloed;
- 3b: jaarlijkse variaties in golfintensiteit veranderen het volume slib wat opgeslagen is in de bodem en veroorzaken daarmee variaties in de hoeveelheid slib in de waterkolom;
- 3c: toe- en afnames in het voorkomen van baggerpluimen en bodemverstoring gerelateerd aan baggeren en storten veroorzaken variaties in de slibconcentratie in de waterkolom;
- 3d: veranderingen in de ligging van geulen en platen beïnvloeden de mate waarin slib in de bodem is opgeslagen en veroorzaken daarmee variaties in de slibconcentratie in de waterkolom;
- 3e: veranderingen in de biomassa filtervoeders op de bodem van de Waddenzee veranderen de sedimentsamenstelling en -eigenschappen (korrelgrootte, valsnelheid) en daarmee de slibopslag in de bodem en variatie in slibconcentratie in het water;
- 3f: veranderingen in de bioturbatie-intensiteit veroorzaken variaties in de opslag van slib in de bodem en daarmee de slibconcentratie in de waterkolom.

Naast bovenstaande processen zijn er nog meer processen die tot veranderingen in slibconcentraties kunnen leiden in de Waddenzee, maar waar geen hypothesen voor zijn opgesteld, omdat naar verwachting de invloed van deze processen op de totale slibconcentraties binnen het gehele systeem beperkt is:

- Uitwisseling met IJsselmeer: hoewel uitwisseling met het IJsselmeer van belang is voor de zoet-zoutverdeling van water en daarmee het transport van slibdeeltjes, is het IJsselmeer zelf slechts een zeer kleine bron van sediment. Een langere hoge aanvoer van zoetwater vanuit het IJsselmeer kan vervolgens wel leiden tot meer import van slib vanuit de Noordzee. Dit effect is voor nu niet bekeken omdat de verwachte impact klein is.
- Uitwisseling met de Eems: patronen in schommelingen in de slibconcentratie in de Eems-Dollard en de rest van de Waddenzee zijn vergelijkbaar en daarnaast is de Eems geen bron voor slibdeeltjes, maar eerder een put. De Eems kan daardoor de sterke toename in de slibconcentratie tussen 2003 en 2011 niet verklaren en is niet verder meegenomen als hypothese.

In het volgende hoofdstuk volgt per hypothese eerst kort een kennisoverzicht van belang om hypothesen te kunnen testen (e.g. gegevens van ontwikkelingen golfhoogte en volume kwelders door de tijd) en daarna een korte beschrijving in hoeverre deze kennis overeenkomt met de gevonden variaties in de slibconcentratie.

## 4.2 Veranderingen slibconcentraties in de Noordzee

### Hypothese 1a: de aanleg van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte heeft slibpluimen veroorzaakt die de concentratie van slib in de Waddenzee tijdelijk verhoogd hebben

#### Achtergrondkennis

Werkzaamheden bij de aanleg van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte hebben slibpluimen veroorzaakt die de slibconcentratie in de Waddenzee zouden kunnen hebben verhoogd. De aanleg van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte startte in 2008. In 2013 werd de 2<sup>e</sup> Maasvlakte officieel in gebruik genomen (Havenbedrijf Rotterdam N.V., 2013).

#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

De aanleg van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte startte in 2008 en eindigde in 2013 en kan daardoor niet de toename van de slibconcentratie in de Waddenzee vanaf 2003 verklaren. De slibconcentraties bij de Noordzeemeetlocaties (Noordwijk 2+10 en Terschelling 10) tonen wel een toename vanaf 2008 (Figuur 3; Figuur 4). Dit kan, met name voor de Noordwijkmeetlocaties, duiden op invloed van de aanleg van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte. Na 2014 lijken de slibconcentraties iets af te nemen. Deze afname is zo klein dat als dit al samenhangt met het afronden van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte (Figuur 3; Figuur 4), er andere factoren moeten zijn die ook bijdragen aan het verhogen van de slibconcentraties.

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

Met de beperkte kennis over variaties in activiteiten gedurende het 2<sup>e</sup> Maasvlakte traject zoals hierboven beschreven kan niets gezegd worden over mogelijke effecten van de aanleg van de 2<sup>e</sup> Maasvlakte op pieken en dalen in de slibconcentratie.

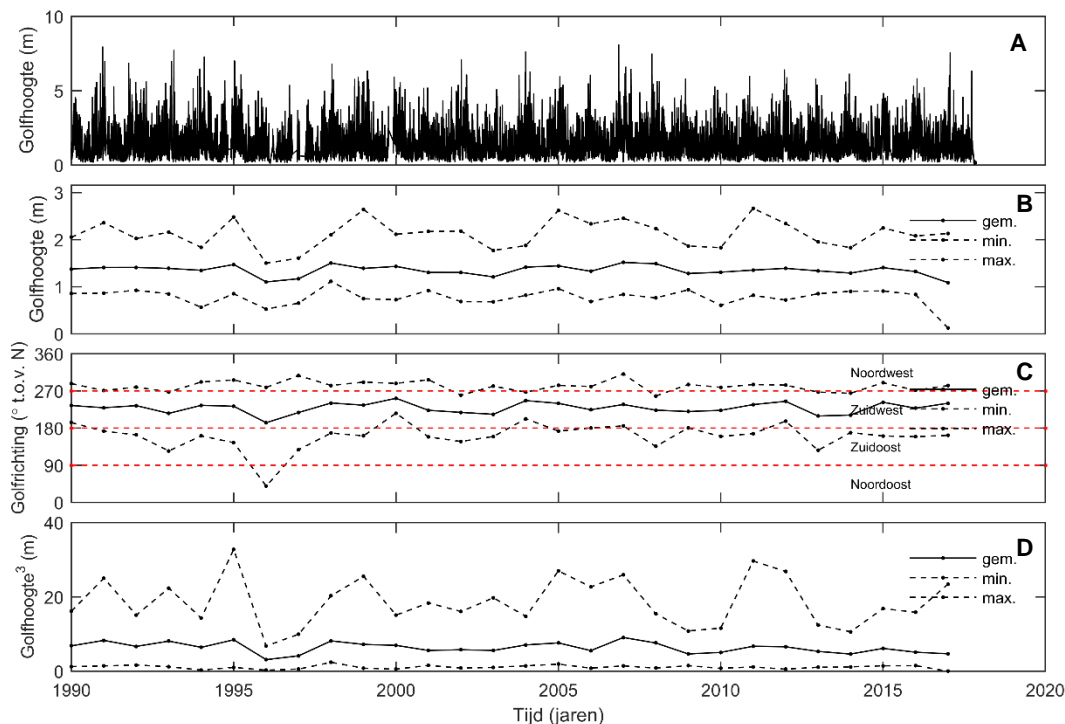
#### Conclusie

De aanleg van MV2 heeft mogelijk lokaal voor een verhoging van het zwevend stofgehalte gezorgd. Deze mogelijk oorzaak verklaart echter niet volledig de concentratieverhoging in de Waddenzee omdat deze al vanaf het jaar 2003 is opgetreden. De aanleg van MV2 is in 2008 gestart. De verhoging in de Waddenzee in de jaren 2008 – 2011 kan deels wel een gevolg zijn van de aanleg van MV2. In hoeverre dit het geval is is momenteel niet aan te tonen. Eerder heeft Van den Bogaard ook benoemd dat het MWTL-meetnet onvoldoende is om een concentratieverhoging t.g.v. Maasvlakte-2 statistisch betrouwbaar aan te tonen binnen een termijn van tientallen jaren.

### Hypothese 1b: toename in de storm-/golfintensiteit heeft geleid tot meer re-suspensie en daardoor aanvoer van sediment vanuit de Noordzee richting de Waddenzee

#### Achtergrondkennis

Figuur 6 toont de ontwikkeling van de golfintensiteit en golfrichting over de afgelopen tientallen jaren. De golfhoogte en richting zijn stabiel over langere tijd. In Figuur 6B en D zijn periodes van enkele jaren te onderscheiden waarin de golfintensiteit relatief hoog/laag is geweest.



Figuur 6 Golfhoogtes en golfrichting gemeten op de Noordzee (meetlocatie EIELSGT). A: Gemeten golfhoogtes, B: jaarlijks gemiddelde, minimum en maximum golfhoogtes gebaseerd op maandgemiddelden, C: Jaarlijks gemiddelde golfrichting en minimum en maximum afwijkingen in golfrichting, gebaseerd op maandgemiddeldes, D: Jaarlijkse gemiddelde, minimum en maximum golfhoogte<sup>3</sup> gebaseerd op maandgemiddelden (om het relatief grote effect van grotere stroomsnelheden tijdens stormen op sedimenttransport te benadrukken).

#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

Er lijkt geen sterk verband te zijn tussen de golfstatistieken en de toe- en afname in slibconcentratie rond 2003 en 2011. De golfintensiteit neemt toe tussen 2003 en 2007 (met een dal in 2006) en neemt vervolgens af (Figuur 6). Dit zou gekoppeld kunnen worden aan de toe- en afname in slibconcentratie in dezelfde periode, maar de timing waarop de toename verandert in afname ligt relatief ver van elkaar (2007 vs. 2011).

Het feit dat pieken en dalen in de slibconcentratie bij verschillende meetlocaties over het algemeen niet correleren met pieken en dalen in de jaarlijkse gemiddelde golfintensiteit (vergelijk Figuur 3 en Figuur 4 met Figuur 6) maakt het onwaarschijnlijk dat de globale toe- en afname in slibconcentratie sterk samenhangt met veranderingen in de golfcondities.

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

Pieken en dalen in de slibconcentratie bij verschillende meetlocaties (Figuur 3) kunnen niet eenduidig worden gecorreleerd aan de golfintensiteit. De specifieke toename in golfintensiteit tussen 1996 en 1998 (Figuur 6, panel 2) zou eventueel wel gelinkt kunnen worden aan pieken in de slibconcentratie in 1998 die zichtbaar zijn in verschillende komgebieden, maar bijvoorbeeld pieken van gelijke orde bij de Zoutkamperlaag en Lauwers rond 1995 (Figuur 5) kunnen niet gelinkt worden aan de golfcondities.

#### Conclusie

Er lijkt geen sterk verband te zijn tussen golfstatistieken en de toe- en afname in slibconcentratie in de Waddenzee. De geleidelijke toename van de golfintensiteit tussen 2003 en 2007 zou wel de slibconcentraties in de Waddenzee kunnen hebben verhoogd in deze periode.

### **Hypothese 1c: Tijdelijke periodes met hogere sedimentaanvoer vanuit de rivieren en/of hogere rivierafvoeren hebben geleid tot hogere concentraties in de Noordzee en vervolgens tot hogere concentraties in de Waddenzee**

#### Achtergrondkennis

Concentraties van sediment in rivieren kunnen schommelen door de jaren heen, bijvoorbeeld als gevolg van veranderende weerscondities. Daarnaast verschilt ook de afvoer per jaar. Er zijn jaren met een gemiddeld hogere of lagere afvoer en daarmee wordt meer of minder sediment het Rijn/Maasmondgebied ingebracht. Wanneer sedimentpluimen vanaf de monding van de Rijn zich richting de Waddenzee bewegen is te verwachten dat pieken in de sedimentconcentratie die worden waargenomen in de Waddenzee in hetzelfde jaar, of iets eerder, zijn waar te nemen bij de meetlocaties bij Noordwijk.

#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

Vergelijking van de Waddenzeemeetlocaties met de meetlocaties bij Noordwijk laat zien dat na de toename van de slibconcentraties vanaf 2003 de slibconcentratie in de Waddenzee eerder afneemt dan in de Noordzee (paragraaf 3.4). Dit suggereert dat de hogere sedimentconcentraties in de Waddenzee niet samenhangen met toevoer van sediment vanaf de Rijn/Maasmonding.

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

Het feit dat de hoge piek in sedimentconcentratie rond 2008 bij de meetlocaties Marsdiep noord en Doove Balg west, die het dichtst bij de Rijn liggen, niet zichtbaar is bij de Noordwijkmeetlocaties (Figuur 4) doet vermoeden dat sedimenttoevoer vanaf de Rijn geen belangrijke rol speelt bij het voorkomen van pieken en dalen in de slibconcentratie in de Waddenzee.

#### Conclusie

Het valt niet uit te sluiten dat sedimentpluimen vanaf de Rijnmonding de slibconcentraties in de Waddenzee beïnvloeden, maar het feit dat slibconcentraties in de Waddenzee na 2011 dalen terwijl ze langs de Hollandse kust (Noordwijk) hoog blijven (Figuur 4), en het feit dat een sterke piek in slibconcentratie in het meest westelijke deel van de Waddenzee niet kan worden gerelateerd aan waargenomen slibconcentraties langs de Hollandse kust (Figuur 4) duidt erop dat sedimenttoevoer vanaf de Rijn geen grote invloed heeft op schommelingen in slibconcentraties in de Waddenzee.

## **4.3 Verandering slibvolume in de kwelders**

### **Hypothese 2a: Veranderingen in kwelderaanleg en kwelderonderhoud hebben geleid tot veranderingen in slibgehalten in de Waddenzee**

#### Achtergrondkennis

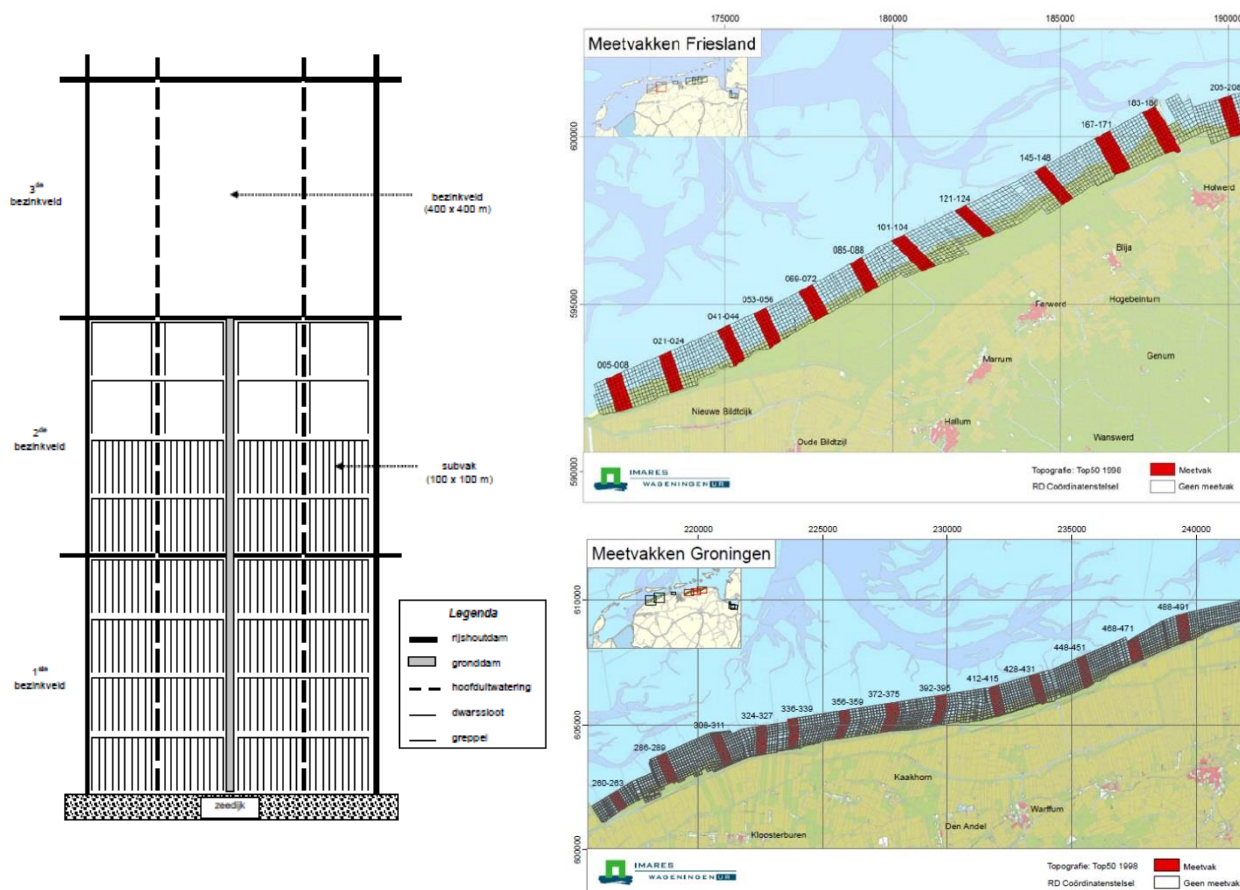
Aanwas en erosie van kwelders veroorzaakt veranderingen in het volume slib opgeslagen in de kwelders. Mogelijk leidt dit tot verschillen in de slibconcentratie in het water.

In de Waddenzee zijn verschillende typen kweldergebieden die grofweg kunnen worden verdeeld in de relatief zandige eilandkwelders en de slibrijke vastelandskwelders langs de kusten van Groningen en Friesland. Van alle kwelders zijn de vastelandskwelders een belangrijk bezinkingsgebied voor slib en tegelijkertijd een potentiële bron van slib. In Cleveringa (2018) is in het kader van deze zelfde KRW-slib studie gekeken naar de kwelders als potentiële bron van slib. Ook daaruit komt naar voren dat zeer veel slib ligt opgeslagen in de kwelders.

Een groot deel van deze vastelandskwelders (~6000 ha) maakt deel uit van de kwelderwerken waar kweldergroei is gestimuleerd door middel van wilgenhouten dammen die luwte creëren (Van Duin et al., 2016). Vanwege het relatief grote volume slib opgeslagen in de kwelderwerken en de uitgebreide monitoring zal hieronder gefocust worden op de ontwikkelingen in de kwelderwerken en hoeverre deze te linken zijn aan schommelingen in slibconcentraties in de waterkolom.

De kwelderwerken zijn voormalige landaanwinningssystemen (Van Duin et al., 2016). Vanaf de 17<sup>e</sup> eeuw bevorderden boeren kweldergroei door het graven van greppels. Sinds 1925 wordt er op initiatief van de overheid gewerkt met verschillende bezinkingsvelden (Figuur 7) omringd door wilgenhouten dammen om slibsedimentatie en daarmee kweldergroei te bevorderen.

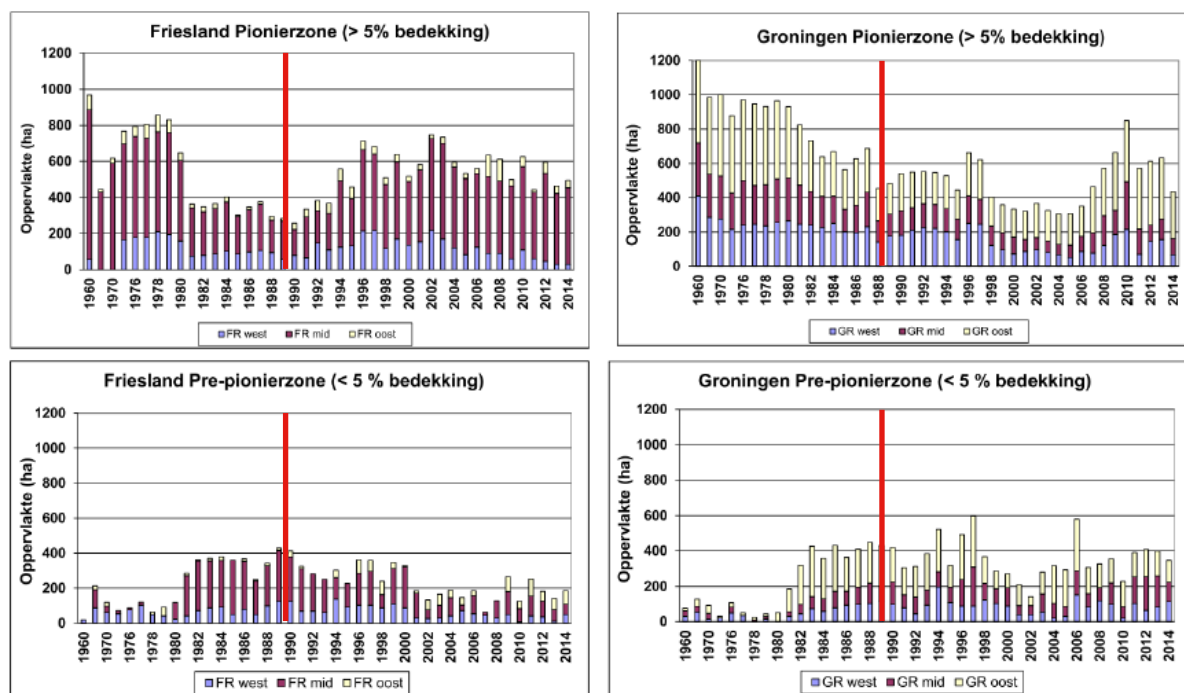
Sinds 1960 is er een monitoringssysteem van 25 meetvakken (Figuur 7). In deze meetvakken worden jaarlijkse vegetatieraaien gelopen en iedere 3-4 jaar worden hoogteraaien ingemeten.



Figuur 7 Links: Schematische indeling van één reeks met bezinkingsvelden vanaf de zeedijk tot aan het wad. Rechts: locatie van meetvakken langs de vastelandskusten van Friesland en Groningen. Binnen de ruim 100 reeksen bezinkingsvelden zijn er 25 meetvakken gedefinieerd. Bron: Van Duin et al., 2016.

Figuur 8 en Tabel 1 geven een overzicht van de ontwikkelingen van het kwelderoppervlak van de kwelderwerken over de afgelopen tientallen jaren. Op basis van gegevens uit Van Duin et al. (2016) is een inschatting gemaakt van het volume sedimentatie en erosie in de kwelderwerken (pre-pionierzone, pionierzone, kwelder) in de deelgebieden Friesland west (ca. 8 km) en Groningen oost (ca. 11 km) (Figuur 9). Gemiddeld genomen vindt opslibbing plaats en dus opslag van slib in de kwelders (Figuur 9). Het volume opslibbing verschilt per periode en per deelgebied.

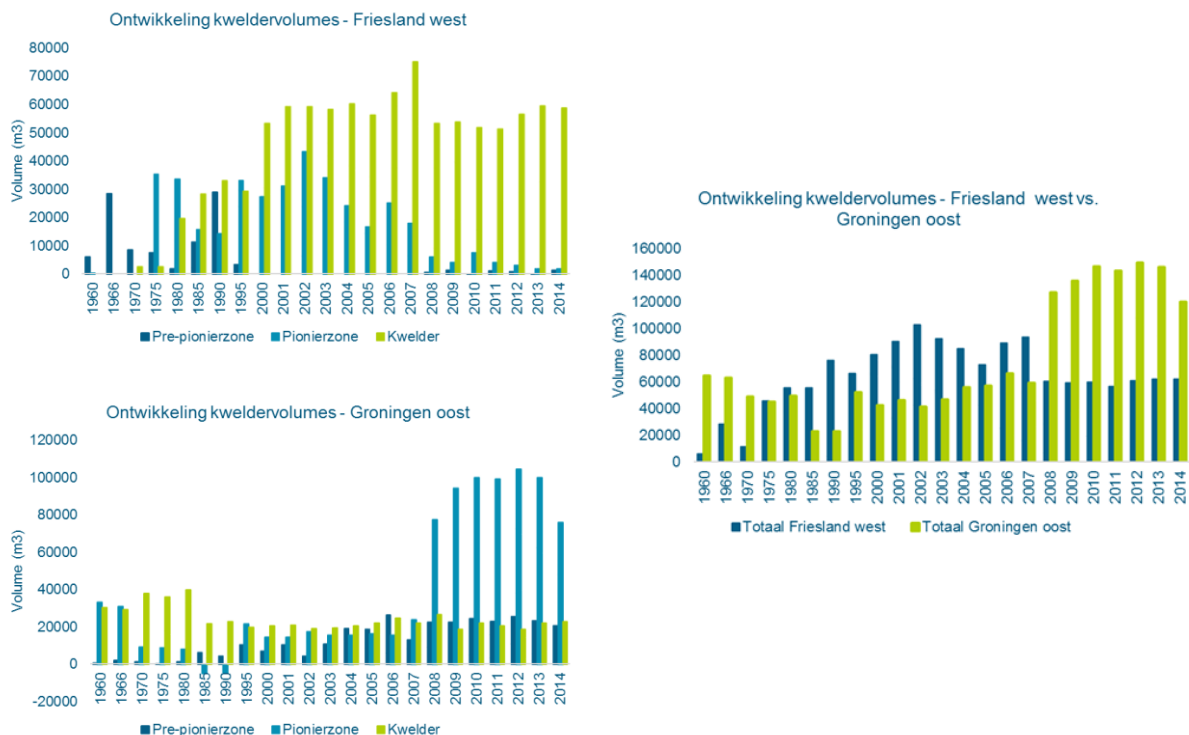




Figuur 8 Ontwikkelen in het oppervlak pionierszone (>5% vegetatiebedekking) en pre-pionierszone (0-5% vegetatiebedekking) in de Friese en Groningse kwelderwerken tussen 1960 en 2014 gebaseerd op extrapolatie van de meetvakken (Van Duin et al., 2016). De rode lijnen geven het startjaar 1990 aan vanaf waar de slibmetingen zijn geanalyseerd.

Tabel 1 Beschrijving hoogte-/areaalontwikkeling per locatie in de kwelderwerken (Op basis van Van Duin et al., 2016). In de kolom 'betrekking op' geeft een 'x' aan dat de ontwikkeling geldt voor de Friese en/of Groningse kust en een '-' dat een ontwikkeling niet van toepassing is op het gebied.

Jaartal	Beschrijving hoogte-/areaalontwikkeling	Betrekking op	
		Friese kust	Groningse kust
1982-2004	Afname pionierszone (Figuur 8)		X
Sinds 1990	Stop onderhoud buitenste bezinkvelden → erosie buitenste velden	X	X
Sinds 1994	Relatief stabiel areaal	X (met name midden)	
1998-2009	Herstel areaalverlies pionierszone (Figuur 8)		X (west en midden)
Sinds 2006	Lichte afname areaal	X (oost en west)	
2007-2010	Sterke toename pionierszone (Figuur 8)		X
2008-2014	Hoge opslibbingssnelheid		Bodemdalingsgebied Groningen oost
Sinds 2010	Sterke afname pionierszone (Figuur 8)		X (west en midden)
Sinds 2010	Handhaving toegenomen pionierszone		X (oost)



Figuur 9 Sedimentatie- en erosievolumes in de kwelderwerken in de Friesland west (vak 1-83, ~8 km) en Groningen oost (vak 402-516, ~11 km) berekend op basis van gegevens uit Van Duin et al. (2016). Negatieve waarden geven erosie aan.

### Berekening sedimentatie- en erosievolumes in kwelderwerken

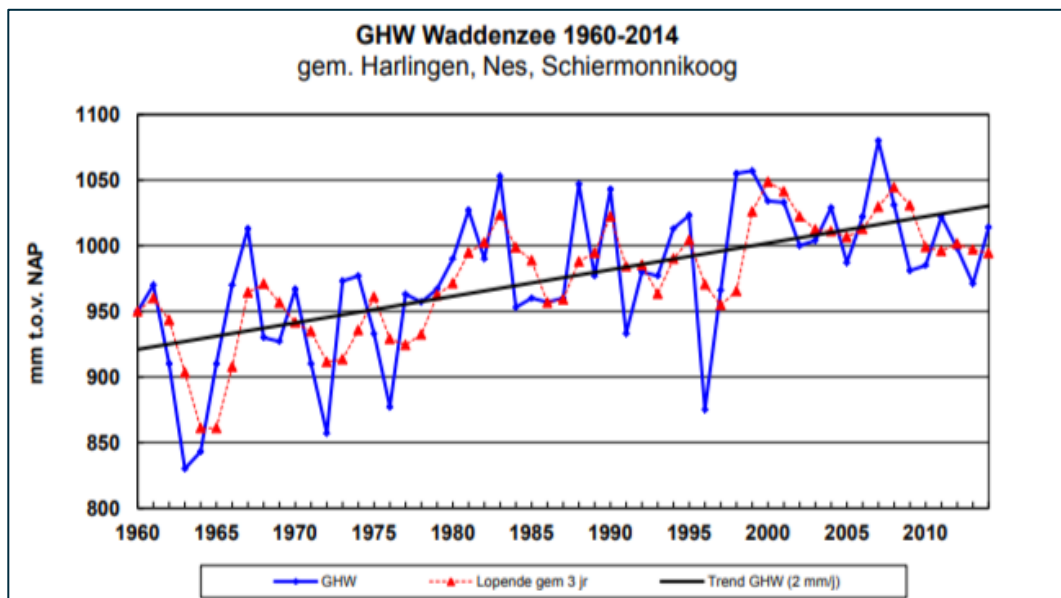
Om inzicht te krijgen in het volume slib dat kan worden opgeslagen in, en vrij kan komen uit kwelders zijn sedimentatie- en erosievolumes in de kwelderwerken berekend voor 2 deelgebieden, namelijk Friesland west (vak 1-83, zie Figuur 7) en Groningen oost (vak 402-516, zie Figuur 7).

Van Duin et al. (2016) geven per deelgebied (Friesland west, midden en oost en Groningen west, midden en oost) arealen pre-pionierzone, pionierzone en kwelder. Deze arealen zijn berekend op basis van extrapolatie van data uit de in totaal 25 meetvakken (Figuur 7, rechts).

Voor dezelfde deelgebieden zijn opslibbingssnelheden gegeven in zeven verschillende perioden tussen de jaren 1960, 1968, 1976, 1984, 1992, 2000, 2008 en 2014. De opslibbingssnelheden zijn apart berekend voor de 3 verschillende bezinkingsvelden dwars op de kust (Figuur 7, links). Hierbij is voor het 2e bezinkingsveld onderscheid gemaakt tussen de pionierzone (>5% vegetatiebedekking) en de zone <5% vegetatiebedekking.

Het sedimentatie- en erosievolume voor de verschillende deelgebieden is berekend door de arealen te vermenigvuldigen met de opslibbing. Als opslibbingssnelheid voor de pre-pionierzone is het gemiddelde genomen van de opslibbing in het 3e bezinkingsveld en de opslibbing in het 2e bezinkingsveld in het gedeelte waar de vegetatiebedekking minder is dan 5%. Voor de pionierzone is de opslibbingssnelheid in het 2e bezinkingsveld voor het gebied met meer dan 5% vegetatiebedekking gebruikt en voor de kwelder is de opslibbingssnelheid uit het 1e bezinkingsveld genomen. De opslibbingssnelheid over de verschillende periodes benoemd hierboven is toegekend aan ieder jaar binnen deze periode (bijv. het sedimentatievolume in 1966 is berekend met de opslibbingssnelheid gegeven voor de periode 1960-1968).

Wijzigingen in beheer en onderhoud van de kwelderwerken (bijv. renovatie/ verwaarlozing wilgenhouten dammen) en veranderingen in weerscondities (m.n. ontwikkelingen in gemiddeld hoogwater, zie Figuur 10) beïnvloeden de opslibbing en erosie in de kwelder. Een overzicht van ontwikkelingen in beheer/onderhoud en gemiddeld hoogwaters is gegeven in Tabel 2.



Figuur 10 Ontwikkeling jaarlijks gemiddelde hoogwaters gemeten bij Harlingen, Nes en Schiermonnikoog (Van Duin et al., 2016). De jaarlijks gemiddelde hoogwaterstand schommelt aan de hand van de windrichting, windkracht, barometerstand en, over langere tijd, de relatieve zeespiegelstijging (Bossinade et al., 1993; Van Duin et al., 2016).

Tabel 2 Overzicht ontwikkelingen in beheer/onderhoud en gemiddeld hoogwater per locatie in de kwelderwerken die veranderingen in kweldervolume (kunnen) veroorzaken (op basis van Van Duin et al., 2016). In de kolom 'betrekking op' geeft een kruis aan dat de ontwikkeling geldt voor de Friese en/of Groningse kust en een – dat een ontwikkeling niet van toepassing is op het gebied.

Jaartal	Wijziging beheer/onderhoud of voorkomen van extremen in gemiddeld hoogwater	Betrekking op	
		Friese kust	Groningse kust
1990-1997	Dalende <b>trend</b> gemiddeld hoogwater (Figuur 10)	X	X
1991	<b>Dal</b> gemiddeld hoogwater (= gunstig voor kwelderuitbreiding) (Figuur 10)	X	X
1994-1998	<b>Damrenovatie</b> : tussendammen plus dwarsdam van 10 km parallel aan de kust van de Noordpolder en Lauerpolder op 200 m van de kwelder	-	Oostelijk deel
1996	Sterk <b>dal</b> gemiddeld hoogwater (= gunstig voor kwelderuitbreiding) (Figuur 10)	X	X
1998-2001	Periode met belangrijke <b>pieken</b> hoogwater (= ongunstig voor kwelderuitbreiding) (Figuur 10)	X	X
Vanaf 1998	<b>Herstel</b> verbinding tussen rijshoutdammen en kwelder met hout en/of grond	X	X
Vanaf 1998	1. <b>verkleinen strijklengte</b> tussen dammen 2. <b>Stop onderhoud</b> buitenste bezinkvelden (zone lager dan GHW 60 cm)	X	X
1998-2002	<b>Onderhoud 2<sup>e</sup> dwarsdam gestopt</b>	-	Oostelijk deel
2004	<b>Piek hoogwater</b> (=ongunstig voor kwelderuitbreiding) (Figuur 10)	X	X
2006	<b>Stop damonderhoud, vanwege extreem snelle opslibbing van de kwelder in de jaren daarvoor (zie figuur 9)</b>	Westelijk deel	-
2007	<b>Piek hoogwater</b> (=ongunstig voor kwelderuitbreiding) (Figuur 10)	X	X



#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

Toe- en afnames in het oppervlak en sedimentvolume van de kwelderwerken in Friesland en Groningen door de tijd verschillen en zijn soms tegengesteld (Figuur 8; Figuur 9; Tabel 1). Dit maakt het lastig om de toe- en afname van de slibconcentratie in de waterkolom te koppelen aan toe- en afnames van het slibvolume opgeslagen in de kwelders.

In Friesland nam het kwelderoppervlak (pionierzone + pre-pionierzone) geleidelijk toe tussen 1990 en 1999 en daalde geleidelijk tussen 1999 en 2014 (Figuur 8). De volumeveranderingen in de west Friese kwelderwerken (Figuur 9) laten een soortgelijke ontwikkeling zien met een omslagpunt in 2002. De daling in kwelderoppervlak en -volume sinds ~1999 kan hebben bijgedragen aan de toename in slibconcentraties tussen 2003 en 2011. De afname van het zwevend stofgehalte in de waterkolom vanaf 2011 kan echter niet verklaard worden door de verdere daling van het kwelderoppervlak.

In Groningen nam het totale kwelderoppervlak (pionierzone + pre-pionierzone) sterk toe tussen 2003 en 2011 en vervolgens af (Figuur 8). Het volume sediment in de kwelders in het deelgebied Groningen oost volgt grofweg een gelijke trend, met als belangrijk verschil dat het volume over het algemeen meer constant is tussen de jaren en een zeer sterke toename toont tussen 2008 en 2009 (Figuur 9). De waargenomen trend in kwelderoppervlak is gelijk aan de trend in sedimentconcentraties, de toename in kwelderoppervlak valt samen met de toename in sedimentconcentratie. Het is daarom onwaarschijnlijk dat de ontwikkeling van de kwelders de slibconcentratie in het water heeft gestuurd. Het lijkt er eerder op dat de verhoogde slibconcentraties in het water tot snellere sedimentatie in de kwelders hebben geleid (Tabel 1: "2008-2014 hoge opslibbingssnelheid").

De toename van het kwelderoppervlak in Friesland tussen 1990 en 1999 hangt mogelijk (deels) samen met de dalende trend in hoogwater (Tabel 2; Figuur 10), terwijl de daling in kwelderoppervlak en -volume in de periode erna beïnvloed zou kunnen zijn door de pieken in hoogwater rond 1998-2001 (Tabel 2; Figuur 10) en de stop in damonderhoud bij de west Friese kust (Tabel 2). In Groningen zou het herstel van en het verkleinen van de strijklengte tussen de rijshoutendammen kunnen hebben bijgedragen aan de toename van het kwelderoppervlak vanaf 2003, maar in diezelfde periode is ook het onderhoud van de 2<sup>e</sup> dwarsdam gestopt wat juist leidt tot een afname van het kwelderoppervlak (Tabel 2).

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

De slibconcentraties bij de Waddenzeemeetlocaties tonen belangrijke pieken rond 1995, 1998, 2008 en 2011 en dalen rond 1996 en 2003/2004 (Figuur 3; Figuur 4).

Pieken en dalen in de slibconcentraties in 1995, 1996 en 1998 komen overeen met respectievelijk dalen en pieken in het kwelderoppervlak (pre-pionier- en pionierszone) van Friesland en Groningen dus mogelijk leveren veranderingen in kwelderoppervlak een bijdrage aan de hoeveelheid slib in de waterkolom. In 2008, 2003/2004 en 2011 is de link minder eenduidig en verschilt voor de pre-pionier en pionierszone.

De dalen en pieken in kwelderoppervlak in 1995, 1996 en 1998 lijken samen te hangen met gemiddeld hogere en lagere hoogwaters (Figuur 10; Tabel 2).

#### Conclusie

Het is lastig om de slibconcentratie in de waterkolom te koppelen met ontwikkelingen van slibvolumes in de kwelderwerken doordat aanwas en erosie van kwelders sterk verschilt per locatie. De afname van het kwelderoppervlak aan de Friese kust vanaf 1999 kan hebben bijgedragen aan de toename van de slibconcentraties in de waterkolom van 2003 tot 2011, maar verklaart niet de afname van de slibconcentratie na 2011. In Groningen lijkt het alsof het kwelderoppervlak afhangt van slibconcentraties in

de waterkolom in plaats van andersom. Hoge en lage slibconcentraties in de waterkolom in 1995, 1996 en 1998 zouden kunnen samenhangen met veranderingen in het kwelderoppervlak (pre-pionier en pionierszone) die op hun beurt gerelateerd lijken te zijn aan pieken en dalen in het gemiddelde hoogwater (Figuur 10).

#### **Hypothese 2b: Veranderingen in getijkarakteristieken en golfintensiteit hebben geleid tot erosie of aanwas van kwelders en daarmee tot veranderingen in sedimentconcentraties in de Waddenzee**

Voor achtergrondkennis, verklaring en algemene conclusie zie Hypothese 2a.

Hieraan kan nog worden toegevoegd dat de lagere GHW-standen, zoals waargenomen in de periode 1990 – 1997, kunnen hebben bijgedragen aan de toename in sedimentconcentratie in het water. Bij een lagere GHW stand zal het onbegroeide deel van kwelders en voorliggende wadplaten meer invloed ondervinden van de golven en bijbehorende schuifspanningen dan bij een hogere GHW-stand. Hierdoor treedt gemakkelijker re-suspensie op en daarmee hogere sedimentconcentraties in het water.

## **4.4 Verandering slibgehalte in de bodem van de Waddenzee**

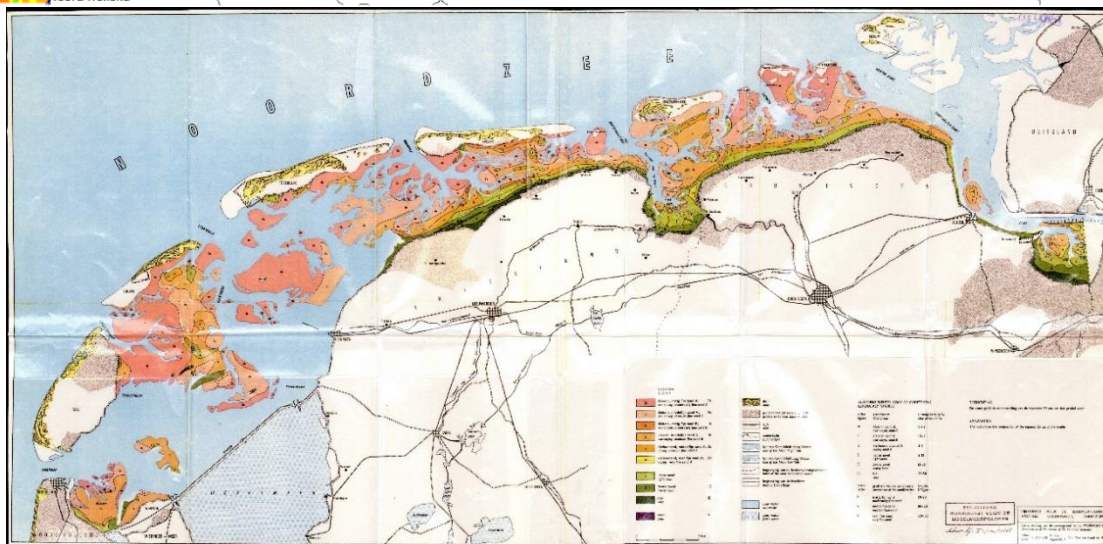
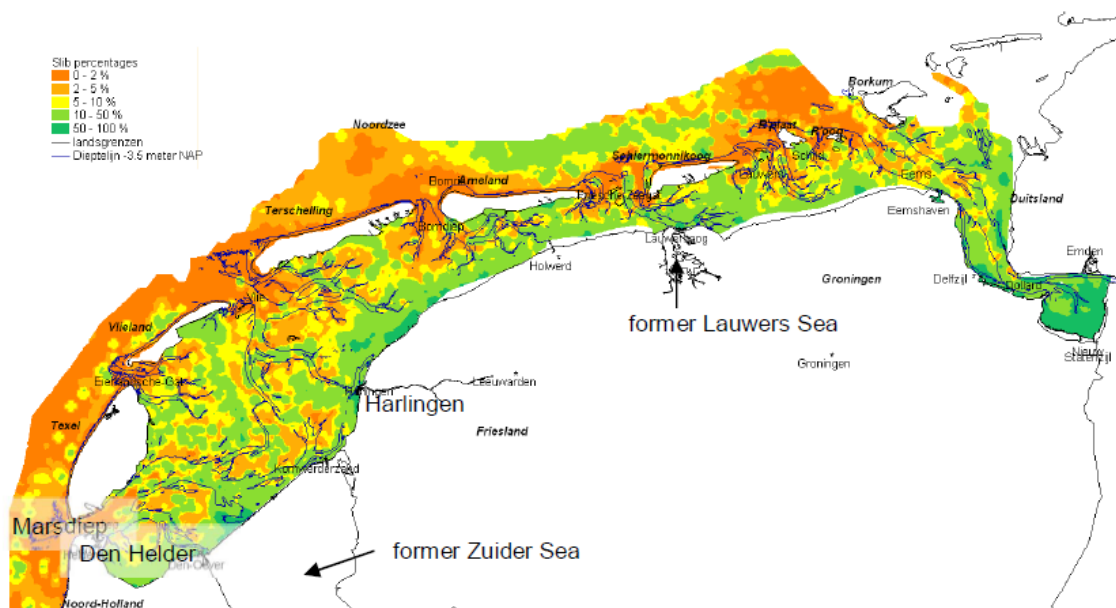
### **Hypothese 3a: Veranderingen in slibgehalte van de bodem zijn opgetreden en hebben de concentratie zwevend stof in de Waddenzee beïnvloed**

#### Achtergrondkennis

Vanwege verschillen in bemonsterings- en analysetechnieken en de relatief lage frequentie van metingen in tijd en ruimte ten opzichte van de relatief grote natuurlijke dynamiek kunnen er geen definitieve uitspraken gedaan worden over of het slibgehalte in de bodem van de Waddenzee gemiddeld genomen is toegenomen of afgenomen over de afgelopen tientallen jaren.

Zwarts et al. (2004) hebben onderzocht of de bodem van de Waddenzee slibrijker werd onder invloed van mechanische kokkelvisserij. In het uitgebreide rapport staat een overzicht van beschikbare data, inclusief de diepte waarop is bemonsterd en de manier waarop de data vervolgens is geanalyseerd. Zwarts et al. (2004) concluderen dat de Waddenzee gemiddeld genomen niet slibrijker is geworden wanneer rekening is gehouden met het feit dat de oude monsters dieper werden gestoken dan de recente monsters.

Veranderingen in de slibfractie over tijd hangen volgens Zwarts et al. (2004) samen met erosie- en sedimentatiepatronen die zijn veroorzaakt door: (1) de sluitingen van de Zuiderzee en Lauwerszee, (2) landaanwinningswerken langs de vastelandskust, (3) het storten van baggermateriaal ten noorden van Harlingen en (4) natuurlijke dynamiek. Een vergelijking van een kaart met de bodemsamenstelling van De Gloppe (1967), met monsters uit de periode 1950-1955 (Zwarts et al., 2004), en een kaart uit Vroom et al. (2012) op basis van de Sedimentatlas met monsters uit de periode 1989-1996, bevestigt dat veranderingen in de globale patronen van de bodemsamenstelling samenhangen met de dynamiek van de geulen (Figuur 11). Op grote schaal zijn de patronen van de bodemsamenstelling verder gelijk. In sommige gebieden lijkt nu wat meer klei te zijn, maar dit kan samenhangen met het feit dat de recente monsters minder diep gestoken zijn (Zwarts et al., 2004).



LEGENDA		ALGEMENE SLEUTEL VOOR DE CODETEKENS		
LEGEND		GENERAL KEY TO CODES		
0a	kleiarm, matig fijn zand A; non-clayey, moderately fine sand A	0b	grondsoort	lettingshalte in %
0c	kleiarm, middel fijn zand A; non-clayey, medium fine sand A	0	figuur	clay content in %
1a	kleiarm, matig fijn zand B; non-clayey, moderately fine sand B	1	0	kleiarm zand A non-clayey sand A 0-1%
1c	kleiarm, middel fijn zand B; non-clayey, medium fine sand B	2	1	kleiarm zand B non-clayey sand B 1%-3%
2a	kleihoudend, middel fijn zand A; clayey, medium fine sand A	2	2	kleihoudend zand A clayey sand A 3-5%
2d	kleihoudend, zeer fijn zand A; clayey, very fine sand A	I	I	lichte zavel light loam 5-12%
3	lichte zavel light loam	II	II	zware zavel heavy loam 12-25%
4	zware zavel heavy loam	III	III	klei clay 25-50%
5	klei clay	I	I	letter
6	veen peat	II	II	grofheid van de zandfractie coarseness of the sandfraction U-cijfer U-figure
		III	III	b
		IV	IV	matig fijn zand moderately fine sand 50-80
		V	V	c
				middel fijn zand medium fine sand 80-120
				d
				zeer fijn zand very fine sand 120-180
				v

Figuur 11 Slibgehalte in de bodem van de Nederlandse Waddenzee. Boven: slibpercentages op basis van data van de Sedimentatlas (Rijkswaterstaat, 1998) (7502 monsters genomen tussen 1989 en 1996 tot 10-15 cm diepte [McLaren et al., 1998; Zwarts et al., 2004]) (Vroom et al., 2012). Onder: data van de Glopper (1967) (~2500 monsters genomen tussen 1950 en 1955, de meeste tot 25 cm diep [Zwarts et al., 2004]) incl. uitvergrote legenda.

Sinds 2008 worden binnen het SIBES-programma jaarlijks 4500 sedimentmonsters (om de 500 m) verzameld in de Waddenzee en Eems-Dollard volgens een vaste methodiek (NIOZ, 2016). In het kader van het KRW slib onderzoek is de SIBES data nader bekeken. De analyse die hiervoor is uitgevoerd wordt hieronder beschreven en kan worden gebruikt als achtergrondinformatie ter verdere onderbouwing van de hypothese.

#### Extra SIBES analyse

Met de SIBES dataset, die voor dit project beschikbaar is over de periode 2008-2013, kan inzicht verkregen worden in de ruimtelijke en temporele variaties in slibgehalte (fractie van het sediment met een  $d < 64 \mu\text{m}$ ) in de Waddenzee. Elk jaar zijn er door het NIOZ op het intergetijdengebied sedimentmonsters verzameld op locaties met een onderlinge afstand van 500 m (4796 locaties, 21823 waarnemingen over 2008-2013, zie Bijlage A3. In 2008 zijn er minder monsters verzameld (ca. 900 stuks), dan in de daaropvolgende jaren (ca. 4200 stuks).

#### Aanpak

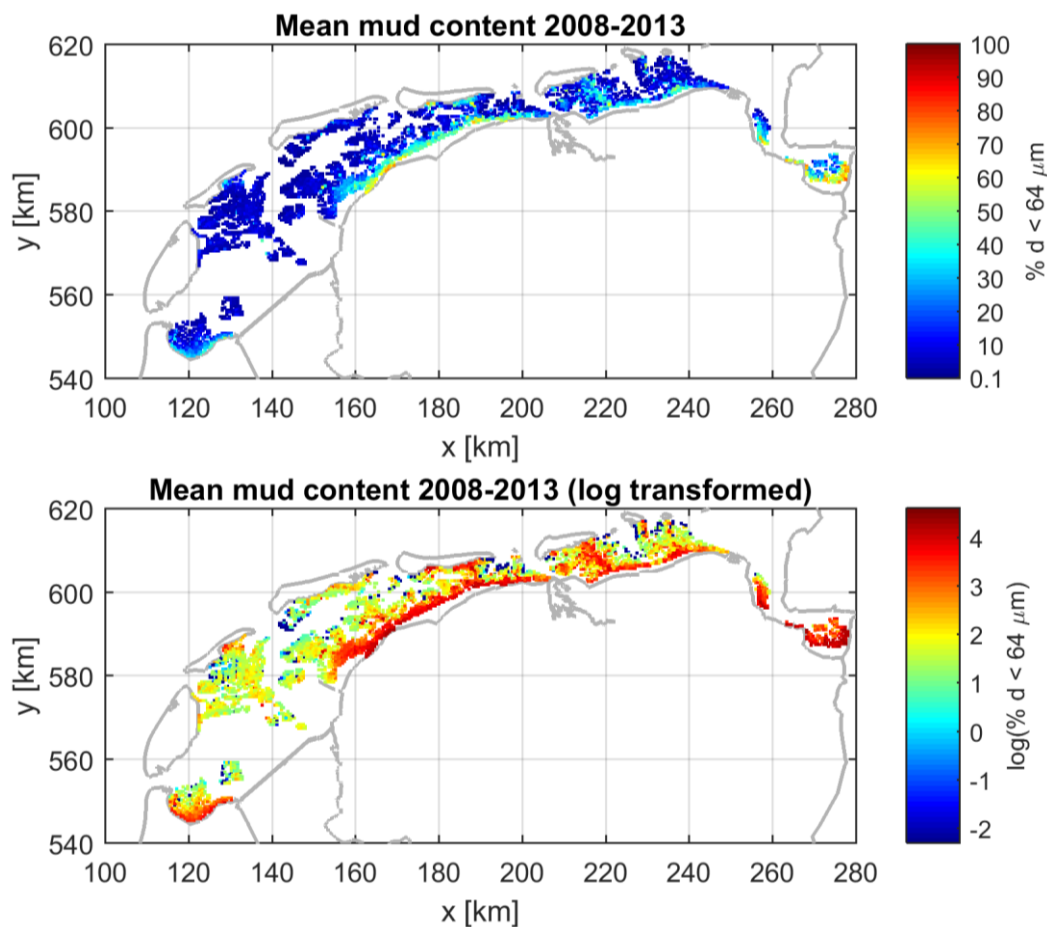
In de analyse worden alleen de locaties meegenomen die in minstens 4 jaren bemonsterd zijn (4108 punten, zie zwarte en rode punten in Bijlage A5).

Enkele gebieden zijn zeer slibrijk (bijvoorbeeld bij de vastelandskwelders) en in deze gebieden zal de variabiliteit in de absolute waarde van het slibgehalte ook groter zijn. Om de analyse niet hierdoor te laten domineren, wordt de data log-getransformeerd (door de natuurlijke logaritme van het slibgehalte te berekenen). Door deze transformatie kan de temporele variatie in de data worden bekeken onafhankelijk van de absolute waarde van het slibgehalte. De meeton nauwkeurigheid speelt dan wel een rol bij hele lage slibgehalten. Om deze meeton nauwkeurigheid te elimineren is besloten om alle punten waar in een van de jaren een slibgehalte lager dan 0,1% is gemeten buiten de analyse te houden (zie rode punten in Bijlage A5, resterend aantal locaties: 3822). De rode punten liggen allemaal dicht bij de keel van de zeegaten, hier is het slibgehalte erg laag.

#### Resultaten SIBES

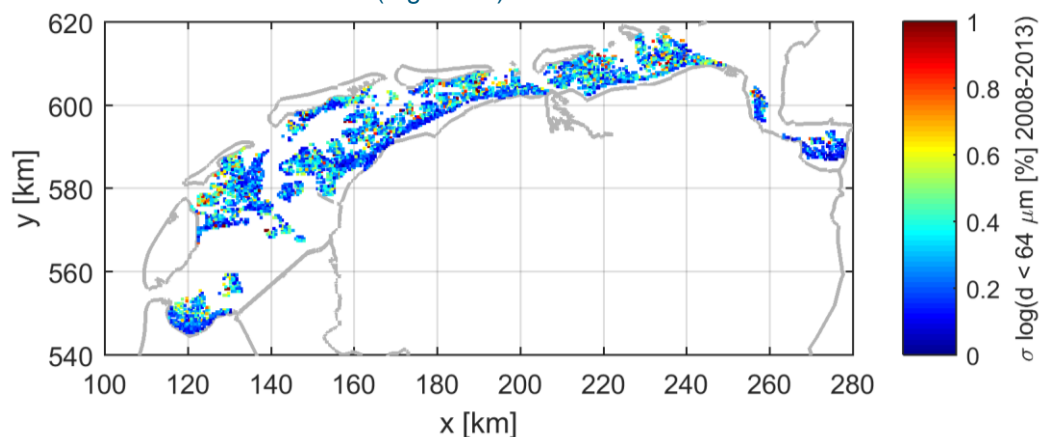
Figuur 12 laat het gemiddelde slibgehalte over de tijd zien, voor de niet getransformeerde data (bovenste figuur) en de log-getransformeerde data (onder). Hierbij zijn alle locaties meegenomen met minimaal 4 waarnemingen, dus ook de locaties met slibgehaltenes lager dan 0,1%. Het tweede figuur laat duidelijker zien welke gebieden slibrijk zijn: de vastelandskwelders, het Balgzand, de wantijen in de Oostelijke Waddenzee en de Dollard. Ook is te zien dat er enkele punten met een heel laag slibgehalte (blauw in onderste figuur) zijn. Dit zijn de locaties waar ook af en toe slibgehaltenes lager dan 0,1% optreden.





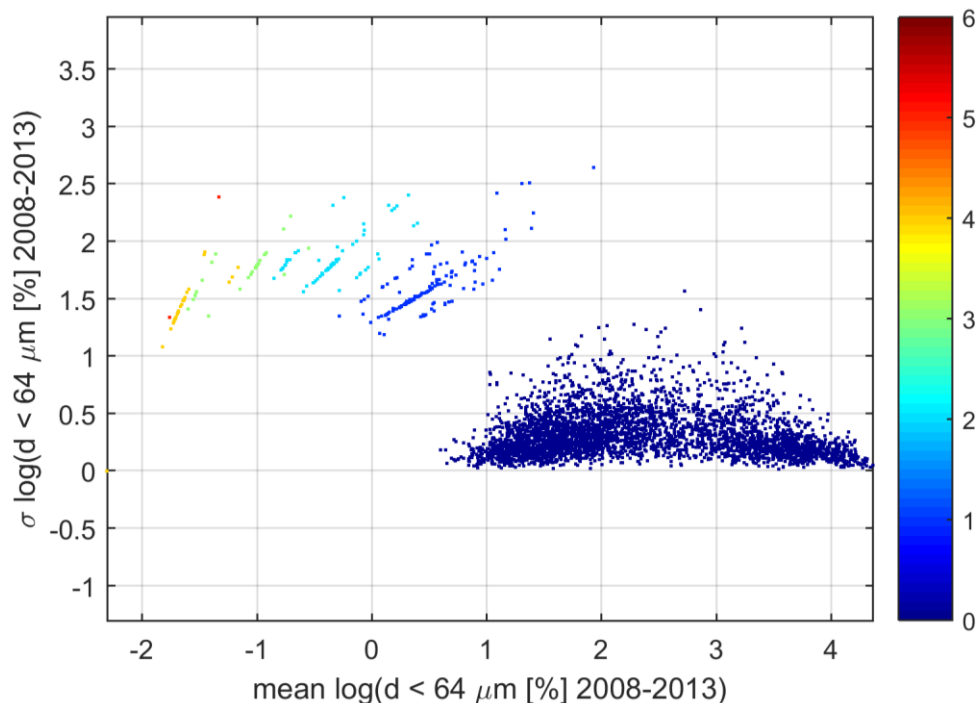
Figuur 12: Gemiddeld slibgehalte over de jaren. Boven: absolute waarden (in %, niet getransformeerd), onder: log-getransformeerde data.

Om inzicht te krijgen in de variabiliteit van het slibgehalte over tijd, is de standaarddeviatie van de log-getransformeerde data berekend (Figuur 14).



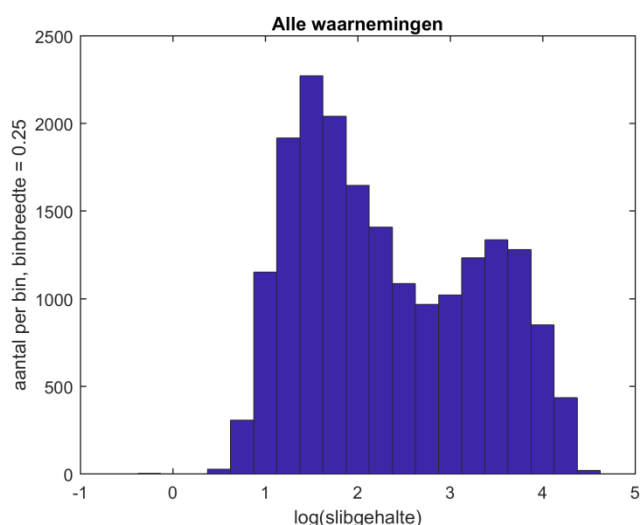
Figuur 13: Standaarddeviatie van het log-getransformeerde slibgehalte over de jaren voor locaties met minimaal 4 waarnemingen en slibgehalte > 0.1%.

Opvallend is dat bij zowel de punten met lage als hoge slibgehalten (Figuur 12) de standaarddeviatie laag is (Figuur 13). Dit is weergegeven in Figuur 14.



Figuur 14: Gemiddeld log-getransformeerde slibgehalte uitgezet tegen de standaarddeviatie, voor locaties met minimaal 4 waarnemingen. De kleurenbalk geeft het aantal waarnemingen met een waarde < 0.1%.

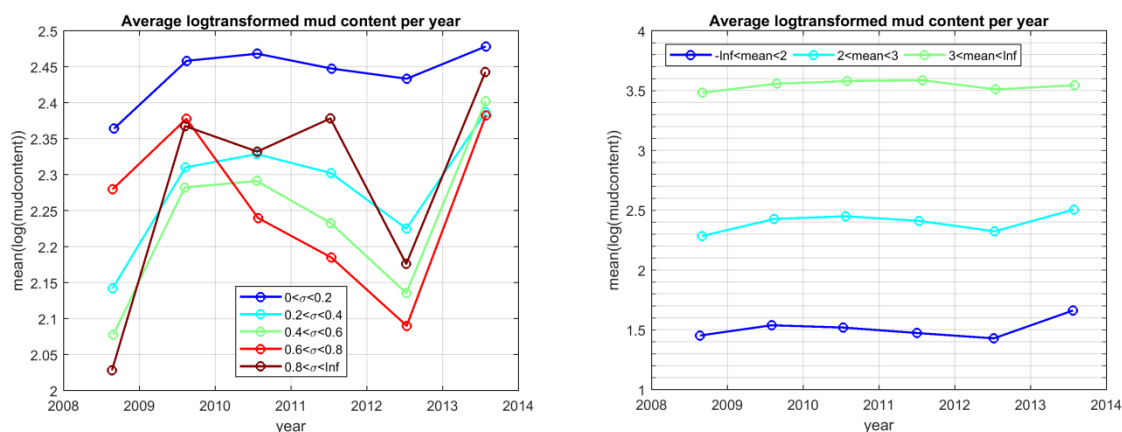
Voor punten met een gemiddeld slibgehalte (tussen 2 en 3 op logschaal) is de standaarddeviatie hoger. Blijkbaar zijn die punten niet stabiel in de tijd en zijn het ook minder punten. Dit is goed terug te zien in het histogram (Figuur 15), dat het aantal waarnemingen per slibgehalteklasse geeft. Er is een bimodale verdeling zichtbaar, met veel punten met lage slibgehaltenes en veel punten met hoge slibgehaltenes.



Figuur 15: Aantal waarnemingen per slibgehalteklasse. Klassen lopen van -1 tot 5 en hebben een breedte van 0.25.

Als het gemiddelde slibgehalte berekend wordt per klasse van het gemiddelde, is te zien dat slibrijke gebieden relatief weinig temporele variatie laten zien. De groene lijn in het rechter figuur (Figuur 16),

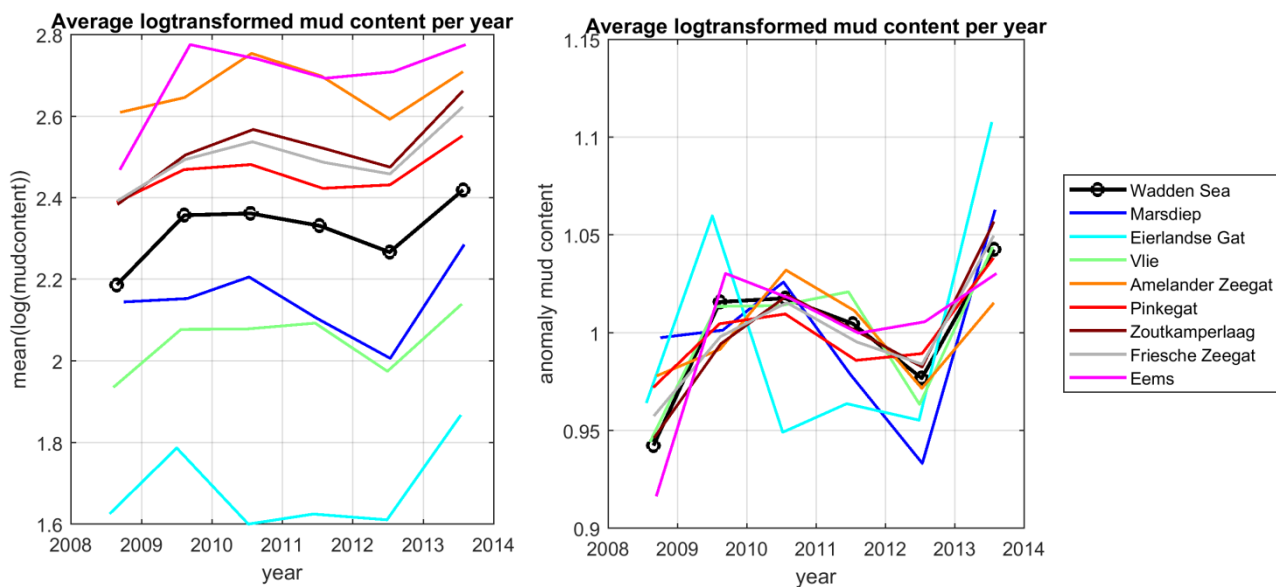
representatief voor locaties met een gemiddeld slibgehalte groter dan 3, vertoont minder variatie over de tijd dan de andere 2 lijnen. Echter, de gebieden met een laag slibgehalte, vertonen een vergelijkbare variatie in de tijd als de gebieden met een gemiddeld slibgehalte.



Figuur 16: Gemiddelde log-getransformeerd slibgehalte per klasse van de standaarddeviatie (links) en per klasse van het gemiddelde (rechts).

Uit Figuur 16 (links) blijkt dat het temporele verloop van de verschillende klassen van standaarddeviatie vergelijkbaar is, met een dip in slibgehalte in 2012. Dit betekent dat dit gedrag door de gehele Waddenzee is opgetreden, en onafhankelijk is van het absolute slibgehalte of de mate van temporele variatie in het slibgehalte.

In Figuur 17 zijn de slibgehalten van de Waddenzee weergegeven. Deze figuur toont zowel voor de gehele Waddenzee als per bekken het gemiddeld log getransformeerd slibgehalte per jaar en de anomalieën per jaar. Het valt op dat de bekkens in de oostelijke Waddenzee het meest slibrijk zijn en de westelijke Waddenzee het meest zandig. In het rechterfiguur zijn de gemiddelden per bekken genormaliseerd met het gemiddelde per bekken over de tijd. Dit geeft zicht op de verandering ten opzichte van het gemiddelde. Hieruit blijkt dat het slibgehalte in 2012 in bijna alle bekkens lager was dan in de jaren 2009-2011 en 2013, afgezien van het jaar 2008 dat hierbij buiten beschouwing wordt gelaten omdat dit jaar veel minder punten bevat. Ook valt op dat het Eierlandse Gat zich heel anders gedraagt dan de andere zeegaten, met een grote relatieve temporele variatie. Dit is mogelijk het gevolg van de relatief kleine afmeting van het bekken en de afwezigheid van een begrenzing met de vastelandskust waar meestal hoge, weinig temporeel variërende slibgehalten aanwezig zijn.

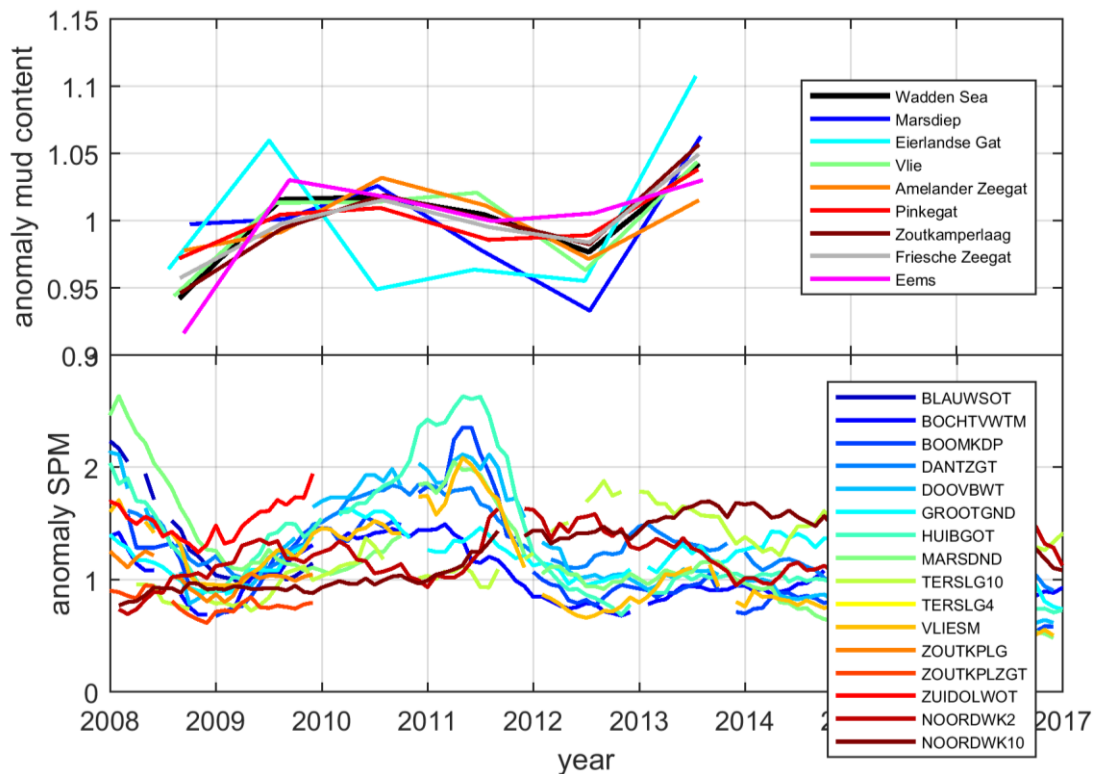


Figuur 17: Log getransformeerd slibgehalte (links) en genormaliseerd ruimtelijk gemiddeld log getransformeerd slibgehalte (rechts) per jaar per bekken en voor de gehele Waddenzee voor de gefilterde dataset

Het slib in de bodem leidt bij re-suspensie op korte termijn tot een toename van het suspendeerde slibgehalte in de waterkolom (SSC). Het is daarom interessant om te onderzoeken in hoeverre variaties in het slibgehalte in de bodem zijn gekoppeld aan variaties in het SSC. Om dat inzichtelijk te kunnen maken worden de genormaliseerde log getransformeerde gemiddelden in slibgehalte per bekken naast de genormaliseerde log getransformeerde gemiddelde SSC gezet, zie Figuur 18.

Hieruit blijkt dat er geen directe relatie is tussen fluctuaties in SSC en slib in de bodem. Vanaf 2009 nemen zowel de slibconcentraties in de waterkolom als in de bodem toe, maar vanaf halverwege 2010 nemen de slibconcentraties in de bodem alweer af, om in de waterkolom nog toe te nemen. Pas een jaar later nemen ook de slibconcentraties in de waterkolom af. Tussen 2010 en 2011 heeft dus mogelijk nalevering van slib vanuit de bodem naar de waterkolom plaatsgevonden maar dit is zeker geen gegeven.





Figuur 18: Afwijking van het slibgehalte en de SPM ten opzichte van het (langjarig) gemiddelde.

### Conclusie

Over het algemeen kan worden gezegd dat binnen de Waddenzee er gebieden zijn met lage en hoge slibgehaltenes, waarbij de bekkens in de Oostelijke Waddenzee duidelijk slibrijker zijn dan de bekkens in de Westelijke Waddenzee. Dit kwam al naar voren in de eerdere studies en wordt met de SIBES-data opnieuw aangetoond. De slibrijke gebieden bevinden zich achter in de bekkens, op de wantijen en bij de vastelandskwelders. Dicht bij de keel van de zeegaten bevinden zich locaties die hele lage slibgehaltenes laten zien, waarschijnlijk als gevolg van de ligging in ruwere hydrodynamische condities.

De analyse van SIBES-data levert ook nieuwe inzichten op. De temporele variatie in het slibgehalte over de gehele Waddenzee laat een vergelijkbaar patroon zien. Hierbij is het slibgehalte in 2008 en 2012 lager dan in de jaren 2010, 2011 en 2013. Zowel zeer slibrijke als slibarme gebieden vertonen van jaar op jaar minder variatie in het slibgehalte dan de gebieden met een 'gemiddeld' slibgehalte. Op logaritmische schaal ligt dit gemiddelde tussen 2 en 3, wat in absolute slibgehaltenes een waarde tussen de 7 en 20% inhoudt. Ook blijkt dat de variaties in SSC en slib in de bodem soms gelijk zijn (dus toe- of afname zowel in de bodem als in de waterkolom), en dat deze soms uit fase lopen.

Er kunnen geen definitieve uitspraken gedaan worden over of het slibgehalte in de bodem van de Waddenzee gemiddeld genomen is toegenomen of afgenomen over de afgelopen tientallen jaren. Dit hangt onder andere samen met verschillen in bemonsterings- en analysetechnieken door de tijd en de relatief lage frequentie van metingen in tijd en ruimte ten opzichte van de relatief grote natuurlijke dynamiek. Hiernaast is er ook geen duidelijk verband gevonden tussen het slibgehalte in de bodem en toe- en afnames van het zwevend stofgehalte in het water. De SIBES data hebben hier vooralsnog geen verandering in gebracht. Analyse van een langere reeks SIBES data kan in de toekomst meer inzicht geven in deze relatie.

### **Hypothese 3b: jaarlijkse variaties in golfintensiteit veranderen het volume slib dat opgeslagen is in de bodem en veroorzaken daarmee variaties in de hoeveelheid slib in de waterkolom**

#### Achtergrondkennis

Een storm kan ervoor zorgen dat slib dat in de bodem is opgeslagen vrijkomt in de waterkolom. Wanneer er langere tijd rustige weerscondities zijn kan de hoeveelheid opgeslagen slib in de bodem geleidelijk toenemen. Een storm na een lange periode van kalme condities zou daardoor voor een grotere toename van slibconcentraties in de waterkolom kunnen zorgen dan een storm die voorkomt vlak na een andere storm wanneer de hoeveelheid slib opgeslagen in de bodem beperkt is.

Figuur 6 (zie beschrijving hypothese 1b) toont de ontwikkeling van golfintensiteit en golfrichting over de afgelopen tientallen jaren. De golfhoogte en richting zijn stabiel over langere tijd. In Figuur 6 B en D zijn periodes van enkele jaren te onderscheiden waarin de golfintensiteit relatief hoog/laag is geweest. Het koppelen van deze golfgegevens aan slibveranderingen in de Waddenzee is mogelijk lastig omdat golven in de Waddenzee voornamelijk lokaal worden opgewekt en sterk afhankelijk zijn van windsterkte en strijklengte. Er zijn echter geen golfmeetboeien in de Waddenzee. Wij gaan er hier vanuit dat op hoofdlijnen wel kan worden gekeken naar de link tussen golfintensiteit en sediment in de Waddenzee omdat verwacht wordt dat een hogere golfintensiteit gedurende een bepaald jaar (gemeten op de Noordzee) een gevolg is van meer/grotere stormen dat jaar en daarmee impliciet ook betekent dat de golven in de Waddenzee dat jaar hoger zijn geweest.

#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

Onder hypothese 1b is al ingegaan op het feit dat er geen sterk verband lijkt te zijn tussen de golfstatistieken en de toe- en afname in slibconcentratie rond 2003 en 2011. Hierbij is echter nog niet gekeken naar effecten van weerscondities op de opslag en het vrijkomen van slib uit de bodem.

De sterke toename in slibconcentraties na 2003 zou kunnen worden verklaard wanneer de golfcondities voor 2003 lange tijd rustig zijn en er veel slib opgeslagen is in de bodem. Uit de golfstatistieken (Figuur 6) blijkt echter dat in de periode vlak voor 2003 de golfintensiteit niet zeer laag was en dat er na 2003 geen sterke toename in golfhoogtes is. Daarom is het onwaarschijnlijk dat er rond 2003 extreem veel slib in de bodem was opgeslagen wat sinds 2003 is vrijgekomen.

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

Zoals besproken onder hypothese 1b kunnen pieken en dalen in de slibconcentratie niet eenduidig worden gecorreleerd aan de golfintensiteit.

#### Conclusie

Er lijkt geen sterk verband te zijn tussen de golfstatistieken en de toe- en afname in slibconcentraties. Probleem hierbij is wel dat golfstatistieken van de Waddenzee niet bekend zijn en er gewerkt wordt met Noordzee gegevens. De toename in gemiddelde golfhoogte tussen 2001 en 2007 zou kunnen hebben bijgedragen aan de toename in slibconcentraties, maar verklaart niet de verdere toename na 2007. Bepaalde pieken in slibconcentraties zouden kunnen zijn ontstaan tijdens stormen, maar individuele pieken in stormcondities en slibconcentraties zijn niet eenduidig te linken.

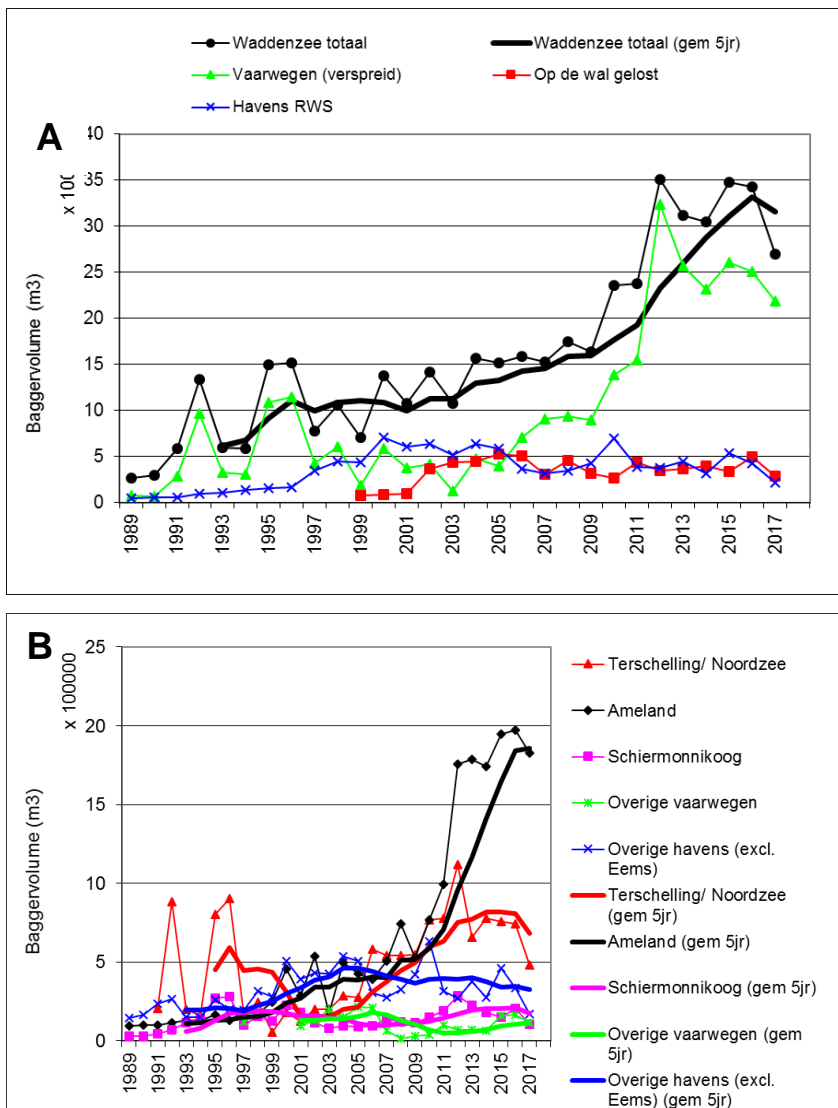
### **Hypothese 3c: toe- en afnames in het voorkomen van baggerpluimen en bodemverstoring gerelateerd aan baggeren en storten veroorzaken variaties in de slibconcentratie in de waterkolom**

#### Achtergrondkennis

Door verstoring van de bodem bij baggeren en door sedimentpluimen die ontstaan bij het verspreiden zou de slibconcentratie in het water kunnen stijgen. Een toename in bagger- en stortvolumes zou daarom mogelijk een toename in de slibconcentratie in de Waddenzee kunnen verklaren. Tegelijkertijd kan een toename in sedimentconcentraties ook voor een toename in sedimentatie zorgen en daarmee voor een toename in baggerwerk. Bij het verbinden van baggerwerkzaamheden aan sedimentconcentraties kan dus twee kanten op geredeneerd worden. Dit maakt het lastig om directe relaties te leggen. In onderstaande tekst wordt daarom alleen op hoofdlijnen gekeken naar grove overeenkomsten die er mogelijk zijn tussen jaarlijkse baggervolumes en jaarlijks variërende sedimentgehalten.

In de Waddenzee worden havens en vaarwegen gebaggerd door zowel Rijkswaterstaat als private partijen. Het totale volume dat gebaggerd wordt door Rijkswaterstaat in de Waddenzee en Eems steeg langzaam tussen 1990 en 2008 en nam daarna snel toe (Figuur 19A, figuur is exclusief Eems) (H. Mulder, 2018). De snelle toename na 2008 hangt met name samen met een toename van het baggervolume bij de veerverbinding naar Ameland, de Eems en de verbinding Harlingen-Noordzee (Figuur 19B), figuur exclusief Eems) (H. Mulder, 2018). Rond 1991/1992 en 1995/1996 zijn er 2 pieken in het totale baggervolume die samenhangen met een toename van het baggervolume bij de veerverbinding Terschelling/Vlieland (Figuur 19A en B). De hoeveelheden gebaggerd door private partijen zijn niet meegenomen omdat deze gegevens niet volledig zijn.

De gegevens met betrekking tot baggervolumes zijn niet direct te vergelijken met sedimentconcentraties in de Waddenzee. Het maakt uit of er voornamelijk zand of slib wordt gebaggerd, wat de afstand is van de verspreidingslocaties tot de meetpunten (als er naar specifieke gebeurtenissen en pieken wordt gekeken) en welke strategie er door de aannemers wordt gehanteerd (op tijd en/of extra diep wegbaggeren of minimaal wegbaggeren). De strategie van de aannemers is vooral van belang bij het kijken naar een verband tussen verhoogde sedimentconcentraties in het water en als gevolg daarvan verhoogde sedimentatie in havens en vaarwegen waardoor de baggerwerkzaamheden toenemen. Soms wordt er meer volume gebaggerd. Dit kan het gevolg zijn van versterkte sedimentatie in het jaar daarvoor (inhalen van baggerwerkzaamheden) of alvast extra diepte baggeren voor de komende tijd. Meer baggeren betekent in dit geval dus niet dat er ook meer sedimentatie heeft plaatsgevonden.



Figuur 19 Baggergegevens Waddenzee (bron: H. Mulder). A: Bagger- en verspreidingsvolumes RWS gehele Waddenzee. B: Baggervolume niet-RWS gehele Waddenzee (NB data onvolledig dus alleen indicatief). C: Baggervolumes RWS per gebied in de Waddenzee.

#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

De toename in bagger volumes start al rond 1996 en er is geen plotselinge verandering in de bagger volumes zichtbaar rond 2002/2003 (Figuur 12). De toename van de slibconcentratie tussen 2003 en 2011 is dus niet alleen te verklaren met een toename in baggeractiviteit. Echter, de baggerintensiteit neemt wel toe tussen 2003 en 2011 en zou daarmee een deel van de toename in slibconcentratie kunnen verklaren of vice versa.

De trend door de tijd van het volume verspreiding bij vaarwegen (Figuur 19A) toont tussen 2003 en 2018 veel overeenkomst met waargenomen veranderingen in slibconcentraties in de waterkolom (vergelijk met een toename sinds 2003 en afname sinds 2011). Echter de hogere verspreidingsvolumes in 1992 en 1995-1996 vallen niet samen met hogere slibconcentraties die voorkomen in de periode 1990-2003 (vergelijk Figuur 19 en Figuur 2, uitzondering is het jaar 1995, maar dit wordt gevolgd door het jaar 1996 met een lage slibconcentratie in de waterkolom). Van de hogere pieken in 1992 en 1995-1996 weten we niet welk materiaal is gebaggerd. Mogelijk is veel zand gebaggerd of lokaal een geul sterk uitgebaggerd

waardoor de toename van slib in het water minimaal en/of zeer lokaal is en daarom niet direct terug te zien in de sedimentconcentraties in het water welke in deze studie heel algemeen worden bekeken als jaarlijkse gemiddelden.

Al met al lijken baggervolumes en met name verspreidingsvolumes relatief veel overeenkomsten te tonen met trends in de slibconcentratie. Op basis hiervan kan echter niet geconcludeerd worden dat de slibconcentraties zijn toegenomen tussen 2003 en 2011 als gevolg van baggeractiviteiten of dat hogere/lagere sedimentconcentraties hebben geleid tot hogere/lagere baggervolumes.

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

De metingen bij het Zeegat van het Vlie (VLIESM) (Appendix A2.2) tonen geen effecten van de pieken in baggervolume rond 1991/1992 en 1995/1996 gerelateerd aan de veerverbinding Terschelling/Vlieland (Figuur 19). Het verspreidingsvak lag in de buurt van de meetlocatie maar het ging in dit geval voornamelijk om zand dat gebaggerd is, waardoor het logisch is dat de sedimentconcentratie niet duidelijk is toegenomen.

#### Conclusie

Trends in bagger- en verspreidingsactiviteiten vertonen relatief veel overeenkomsten met toe- en afnames van de slibconcentratie in de Waddenzee. De interactie van baggeren en sedimentconcentraties werkt twee kanten op. Hogere sedimentconcentraties zorgen voor meer sedimentatie in havens en vaarwegen en daardoor een groter baggerbezwaar. Meer baggerwerkzaamheden leiden t.g.v. de verspreiding op verspreidingslocaties vervolgens ook tot hogere sedimentconcentraties in het water, in ieder geval lokaal. Het is lastig te bepalen of over een groter deel van de Waddenzee een stijging van de sedimentconcentratie een gevolg is van een toename van het baggerwerk. O.a. omdat veel andere processen tot een toename van sedimentconcentratie kunnen leiden (zoals besproken in voorliggend rapport) en daarmee tot meer baggerwerk, maar ook omdat een deel van het baggerwerk uit zandig materiaal bestaat en er niet altijd 1 op 1 wordt gebaggerd (strategie baggeraar). Losse pieken en dalen komen in ieder geval niet overeen.

### **Hypothese 3d: veranderingen in de ligging van geulen en platen beïnvloeden de mate waarin slib in de bodem is opgeslagen en veroorzaken daarmee variaties in de slibconcentratie in de waterkolom**

#### Achtergrondkennis

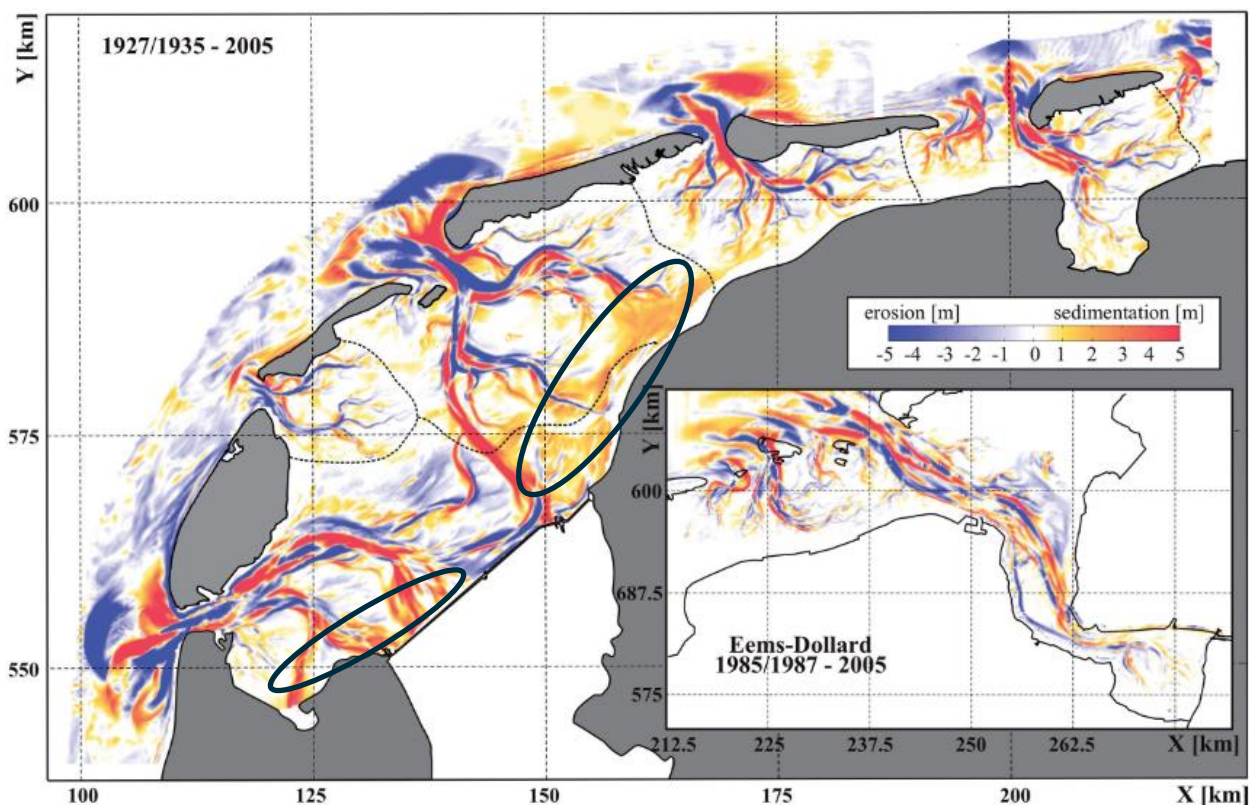
Sedimentatie en erosie van geulen en platen kan ervoor zorgen dat slib wordt opgeslagen in de bodem of juist vrijkomt. Hoeveel slib wordt opgeslagen of vrijkomt in een gebied hangt samen met de mate van morfologische veranderingen en de slibconcentratie in de bodem.

Morfologische veranderingen in de Waddenzee worden in kaart gebracht door middel van vaklodingen. Vaklodingen data van Rijkswaterstaat is verkrijgbaar vanaf 1925-1935 afhankelijk van het komgebied (Elias en Wang, 2013). Sinds 1987 wordt elk komgebied eens in de 6 jaar ingemeten met 'single beam echo sounders'. De data wordt geïnterpoleerd op een 20x20m grid. De verticale nauwkeurigheid is geschat op 0.11-0.40m (Wiegmann et al., 2005; Perluka et al., 2006 in Elias en Wang, 2013).

Figuur 11 toont de slibconcentraties in de bodem rond 1967 en 1990. Zoals beschreven onder hypothese 3a is de ligging van slibrijke en slibarme bodems in de Waddenzee grofweg gelijk gebleven m.u.v. gebieden waar grote morfologische veranderingen hebben plaatsgevonden. Slibconcentraties zijn met name hoog langs de vastelandskust en rond de wantijen.

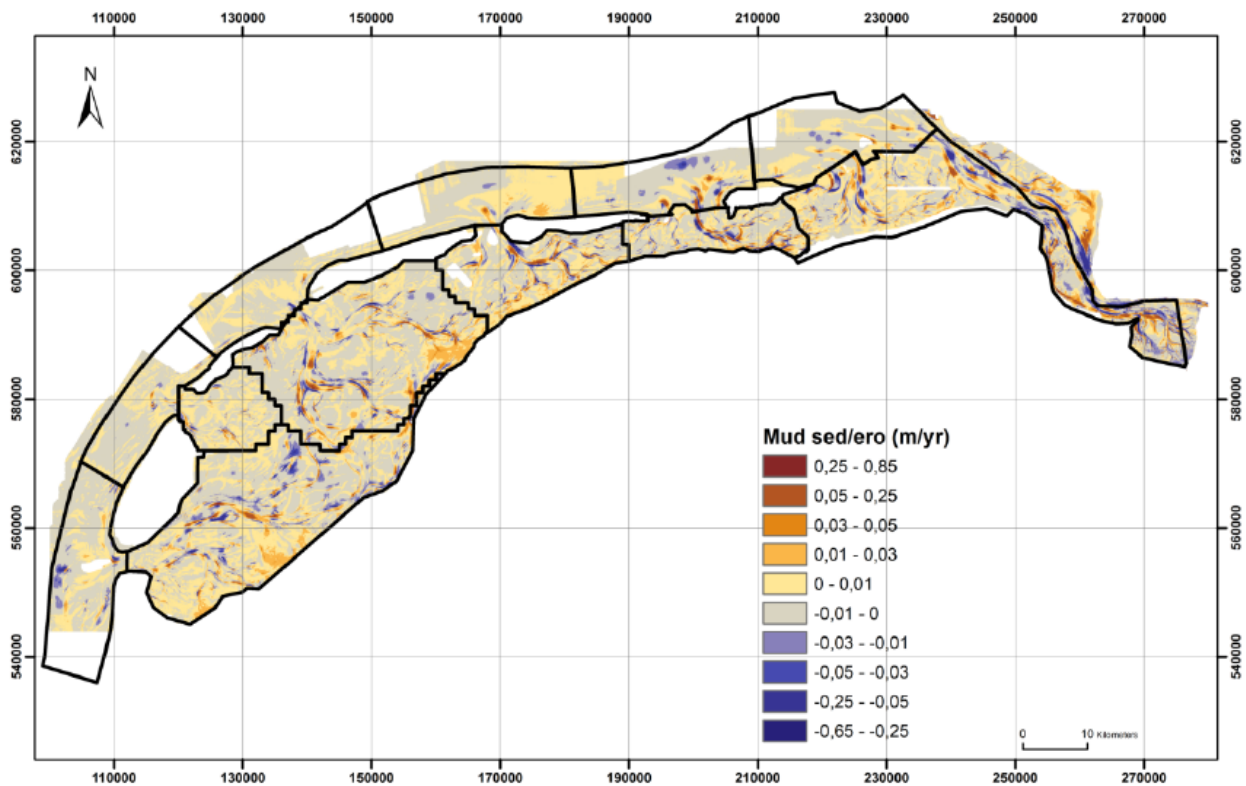


Figuur 20 toont grootschalige sedimentatie- en erosiepatronen in de Waddenzee over de afgelopen eeuw. Belangrijke slibsedimentatiegebieden die op basis hiervan zijn aan te wijzen zijn het Balgzand, Lutjeswaard en Kornwerderzand in het Marsdiep en de Vlakte van Oosterbierum aan de vastelandszijde van het Vlie (Figuur 20, zwarte cirkels).



Figuur 20 Sedimentatie en erosie in de Waddenzee tussen 1927/1935 en 2005 (Eems-Dollard 1985/1987-2005) (Elias et al., 2012). Zwarte cirkels geven belangrijke slibsedimentatiegebieden aan.

De Vries (2018) heeft erosie en sedimentatie van slib tussen 1990 en 2008 bepaald door bodemhoogteverschillen tussen 91/97 en 03/08 (exacte jaartal verschilt per komgebied) te vermenigvuldigen met slibgehalten in de bodem op basis van de Sedimentatlas (bemonstering rond 1990). Uit de analyse blijkt dat in sedimentatiegebieden het percentage slib in de bodem over het algemeen hoog was. Een uitzondering is de Eems-Dollard waar slibgehalten hoog zijn, maar waar de bodem niet is toegenomen in hoogte. Sedimentatie van slib komt met name voor in het zuidoostelijk deel van het Marsdiep bekken (oostkant van het Balgzand en langs de afsluitdijk bij de Lutjeswaard en Javaruggen) en aan de oostkant van het Vlie bekken (Friese Wad voor de kwelderwerken). Dit komt overeen met de inschatting van slibsedimentatie op basis van morfologische veranderingen tussen 1927/1935 en 2005 (zie boven). De meeste erosie van slib vond plaats in het noorden van het Marsdiep (Figuur 21). In alle bekkens (exclusief de kwelders) vond netto slibsedimentatie plaats van dezelfde orde grootte (0 tot  $0.5 \text{ Mm}^3$ ) als de hoeveelheid slib die sedimenteert in de kwelders. Dit wordt ook geconcludeerd in Cleveringa (2018). In dat rapport wordt tevens aangegeven dat slibvangst in kwelders een grote rol speelt terwijl deze gebieden en sommige slibrijke voorliggende wadplaten vrijwel niet zijn meegenomen in de vaklodingen. Bij een analyse via de vaklodingen mist dus een flink deel van het slib sedimentbudget.



Figuur 21 Erosie- en sedimentatiesnelheden van slib in de Waddenzee in de periode 1991/1997 tot 2002/2008. Berekening gebaseerd op vermenigvuldigen geïnterpoleerde slibkaart o.b.v. de Sedimentatlas (RWS, 1998, bemonstering in 1989-1996) en bathymetrie op basis van Vaklodingen.

#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

De frequentie en nauwkeurigheid van de vaklodingen (opname vindt slechts 1x per 6 jaar plaats) maken het lastig om korte termijn schommelingen over enkele tientallen jaren te kunnen verklaren.

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

Er zijn niet genoeg bathymetriemetingen beschikbaar om korte periodes (<3 jaar) met hogere of lagere slibconcentraties te kunnen verklaren aan de hand van morfologische veranderingen. Over het algemeen vindt slibsedimentatie plaats in al slibrijke gebieden omdat dit gebieden zijn met luwte. Het duurt even voordat het nieuw gesedimenteerde slib sterkte heeft opgebouwd en hierdoor is het in eerste instantie gemakkelijk om dit slib te re-suspenderen. Het ligt daarom in lijn der verwachting dat in slibrijke gebieden de sedimentconcentratie in het water ook gemiddeld genomen hoger is dan in zandige gebieden. In voorliggende studie is echter niet naar deze meer lokale effecten gekeken.

#### Conclusie

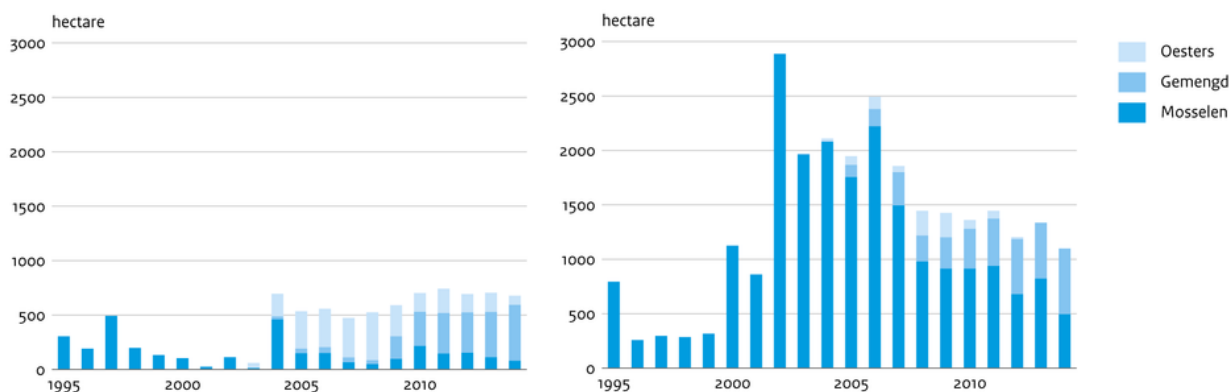
Er zijn geen duidelijke verbanden gevonden tussen veranderingen in bathymetrie en het slibgehalte in het water. Dit hangt voor een groot deel samen met de lage frequentie en nauwkeurigheid van de vaklodingen, vooral nu is gebleken uit Cleveringa (2018) dat juist de gebieden die als grote bron en put van slib kunnen fungeren (de kwelders en sommige wadplaten), niet zijn opgenomen in de vaklodingen.

### Hypothese 3e: veranderingen in de biomassa filtervoeders op de bodem van de Waddenzee veranderen de sedimentsamenstelling en -eigenschappen (korrelgrootte, valsnelheid) en daarmee de slibopslag in de bodem en variatie in slibconcentratie in het water

#### Achtergrondkennis

Mossels, oesters en kokkels zijn suspension-feeders. Suspension-feeders zorgen voor verhoogde slibsedimentatie door het produceren van (pseudo)-faeces (Groenewold en Dankers, 2002). Suspension-feeders spelen een belangrijke rol bij biodepositie van slib. In de Waddenzee is onderzocht dat mosselbanken gemiddeld 443 mg POC (particulaire organische koolstof) per m<sup>2</sup> per uur vastleggen.

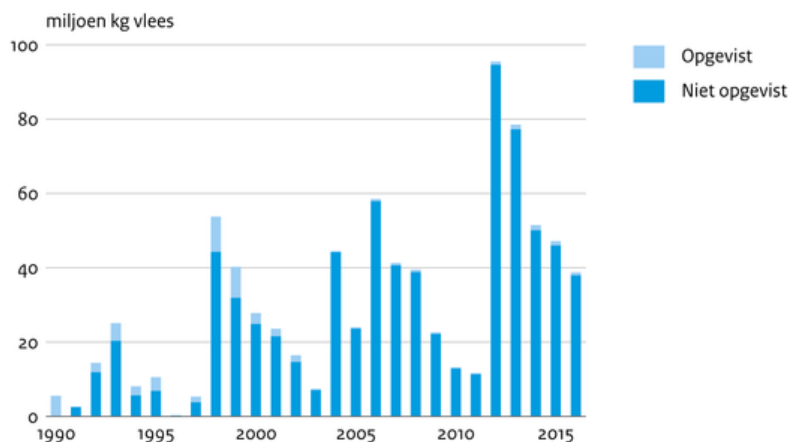
Rond 1990 waren er nagenoeg geen mosselbanken meer in de Waddenzee (CLO, 2017). Tussen 1990 en 2000 is het areaal mosselbanken op droogvallende platen weer toegenomen. Rond 2003 (westen 2004, oosten 2002) is het gezamenlijke areaal van oesters en mosselen sterk toegenomen (Figuur 22). In de oostelijke Waddenzee nam dit areaal tussen 2006 en 2014 af.



Figuur 22 Areaal mossel- en oesterbanken in de westelijke (links) en oostelijke (rechts) Waddenzee tussen 1995 en 2014 (Wageningen Marine Research, 2017 via CLO, 2017).

De biomassa kokkels in de Waddenzee schommelt sterk over de tijd (Figuur 23). Dit heeft te maken met de broedval (CLO, 2017). Bij goede broedval is de biomassa kokkels in de jaren erna groot en neemt dan weer langzaam af. In strenge winters (o.a. 1995/1996) vindt veel sterfte plaats.





Figuur 23 Biomassa kokkels in de Waddenzee tussen 1990 en 2016 (Wageningen Marine Research, 2017 via CLO, 2017).

#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

Tussen 2001 en 2004 neemt de hoeveelheid filtervoeder oesters, mosselen en kokkels gezamenlijk sterk toe, maar sinds 2004 neemt deze ook weer af (Figuur 22; Figuur 23), terwijl de toename in slibconcentratie doorgaat tot ongeveer 2011 (Figuur 2; Figuur 3; Figuur 4). Deze toe- en afname lijkt dus niet direct te correleren met toe- en afname in slibconcentratie.

De basisconcentratie slib (Figuur 4) is hoger rond dezelfde periode dat er weer meer filtervoeders zijn. Het is echter niet de verwachting dat dit samenhangt, omdat filtervoeders juist zorgen voor verhoogde slibsedimentatie en dus naar verwachting leiden tot lagere slibconcentraties in de waterkolom.

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

De pieken en dalen in de hoeveelheid filtervoeders komen niet eenduidig overeen met pieken en dalen in de slibconcentratie (Figuur 3; Figuur 4; Figuur 22; Figuur 23).

#### Conclusie

Het is niet met zekerheid te zeggen in hoeverre toe- en afnames in het aantal filtervoeders slibconcentraties in het water hebben beïnvloed. Het effect van filtervoeders op de slibconcentraties lijkt gering.

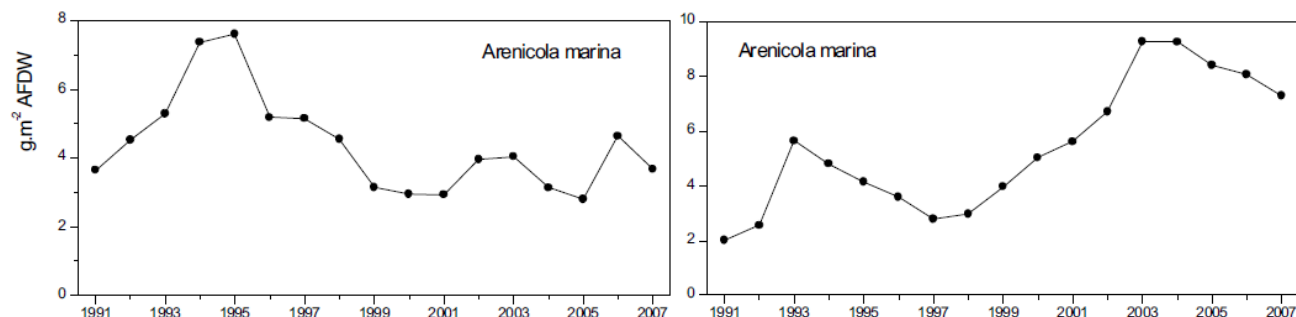
#### **Hypothese 3f: veranderingen in de bioturbatie-intensiteit veroorzaken variaties in de opslag van slib in de bodem en daarmee de slibconcentratie in de waterkolom**

##### Achtergrondkennis

Deposit-feeders hebben door bioturbatie (omwoeling) en (omwerking) invloed op slibgehalten van het sediment (Groenewold en Dankers, 2002). Daarnaast kunnen ze sortering van het sediment veranderen en ze kunnen slibdepositie stimuleren door het verhogen van ruwheid dicht boven de bodem. Bioturbatie en omwerking kunnen er zowel voor zorgen dat slib aan de oppervlakte komt en makkelijker re-suspendeert als dat gesedimenteerd slib dieper in de bodem terecht komt.

De Wadpier (*Arenicola marina*) is een deposit-feeder en is een belangrijke bioturbator: ze kunnen per jaar tot ongeveer 30 cm verticaal het sediment omwoelen (Groenewold en Dankers, 2002). Wadpieren (*Arenicola Marina*) komen alleen in significante hoeveelheden voor op het Balgzand en de Piet Scheveplaat (Dekker en Waasdorp, 2008). Op het Balgzand is de biomassa Wadpieren constant tussen

1991 en 2007 met uitzondering van de periode 1994-1995 (Figuur 24). De biomassa Wadpieren laat een stijgende trend zien op de Piet Scheveplaat, maar ging tussen 2003 en 2007 achteruit.



Figuur 24 Ontwikkeling van de biomassa in gram asvrij drooggewicht per m<sup>2</sup> van de Wadpier (*Arenicola marina*) op drie bemonsterde raaien op het Balgzand (links) en de Piet Scheveplaat (rechts) tussen 1991 en 2007 (Dekker en Waasdorp, 2008).

#### Verklaring van globale trend in Waddenzee: toename vanaf 2003 en afname rond 2011?

De trend in het voorkomen van de Wadpier verschilt tussen de locatie op Balgzand en de Piet Scheveplaat (Figuur 24). Bovendien is er rond 2002/2003 geen grote omslag in de hoeveelheid Wadpieren. De globale trend in slibconcentratie in de Waddenzee lijkt daarom niet sterk gerelateerd aan variaties in bioturbatie door Wadpieren.

#### Verklaring van overige variaties in slibconcentratie?

De pieken en dalen in biomassa Wadpieren bij het Balgzand en de Piet Scheveplaat correleert niet met schommelingen in slibconcentraties in de bijbehorende komgebieden Marsdiep en Borndiep.

#### Conclusie

Met de huidige gegevens is niet met zekerheid te zeggen in hoeverre toe- en afnames in het aantal Wadpieren slibconcentraties in het water hebben beïnvloed.

## 5 Conclusies en aanbevelingen voor beleid en beheer

### 5.1 Conclusies

De sedimentconcentratie in de Waddenzee is een gevolg van de complexe interactie tussen verschillende processen en activiteiten op verschillende tijd- en ruimteschalen. In voorliggend rapport is geprobeerd deze interacties zichtbaar te krijgen. Hierbij is in eerste instantie gebruik gemaakt van de beschikbare MWTL-monitoringsgegevens van sedimentconcentratie in het water. Vervolgens is geprobeerd om deze te verklaren aan de hand van andere beschikbare gegevens, zoals SIBES-data, meteorologische data en ecologische data, tezamen met de kennis zoals die beschikbaar is bij Deltares, RWS, Arcadis en Royal HaskoningDHV. Er is voor deze studie geen nieuwe data verzameld. In studies uit het verleden is ook gekeken naar sedimentconcentraties in de Waddenzee en de variaties hierin. Voorbeelden van dit soort studies zijn Kessel et al. (2010), Philippart et al. (2012), Blaas en Van den Boogaard (2006), Dronkers (2005), Maiwald en Verhagen (1991). In voorliggende studie zijn de meest recente MWTL-gegevens opgenomen en is de SIBES data gebruikt. Deze laatste was eerder nog niet beschikbaar. Daarnaast onderscheidt deze studie zich door de analysemethode waarbij op hoofdlijnen naar de data wordt gekeken door de data te log-transformeren en anomalieën (afwijking t.o.v. het langjarig gemiddelde) te bepalen. Hierdoor kunnen gemakkelijker patronen worden herkend.

Er is gebruik gemaakt van MWTL-gegevens vanaf 1990. In de periode voor 1990 zijn andere methodes gebruikt waardoor deze data niet te vergelijken is. Omdat pas vanaf 1990 is gekeken zijn veranderingen t.g.v. grootschalige afsluitingen zoals die van de Zuiderzee en de Lauwerszee, niet meegenomen. Hiervan is wel bekend dat ze tot grote morfologische veranderingen hebben geleid en dat de Friese kust t.g.v. het afsluiten van de Zuiderzee een veel hoger slibgehalte heeft gekregen.

In grote lijnen kan worden geconcludeerd dat de vele aspecten die worden genoemd in deze studie mogelijk allemaal bijdragen (in kleinere of grotere mate) maar dat voor geen enkel aspect hard geconcludeerd kan worden dat er een direct verband is met de sedimentconcentratie. Voor een deel komt dit omdat Waddenzee breed wordt gekeken naar de grootschalige veranderingen in sedimentconcentraties (als een gevolg van de beschikbare data). Het is lastig om dit te koppelen aan processen waarvan verwacht wordt dat ze vooral op kleinere schaal effect zullen hebben (bijvoorbeeld baggerwerkzaamheden, veranderingen in kwelderbeheer). Van grootschalige processen, zoals meteorologische veranderingen, wordt wel verwacht dat dit terug is te zien in de sedimentconcentraties. Ook hiervoor is echter gebleken dat er geen duidelijke relaties te vinden zijn. Waarschijnlijk omdat alle verschillende processen een bepaalde mate van invloed hebben en dat juist die interactie van processen de uiteindelijke sedimentconcentratie in de Waddenzee bepaalt.

Opvallend in de analyse van de MWTL-gegevens zijn de langere periodes met hogere en/of lagere sedimentconcentraties in het water t.o.v. het langjarig gemiddelde. Dit is duidelijk te zien als de data wordt log-getransformeerd en de anomalie vervolgens wordt bepaald. Blijkbaar zijn er grootschalige processen die zorgen dat het systeem als het ware wordt opgeladen met sediment waardoor er langere tijd gemiddeld hogere concentraties aanwezig zijn. Dit speelt bijvoorbeeld in de periode 2006 – 2011 waar de gemiddelde sedimentconcentratie in de gehele Waddenzee hoger is dan in de periode daarvoor. Na 2011 neemt deze hogere gemiddelde concentratie weer af.

Verder valt op dat de sedimentconcentraties in de Noordzee significant lager zijn dan in de Waddenzee, maar dat de orde grootte van de relatieve schommelingen in concentraties vergelijkbaar is met die in de Waddenzee. Tevens loopt de verhoging van de sedimentconcentraties in de Waddenzee niet synchroon

met die in de Noordzee, ook volgt hij niet op de Noordzee. Het is juist zo dat de langdurig hogere gemiddelde concentratie in de Waddenzee eerder aanwezig is dan de hoge concentratie in de Noordzee.

Er zijn verschillende effectrelaties onderzocht. Zo is er gekeken naar het samenhangen van de sedimentconcentraties in het water met o.a. de golfintensiteit (aantal en grootte van stormen), aanwezigheid van kwelders, veranderingen in arealen filter-feeders, biomassa benthos en baggerwerkzaamheden. Voor al deze aspecten geldt dat er geen overduidelijke relaties zijn gevonden. Wij gaan ervan uit dat deze relaties er veelal wel zijn maar dat ze op verschillende tijd en ruimteschalen werken en daarnaast additief zijn. Oftewel, ze doen allemaal in bepaalde mate mee en hun effecten kunnen bij elkaar opgeteld worden en leiden op die manier tot een verhoging of verlaging van de sedimentconcentratie. Specifiek kan over deze aspecten nog het volgende worden gemeld:

- De golfintensiteit (aantal en grootte van stormen) lijkt invloed te hebben op de gemiddelde sedimentconcentraties. Er is geen overduidelijk verband.
- De kwelders met pré-pionier en pionier zone vormen een grote mogelijke bron van sediment. Het beheer en onderhoud van de kwelders is echter lokaal altijd zeer verschillend geweest waardoor op sommige plekken kwelders aangroeiden terwijl tegelijkertijd op andere plekken kwelders erodeerden. Het is hierdoor lastig om de gemiddelde sedimentconcentratie te koppelen aan de aanwezigheid en grootte van de kwelders. Het is de veronderstelling dat hoge- en lage sedimentconcentraties in ieder geval in enige mate samenhangen met het areaal aan kwelders dat op zijn beurt samenhangt met beheer- en onderhoud maar ook met pieken en dalen in de gemiddelde hoogwaterstanden (GHW). Aangroei van kwelders vindt over het algemeen plaats bij een dal in GHW en erosie van kwelders bij een piek in GHW.
- Veranderingen in arealen filter-feeders, biomassa aan benthos en slibgehalten in de bodem zullen allemaal in enige mate bijdragen aan de sedimentconcentratie in het water. In alle gevallen is het netto-effect van het specifieke aspect klein omdat de andere aspecten op hetzelfde moment in een andere richting kunnen werken, bijvoorbeeld het invangen van slib door de filter-feeders wordt tegelijkertijd teniet gedaan door het omwoelende effect van de benthos.
- Voor baggerwerkzaamheden geldt specifiek dat ze in eerste instantie een lokaal effect hebben. Baggeren zorgt er wel voor dat slib continu in suspensie gebracht wordt en gemakkelijk getransporteerd kan worden of opnieuw sedimenteert en vervolgens weer wordt gebaggerd. Vooral ook omdat het gebaggerde materiaal veelal in de directe omgeving wordt verspreid. Dit zorgt voor een continue rondgang van sediment. Het is mogelijk dat dit op termijn tot grotere sedimentconcentraties kan leiden op grotere schaal. Dit is echter niet met de huidige dataset aan te tonen omdat dan in eerste instantie naar specifieke locaties moet worden gekeken. Daarnaast zijn baggergegevens altijd lastig te koppelen aan veranderingen in sedimentconcentraties; er wordt meer gebaggerd als er hogere sedimentconcentraties zijn en er als gevolg daarvan meer sedimenteert, tegelijkertijd zorgen baggerwerkzaamheden voor hogere sedimentconcentraties lokaal.

## 5.2 Aanbevelingen voor beleid en beheer

In relatie tot beleid en beheer zijn er zaken waar direct op gestuurd kan worden maar ook zaken die sturend werken. Tot dit laatste aspect behoort de versnelde zeespiegelstijging en de verwachte verandering in het klimaat met mogelijk hogere rivierafvoeren. Zaken waarop gestuurd kan worden zijn o.a. het kwelderonderhoud en baggerwerkzaamheden.

### **Slib en Zeespiegelstijging**

De zeespiegelstijging is een feit, alleen de mate waarin deze gaat optreden is nog onzeker. Voor beleid betekent dit dat nagedacht moet worden over de mate waarin de Waddenzee mee kan groeien met de zeespiegelstijging, hoeveel bodemdaling mag optreden als gevolg van delfstoffenwinning, in hoeverre plaatareaal beschermd moet worden tegen erosie en op welke manier kwelderonderhoud moet plaatsvinden om voldoende sediment in te kunnen vangen zodat deze vooroevers behouden blijven. In dit kader: Slibsedimentatie lijkt een belangrijk aspect bij kweldergroei. In hoeverre slib bijdraagt aan de ophoging van platen is nog niet onderzocht.

### **Slib onttrekken als bouw materiaal**

In het kader van bovenstaande, waarbij wordt aangegeven dat nog niet onderzocht is hoe groot de slib bijdrage is bij de ophoging van platen, moet worden nagedacht over het onttrekken van slib uit het systeem om te dienen als bouw materiaal. Het aanwezige slib wordt bij voorkeur gebruikt door de natuur zelf voor het ophogen van platen en voorlanden. Het onttrekken van slib uit het systeem, voor bouwtoepassingen, is met het oog op de toekomstige veranderingen mogelijk niet gewenst. Dit zal nog heel goed onderzocht moeten worden. Het toepassen van onttrokken slib voor het ophogen van binnendijks gebied kan wel interessant zijn in het licht van zeespiegelstijging.

### **Kwelderonderhoud**

Kwelders zijn een grote bron en put van slib. De mate van onderhoud bepaalt hoeveel slib er wordt opgeslagen in de kwelders en hoeveel slib er in de waterkolom terecht komt.

### **Baggerwerkzaamheden**

Ook op baggerwerkzaamheden kan direct worden gestuurd. Alhoewel eerder is gezegd dat baggerwerkzaamheden vooral op lokale schaal de sedimentconcentratie verhogen (op grotere schaal is dit lastig aan te tonen) gaan wij ervan uit dat continu baggeren ook zorgt voor een continue beschikbaarheid van sediment en daardoor op termijn hogere sedimentconcentraties in een groter gebied. Of dit ook werkelijk zo is kan in een vervolg mogelijk bekeken worden met een modelstudie. Een goed begrip van de morfologische veranderingen en vooral de te verwachten morfologische veranderingen geeft meer inzicht in locaties waar baggerwerkzaamheden zullen toenemen als gevolg van het openhouden van geulen. Gezien het feit dat baggerwerkzaamheden vervolgens kunnen leiden tot hogere sedimentconcentraties in het water is het beleid omtrent baggeren en baggerlocaties specifiek iets waar beheerders op kunnen sturen.

## 5.3 Aanbevelingen voor monitoring en onderzoek.

Voorliggend rapport is onderdeel van de KRW-slib studie welke uit meerdere rapporten en onderzoeken bestaat. In dit rapport is alleen gekeken naar de sedimentconcentraties in het water, de variatie daarvan in de tijd en mogelijk oorzaken van deze variatie. Dit rapport is onderliggend aan het conceptuele model dat is opgenomen in Herman et al. (2018). In dat rapport wordt breder gekeken naar de samenhang van het geheel van processen. Ook wordt in het rapport over het conceptuele model een voorzet gegeven van

onderzoek en monitoring voor in de toekomst. In voorliggend rapport beperken wij ons tot enkele aandachtspunten voor toekomstig onderzoek.

Het blijft lastig om variaties in slibconcentratie te koppelen aan verschillende processen. Het toevoegen van enkele meetlocaties zal naar verwachting niet leiden tot belangrijke nieuwe inzichten. Betere inzichten zijn wel te krijgen wanneer zeer veel meetlocaties worden toegevoegd, maar dit wordt niet aangeraden i.v.m. de hoge kosten die dat met zich meebrengt. Het kan wel interessant zijn om op een aantal strategische punten meer metingen in de tijd uit te voeren en deze ook op verschillende waterdieptes uit te voeren. Daarnaast moeten de ontwikkelingen die spelen met betrekking tot remote sensing goed in de gaten worden gehouden. Mogelijk levert dit op termijn een kostenefficiënte manier om de sedimentconcentraties te monitoren.

Binnen het KRW-slib traject wordt ook gewerkt aan modelontwikkeling. Alle nieuwe inzichten die zijn voortgekomen uit de gehele KRW-slib studie zullen zoveel mogelijk hierin moeten worden meegenomen. Vervolgens kan gemakkelijker worden geanalyseerd welke aspecten in welke mate invloed hebben op de sedimentconcentraties in het water. Uit voorliggende studie is immer naar voren gekomen dat met alleen data-analyse een dergelijk antwoord niet kan worden gegeven.

De uitkomsten van dit onderzoek doen vermoeden dat opslag van slib in de kwelders een relatief belangrijke rol speelt in de schommelingen in slibconcentraties in de Waterkolom in de Waddenzee. Op dit moment wordt zowel het oppervlak als de opslibbing in de kwelderwerken gemonitord en gerapporteerd in de WOT-rapportages. Echter, zonder aanvullende informatie kunnen niet gedetailleerd volumes aanslibbing en erosie worden bepaald. Advies is om standaard erosie- en sedimentatievolumes van slib te bepalen en te rapporteren en de meetmethode dusdanig aan te passen dat dit makkelijk mogelijk is (dus simultaan aanslibbing en arealen bepalen).

Een van de aspecten die in voorliggende studie nog niet bekeken is, is de rol van zoetwaterafvoer van de rivieren welke mogelijk een aanzuigende werking heeft voor slib in de kustzone en Waddenzee. Dit zou in een vervolg nog opgepakt kunnen worden.

De huidige analyse focust op grootschalige veranderingen in de slibconcentratie en grootschalige processen. Nieuwe inzichten zouden nog verkregen kunnen worden door in meer detail naar bepaalde locaties te kijken. Denk hierbij aan het meenemen van de resultaten van het slibmotor project bij Koehoal.



## 6 Bronnen

- Blaas, M., H. van den Boogaard (2006). *Statistical methods to assess the impact of MV2 on SPM along the Dutch coast*: results of WP 3 & 5. WL rapport Z4046.
- Bossinade, J.H., J. van den Bergs & K.S. Dijkema, 1993. De invloed van de wind op het jaargemiddelde hoogwater langs de Friese en Groninger waddenkust. Rijkswaterstaat Directie Groningen/DLO-Instituut voor Bos- en Natuuronderzoek, Texel. 22 p.
- CLO (2017). Areaal mossel- en oesterbanken in de Waddenzee, 1995 – 2014 [online]. Beschikbaar via: <https://www.clo.nl/indicatoren/nl1559-arealen-mossel--en-oesterbanken-in-de-waddenzee> [datum van opzoeken 20-09-18].
- De Glopper, R.J. (1967). Over de bodemgesteldheid van het waddegebied. Zwolle: N.V. Uitgeverij W. E. J. Tjeenk Willink.
- De Vries (2018). *Managing tidal systems: Large-scale morphological development and management of the Dutch Wadden Sea*. Internship report – part 1. Royal HaskoningDHV
- Dronkers, J. (2005). *NATURAL AND HUMAN IMPACTS ON SEDIMENTATION IN THE WADDEN SEA: AN ANALYSIS OF HISTORICAL DATA*. RIKZ report
- Elias, E., & Wang, Z. B. (2013). Abiotische gegevens voor monitoring effect bodemdaling. Rapport. Deltares, Delft.
- Groenewold, S., & Dankers, N. M. J. A. (2002). *Ecoslib; de ecologische rol van slib* (No. 519, p. 74). Alterra.
- Havenbedrijf Rotterdam N.V. (2013). Minister opent Maasvlakte 2 [online]. Beschikbaar via: <https://www.maasvlakte2.com/nl/news/show/id/4420/Minister%20opent%20Maasvlakte%20> [datum van opzoeken: 06-11-18].
- Maiwald, K., J. Verhagen (1991). Trensanalyse van zwevend stof gegevens van de Waddenzee. WL rapport T753.
- McLaren, P., Steyaert, F., & Powys, R. (1998). Sediment transport studies in the tidal basins of the Dutch Waddenzee. *Marine Biodiversity*, 29(1), 53-61.
- NIOZ (2016). Wadden Barometer | Sediment composition [online]. Beschikbaar op <https://www.nioz.nl/en/expertise/waddencentre/wadden-barometer-sediment-composition> [datum van opzoeken: 24-09-2018].
- Perluka, R., Wiegmann, E.B., Jordans, R.W.L. & Swart, L.M.T. (2006). Opname - technieken Waddenzee. Report AGI-2006-GPMP-004 (in Dutch). Rijkswaterstaat Adviesdienst Geo Informatie en ICT, 47 pp.
- Philippart et al. (2012). *Four decades of variability in turbidity in the western Wadden Sea as derived from corrected Secchi disk readings* <http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2012.07.005>
- Rijkswaterstaat (1998). Sedimentatlas Waddenzee. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee, CD-ROM.
- Van Duin, W.E., Jongerius, H., Nicolai, A., Jongsma, J. J., Hendriks, A., & Sonneveld, C. (2016). *Friese en Groninger Kwelderwerken: monitoring en beheer 1960-2014*. Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu.
- Van Kessel, T., Y. Friocourt, K. Kuijper, A. Bruens, P.K. Tonnon, B. van Maren (2010). *Slibmodellering kwaliteitsaspecten*. Resultaten 2009. Deltares rapport 200060-000-ZKS-0001
- Vroom, J., Van den Boogaard, H., Van Maren, B. (2012). Mud dynamics in the Ems-Dollard, research phase 2, Analysis existing data. Deltares. Rapportnr. 1205711-001.
- Wiegmann, N. R. Perluka, S. Oude Elberink, J. Vogelzang (2005). Vaklodgingen: de inwintechnieken en hun combinaties. AGI Rijkswaterstaat, Rapp.Nr. AGI-2005-GSMH-012
- Zwarts, L., Dubbeldam, W., van den Heuvel, H., van de Laar, E., Menke, U., Hazelhoff, L., & Smit, C. J. (2004). *Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee*. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ.

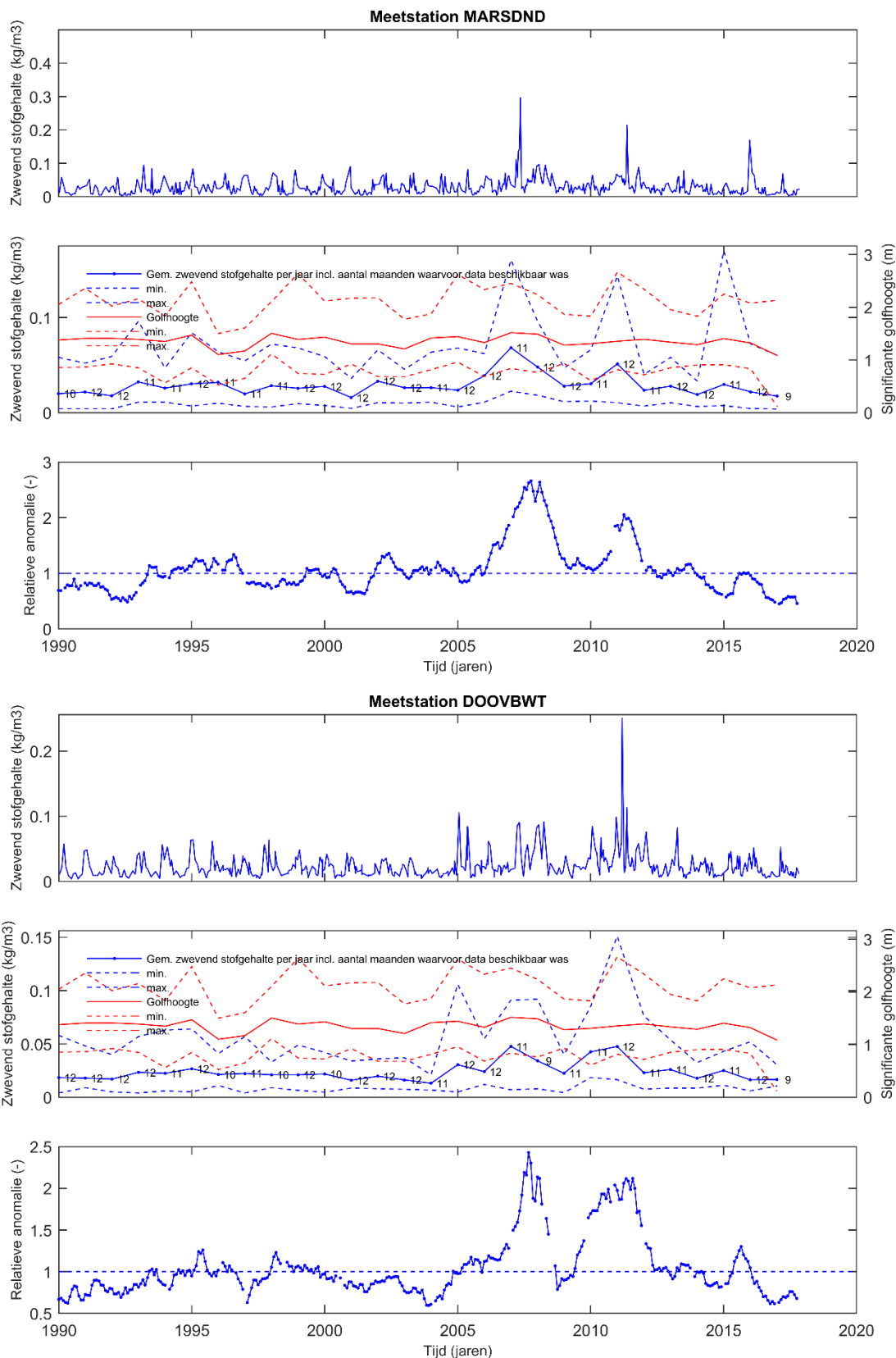
## Appendices

## A1 MWTL-meetlocaties gebruikt voor analyse lange termijn trends slibconcentratie in de waterkolom

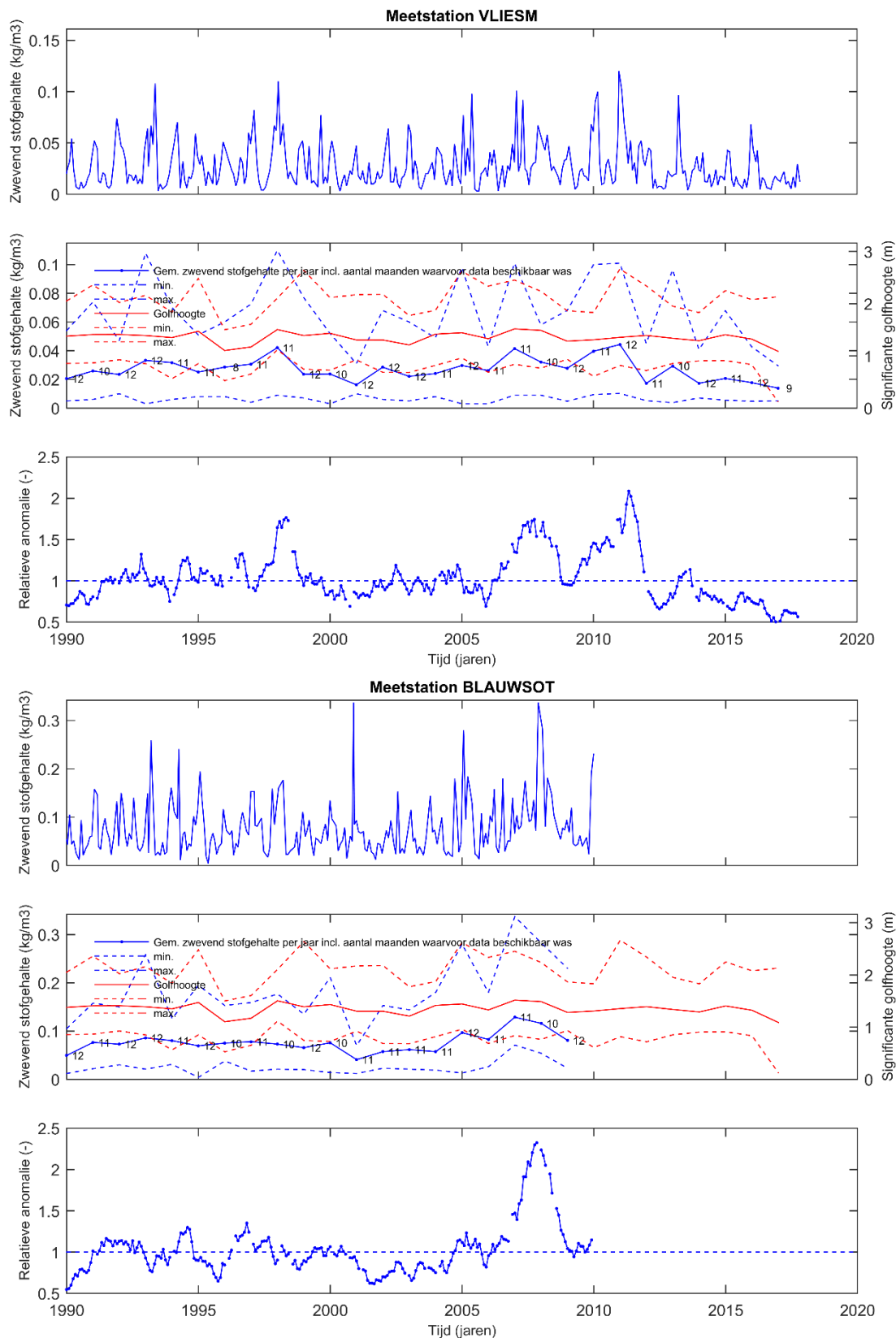
Meetlocatie	Naamcode	Lengte meetreeks
Marsdiep Noord	MARSDND	1973-2018
Dove Balg West	DOOVBWT	1973-2018
Blauwe Slenk Oost	BLAUWSOT	1973-2010
Vlie	VLIESM	1973-2018
Boomkensdiep	BOOMKDP	2007-2018
Terschelling 4 km uit kust	TERSLG4	1975-2007
Terschelling 10 km uit kust	TERSLG10	1975-2018
Dantziggat	DANTZGT	1982-2018
Zoutkamperlaag	ZOUTKPLG	1973-2010
Zoutkamperlaag Zeegat	ZOUTKPLZGT	1973-2010
Zuidoost Lauwers Oost	ZUIDOLWOT	1975-2010
Huibertgat Oost	HUIBGOT	1973-2018
Bocht van Watum	BOCHTVWTM	1988-2018
Groote Gat Noord	GROOTGND	1973-2018
Noordwijk 2 km uit kust	NOORDWK2	1976-2018
Noordwijk 10 km uit kust	NOORDWK10	1976-2018

## A2 Trend in zwevend stofgehalte per meetlocatie

## A2.1 Meetlocaties in Marsdiep

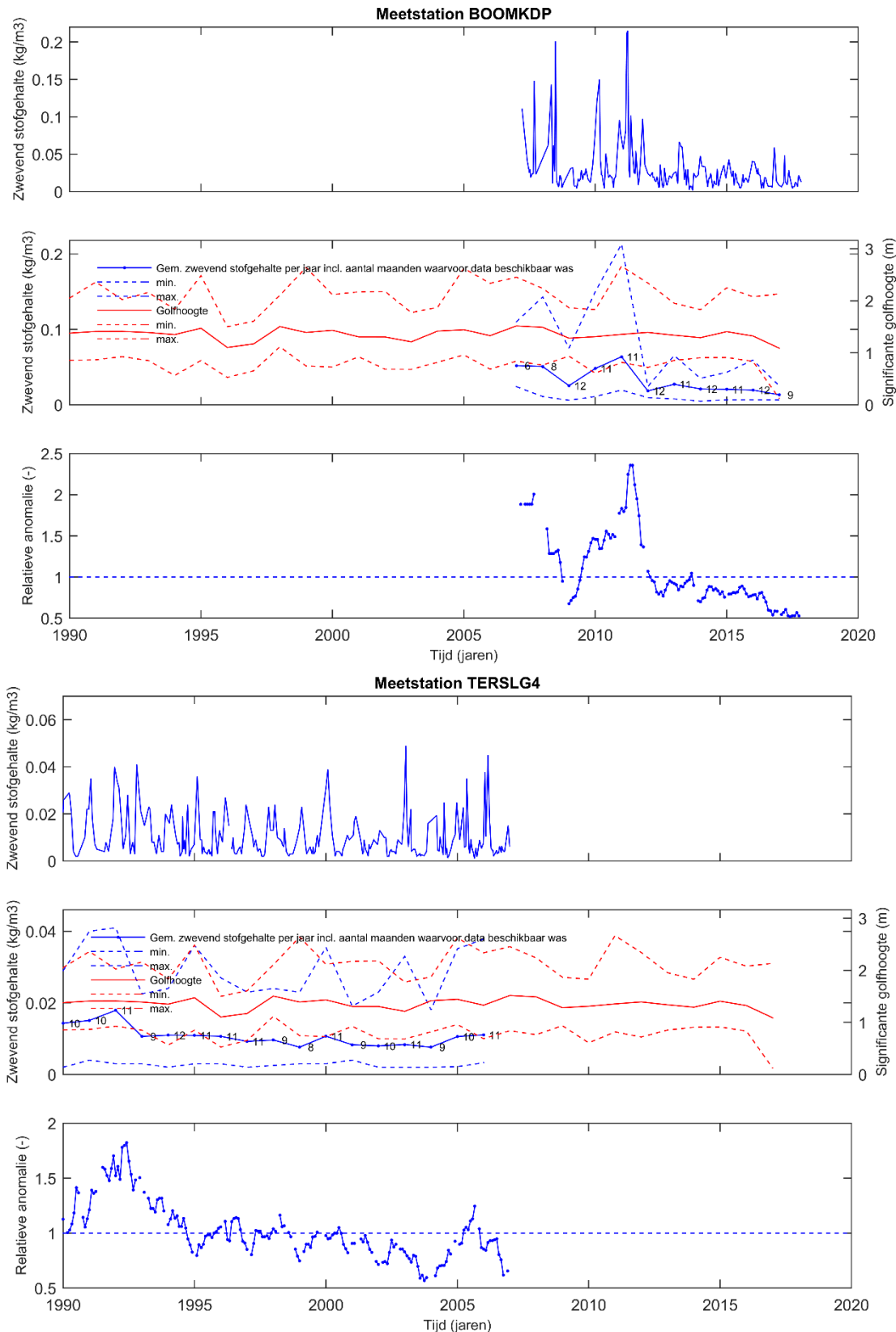


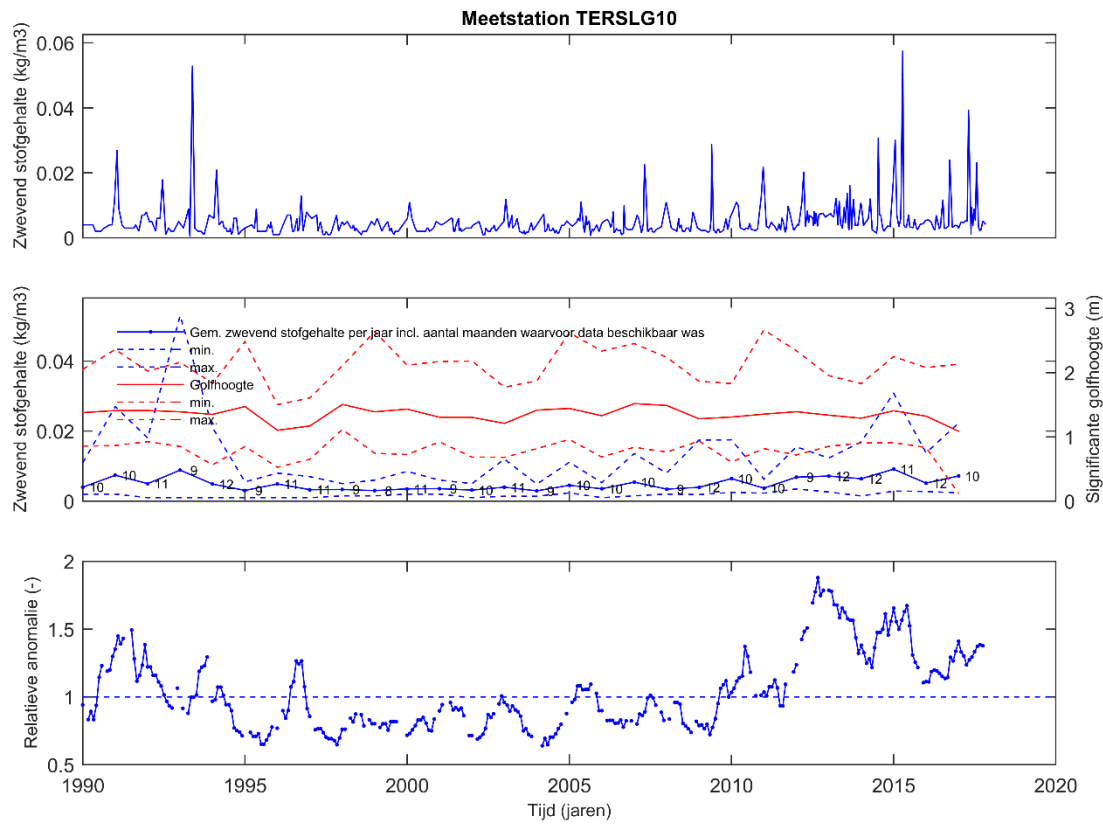
## A2.2 Meetlocaties in het Vlie



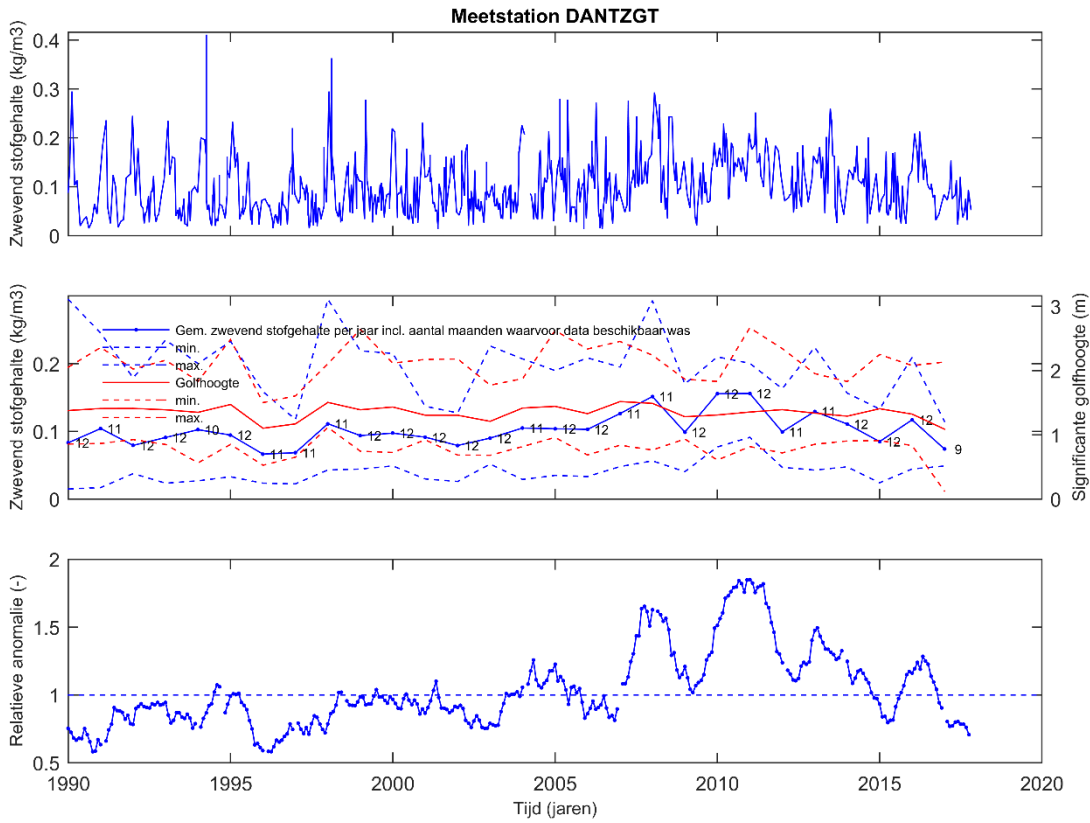


## A2.3 Meetlocaties kust Terschelling

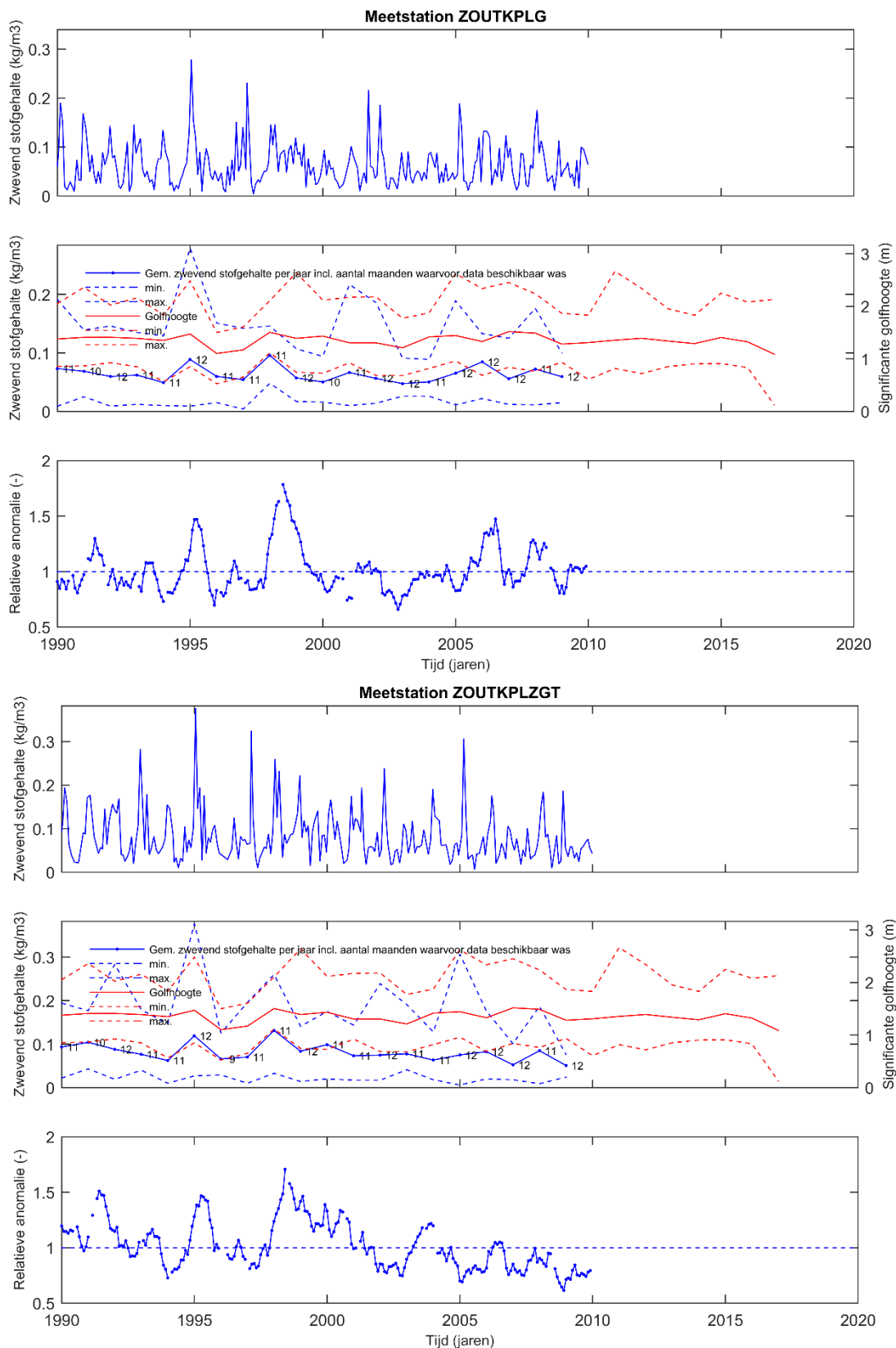




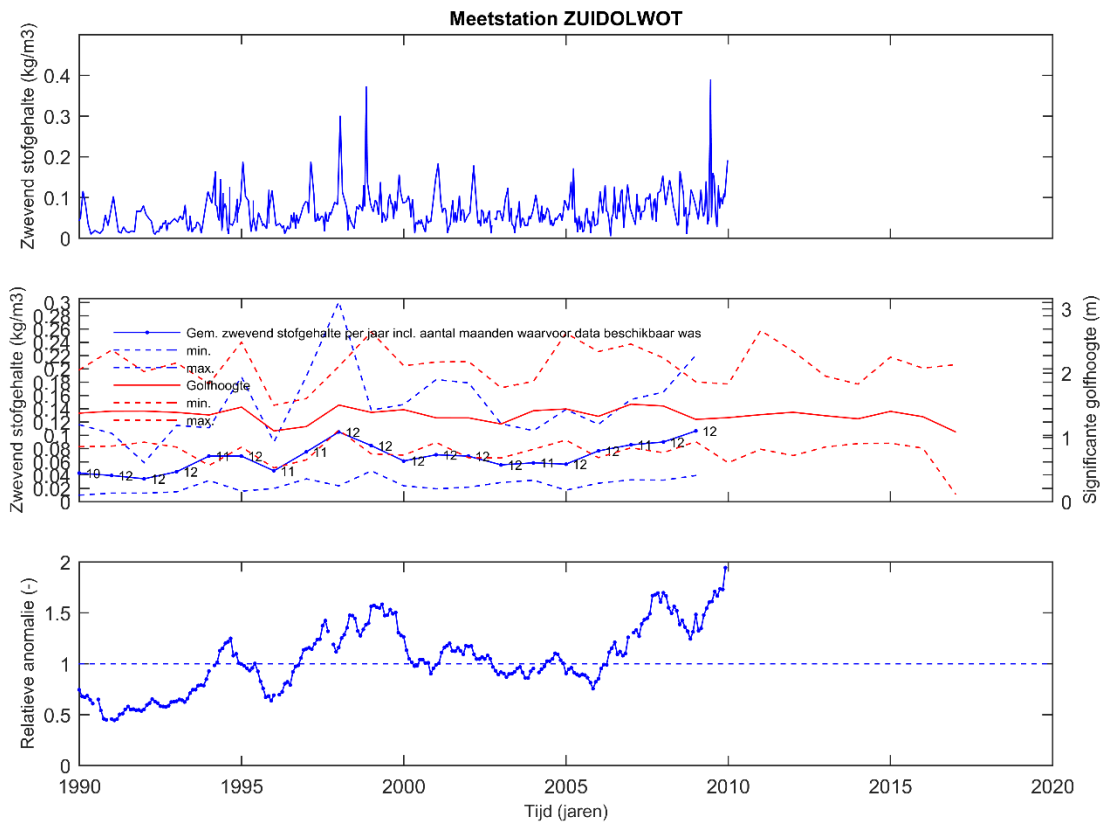
## A2.4 Meetlocatie Borndiep



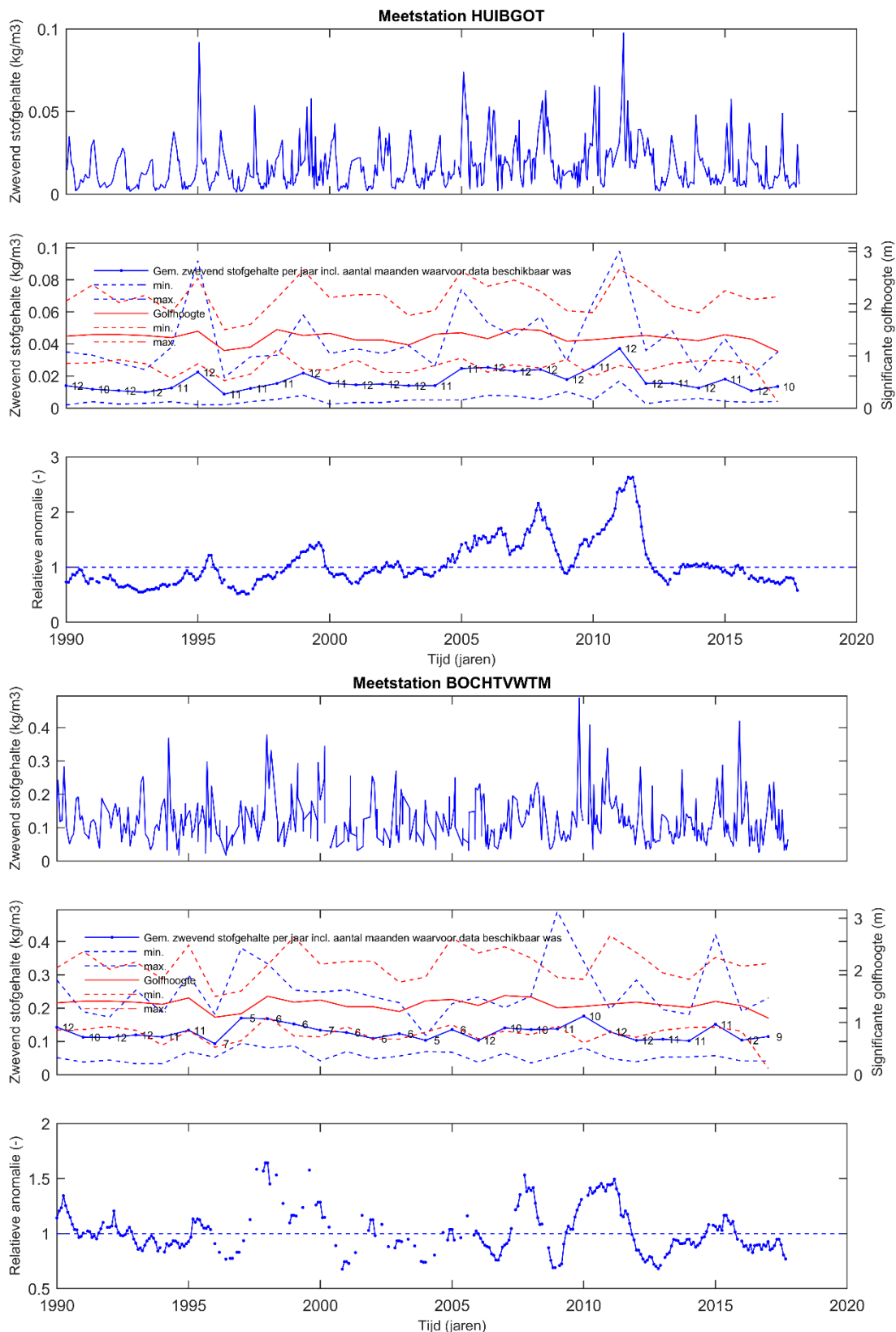
## A2.5 Meetlocaties Zoutkamperlaag



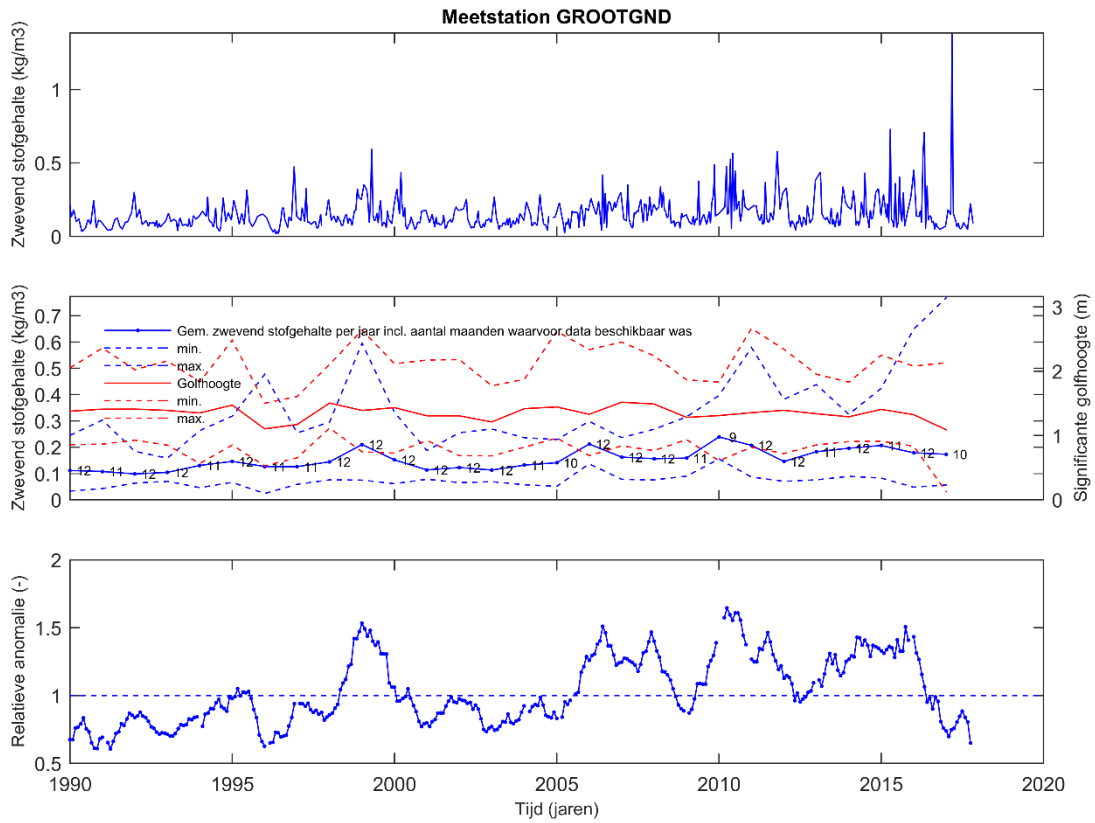
## A2.6 Meetlocatie Lauwers



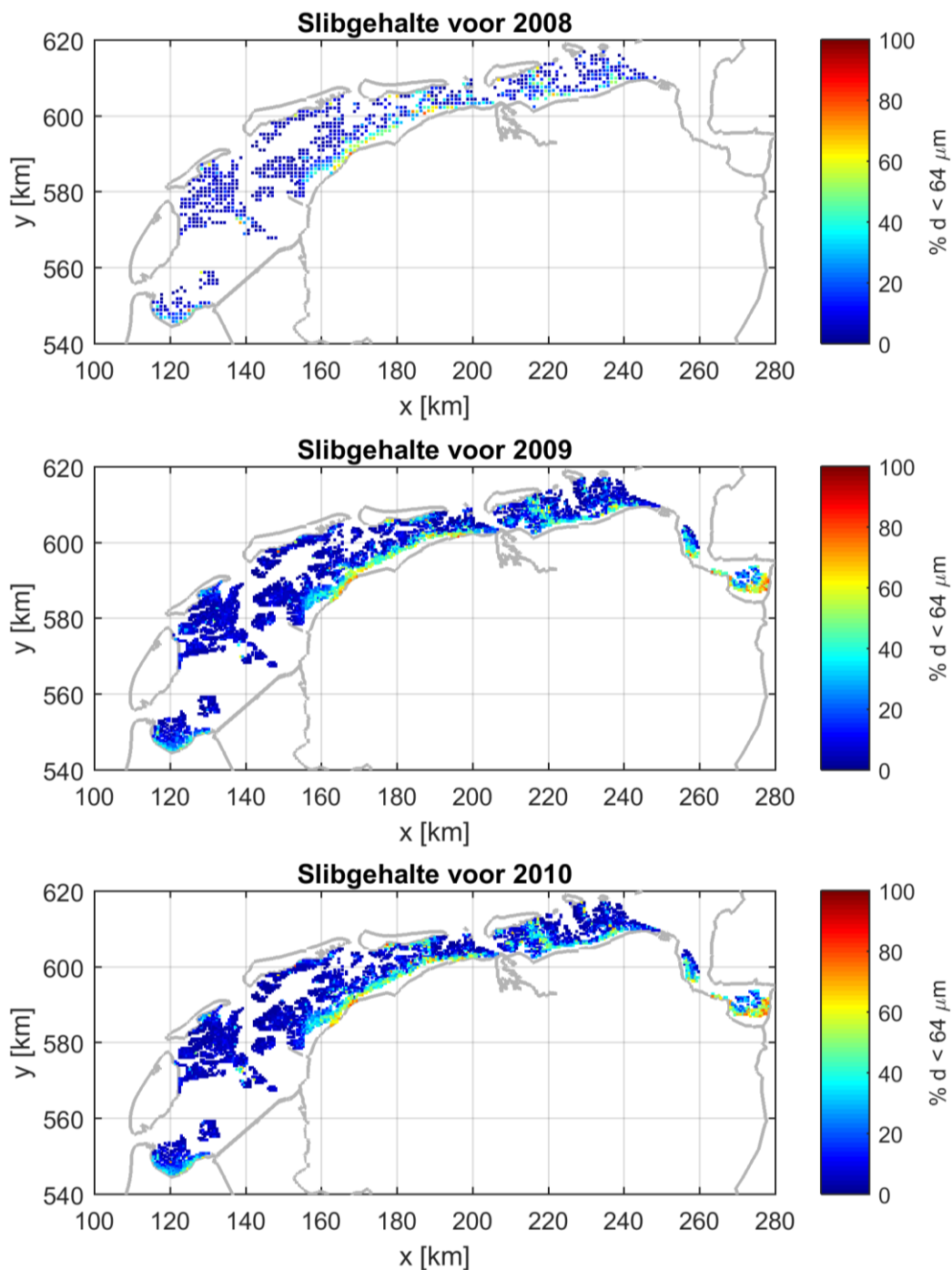
## A2.7 Meetlocaties Eems-Dollard

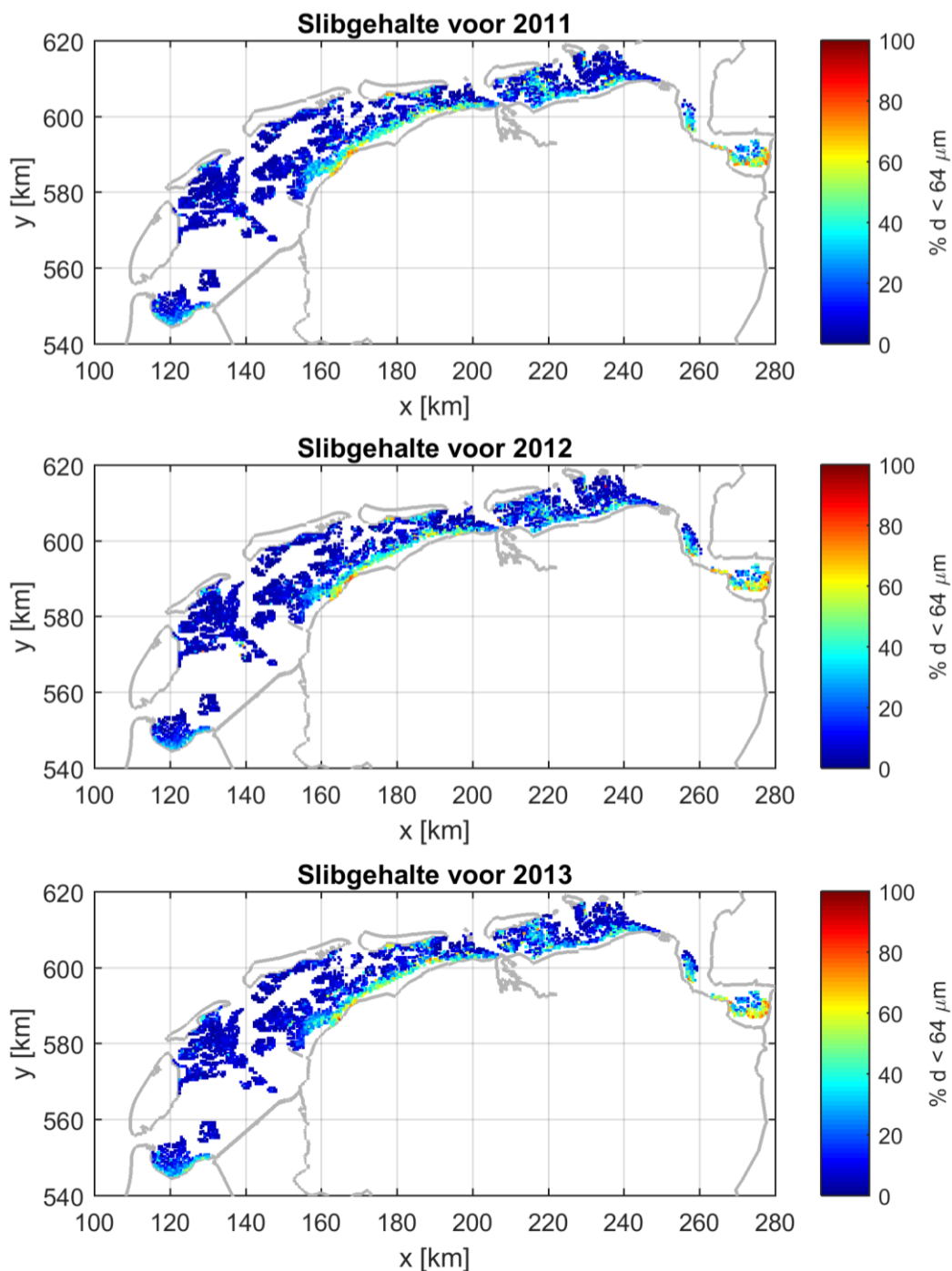




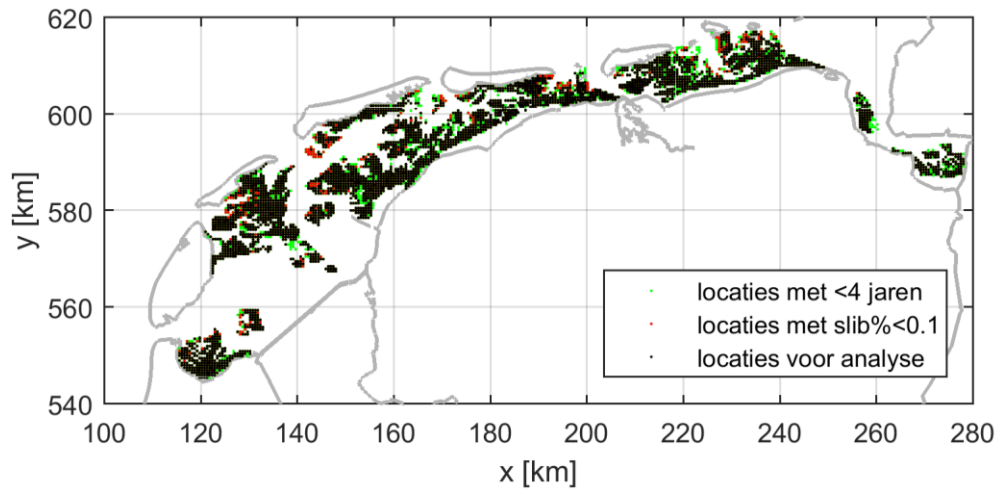


### A3 SIBES





Slibgehalte per jaar (2008-2013) op alle locaties.



Filtering toegepast op de SIBES-datapunten. Groene locaties zijn afgevalen vanwege een te laag aantal waarnemingen per locatie (minder dan 4), rode locaties bevatten waarnemingen met een slibgehalte lager dan 0.1%, zwarte locaties zijn gebruikt voor de analyses.