

## Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee

Data analyse



# Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee

## Data analyse

### Auteur(s)

Ana Colina Alonso

## Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee

### Data analyse




<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	de heer H. Mulder
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Slibdynamiek, Waddenzee, bodemslibgehalte, slibbalans, data analyse

#### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	20-10-2020
<b>Projectnummer</b>	11205229-001
<b>Document ID</b>	11205229-001-ZKS-0003
<b>Pagina's</b>	42
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

#### Auteur(s)

	Ana Colina Alonso	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Ana Colina Alonso 	Peter Herman 	Toon Segeren 	

# Samenvatting

In het voorliggende rapport is een data analyse gepresenteerd van de veranderingen in bodemslibgehaltenes in de Waddenzee gedurende de afgelopen eeuw. Daartoe is gebruik gemaakt van vier (historische) datasets, bestaande uit data van Lely (1892), de Glopper (1967), de Sedimentatlas Waddenzee (RIKZ, 1998) en SIBES (data van 2008-2013).

Uit een kwalitatieve vergelijking tussen de verschillende datasets is gebleken dat grote veranderingen in de slibgehaltenes plaatsvonden na de afsluiting van de Zuiderzee: zandige verlaten geulen slibden dicht en ook in het Balgzand is hierna een sterke toename van het bodemslib geweest. Het Terschellinger wantij werd daarentegen slibarmer. Tussen 1950 en 1990 is de hoeveelheid slib op het wantij van Schiermonnikoog sterk toegenomen, waarschijnlijk ten gevolge van de afsluiting van de Lauwerszee.

Een eerste opzet van een volledige zand-slib volumebalans van de bekkens is gepresenteerd. Hiertoe zijn de morfologische veranderingen gekoppeld aan de bodemsamenstelling. Hierbij is de hele periode beschouwd waarover Vaklodingen data beschikbaar is. Slib heeft in belangrijke mate bijgedragen en draagt nog altijd bij aan de sedimentatie van de Waddenzeebekkens. Deze bijdrage is ongeveer 27% in de Westelijke Waddenzee en 15% in de Oostelijke Waddenzee (Amelander en Friesche zeegat) voor de periode 1927/1933-2015. In het Groninger Wad en de Eems-Dollard (geanalyseerd als 1 gebied) zorgde slib voor bijna 40% van de totale sedimentatie in de periode 1985-2015. Deze getallen zullen een stuk hoger zijn wanneer de sedimentatie in de niet-gekubeerde kwelders wordt meegerekend. Het is opvallend dat het aandeel van slib aan de netto sedimentatie door de tijd is toegenomen. De resultaten tonen dat er niet (enkel) een herverdeling van het slib in de bekkens plaatsvindt, maar dat er een sterke netto import van slib van buitenaf is.

Hoewel de bodemslibgehaltenes grote lokale variaties tonen over de afgelopen 125 jaar, zijn deze relatief stabiel gebleven sinds 1990. De bimodale statistische verdeling van het bodemslib toont immers geen grote verschillen voor de data van de jaren '90 (Sedimentatlas) en de meest recente data (SIBES). Op lokale schaal en korte termijn kan het bodemslib echter zeer variabel zijn. Deze variabiliteit is over het algemeen het grootst op locaties waarvan het gemiddelde slibgehalte tussen de twee modi van de bimodale verdeling zit.



# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Definities en datasets</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Resultaten</b>	<b>10</b>
3.1	Grootschalige veranderingen in sedimenttypes	10
3.2	Koppeling met de morfologische evolutie	12
3.3	Volumebalans	14
3.3.1	Methode	14
3.3.2	Westelijke Waddenzee	15
3.3.3	Amelander en Friesche zeegat	17
3.3.4	Groninger Wad en Eems-Dollard	19
3.4	Bimodale verdeling van het slibgehalte	20
3.5	Variabiliteit	22
3.5.1	Korte termijn: jaarlijkse variabiliteit in zomermetingen	22
3.5.2	Middellange termijn variabiliteit	24
<b>4</b>	<b>Discussie</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>Conclusies</b>	<b>29</b>
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>30</b>
	<b>Appendix A: Bodemslib kaarten zonder log-transformatie</b>	<b>32</b>
	<b>Appendix B: Verloop sedimentatie/erosie patronen</b>	<b>33</b>
	<b>Appendix C: Variabiliteit log-getransformeerde slibgehalten</b>	<b>37</b>

# 1 Introductie

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

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

In dit rapport wordt een data-analyse gepresenteerd van de veranderingen in bodemslibgehalten in de Waddenzee gedurende de afgelopen eeuw en de bijdrage van slib aan de morfologische evolutie. De belangrijkste bevindingen zullen worden opgenomen in de update van het conceptuele denkmodel (Herman et al. 2018) die wordt uitgevoerd in 2020.

In hoofdstuk 2 worden de gebruikte definities en datasets besproken. Vervolgens wordt in hoofdstuk 3.1 een analyse gepresenteerd van de grootschalige evolutie van de bodemsamenstelling. Deze analyse is kwalitatief (3.2) en kwantitatief (3.3) gekoppeld aan de morfologische evolutie om zo inzicht te krijgen in de bijdrage van de slibfractie aan de sedimentatie van de Waddenzeebekkens. Tenslotte worden de bimodale verdeling van het bodemslib (3.4) en de variabiliteit ervan (3.5) geanalyseerd.

## 2 Definities en datasets

We definiëren slib als de fractie kleiner dan 63  $\mu\text{m}$  (klei + silt). De nadruk ligt - i.v.m. databeschikbaarheid - bij de meeste analyses op het slib in de toplaag van het sediment van intergetijdengebieden. De platen zijn immers intensiever bemonsterd dan de geulen. Daar waar mogelijk wordt ook het slib in sublitorale delen van de Waddenzee geanalyseerd.

### **Data Lely (omstreeks 1890)**

De evolutie van het ruimtelijk patroon van de sedimentsamenstelling op de bodem van de Waddenzee wordt geanalyseerd met behulp van bronnen die ongeveer 125 jaar beslaan. De oudste hiervan is afkomstig uit de resultaten van het Technisch Onderzoek 1886 – 1892 van de Zuiderzee Vereniging (Lely, 1892). Voor dit onderzoek was het nodig voldoende kennis te verkrijgen omtrent de geologische gesteldheid van de Zuiderzee, de Wadden en de Lauwerszee. Hierom zijn in de zomers van 1889 en 1890 booronderzoeken uitgevoerd in zowel sublitorale als litorale delen van het studiegebied.

Voor de sublitorale gebieden is als regel aangenomen in zandgronden de boringen tot een diepte van 1 m te verrichten. Wanneer dit echter niet mogelijk was (door de hardheid van de bodem), zijn minder diepe boringen verricht. Op klei en veengronden is als regel aangehouden de boring zo diep te verrichten, dat de onderliggende zandlaag werd bereikt. De litorale boringen zijn uitgevoerd met een handboor, die tot een diepte van 1 m kon worden gestoken met uitzondering van de boringen op zeer harde zandondergronden.

De monsters zijn voorbehandeld om de hoeveelheid kalk en organisch materiaal te bepalen. De ondergrond is na analyse gerangschikt volgens het zandgehalte. Daarbij zijn de volgende klassen onderscheiden:

- Klei: minder dan 60% zandgehalte
- Zavel: 60-80% zandgehalte
- Lichte zavel: 80-90% zandgehalte
- Zand: >90% zandgehalte
- Veen: >20% organisch materiaal

De resultaten hiervan zijn in de vorm van een kaart gepresenteerd in het Technisch Onderzoek. Deze kaart is voor het huidige onderzoek gedigitaliseerd met behulp van ArcGIS software. Omdat de exacte locaties van de grondboringen niet door Lely zijn genoteerd, moesten deze worden geschat uit de kaart.

### **Data de Glopper (jaren '50)**

Tussen 1950 en 1955 zijn over de gehele Waddenzee ongeveer 2500 monsters gestoken, waarvan de meeste 25 cm diep. Hiervan is verslag gedaan door o.a. Wiggers (1951), Wiggers (1953), de Koning & Wiggers (1964) en dit werk is later samengevat door de Glopper (1967). Zwarts (2004) heeft deze data verzameld en hiervan een bodemkaart van de Waddenzee voor de jaren '50 geconstrueerd. Hiertoe werd van alle monsterpunten de positie overgenomen of ingemeten. Om de positie nauwkeurig te kunnen bepalen, zijn de kaarten toen gescand en gedigitaliseerd. Naast de bovengenoemde monsters, heeft Zwarts hier ook de data van Hoekstra et al. (1998) toegevoegd. Zij hebben tussen 1956 en 1987 de bodem langs de Friese en Groninger kuststrook zeer intensief bemonsterd, hoewel de meeste data afkomstig is uit de periode 1956-1960.

De bovenstaande data tezamen wordt in dit rapport geduid als de data “de Glopper, jaren ‘50”. Vrijwel alle monsters van deze dataset zijn genomen van de laag 0-25 cm en alle monsters zijn voorbehandeld met HCl en H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> om kalk en het organisch materiaal te verwijderen, zoals beschreven door (Hofstee, 1980).

De door Zwarts gehanteerde definitie van slib was de fractie kleiner dan 16µm. Omdat in dit rapport de slibfractie is gedefinieerd als de fractie kleiner dan 63µm, zijn de resultaten van Zwarts omgerekend, met behulp van de door hem afgeleide formule:

$$p_{16\mu m} = 0.1879 * p_{63\mu m}$$

waarbij de 16 µm fractie gravimetrisch bepaald is, en de 63 µm fractie met behulp van een Malvern laser particle size analyser (optisch) is bepaald. Dit maakt het mogelijk om deze bodemgegevens met de data van de Sedimentatlas te vergelijken. Deze relatie blijkt een goede inschatting te geven van het slibgehalte voor monsters met een slibgehalte tot ongeveer 60% (ofwel 16 µm fracties tot 11%) . Echter, er zijn langs de Friese en Groningse kust enkele monsters genomen waarbij de 16 µm fractie 20% of hoger is: hierbij zouden omgerekende slibwaarden horen van meer dan 100%. Deze slibfracties zijn nu op 100% gezet. Gezien dit een zeer lokaal fenomeen is, is het niet te verwachten dat het de kwalitatieve vergelijking van de slibgehalten door de jaren heen erg zal beïnvloeden. Indien men een kwantitatieve analyse wil uitvoeren om de verandering van het bodemslib te berekenen, wordt aangeraden eerst een meer nauwkeurige relatie te ontwikkelen tussen de 16 µm en de 63 µm fracties.

#### **Data Sedimentatlas Waddenzee (jaren '90)**

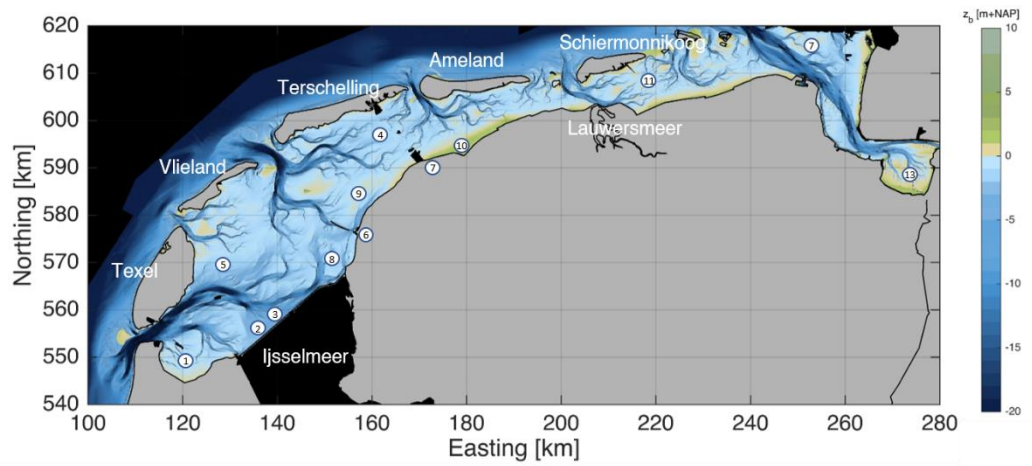
Tussen 1989 en 1996 zijn monsters genomen van de bovenste 10 cm van de bodem van de Waddenzee. De horizontale resolutie bedraagt 500-1000 m en dekt de gehele getijdenbekkens, evenals de buitendelta's en de kuststrook aan de Noordzeekzijde. De monsters zijn niet voorbehandeld en zijn geanalyseerd met een Malvern laser particle size analyser. De volledige zeefcurves zijn opgeslagen en verwerkt in de dataset Sedimentatlas Waddenzee (RIKZ, 1998).

#### **Data SIBES (2008-2013)**

Voor de SIBES dataset, verzameld door NIOZ en beschikbaar gesteld voor dit onderzoek, zijn jaarlijks in de periode 2008-2013 4500 sedimentmonsters genomen in de intertidale zone van de Waddenzee bekkens. De horizontale resolutie van de bemonstering is ongeveer 500 m. De in deze studie gebruikte monsters zijn niet voorbehandeld. Ze zijn geanalyseerd met een Coulter LS 13 320, optische module 'grey', waarbij de zeefcurves zijn ingedeeld in 126 korrelgrootte klassen (0.04-2000 µm) .

In het rapport wordt regelmatig naar meerdere morfologische eenheden en plaatsen verwezen. De locaties ervan zijn weergegeven in Figuur 1.





1. Balgzand	8. Kornwerderzand
2. Vlieter	9. Vlakte van Oostbierum
3. Javaruggen	10. Vastlandskwelder Noorderleech
4. Terschellinger Wantij	11. Wantij van Schiermonnikoog
5. Waarden	12. Randzel
6. Harlingen	13. Dollard
7. Zwarte Haan	

*Figuur 1: Overzicht van de Waddenzee morfologie en de ligging van de geanalyseerde morfologische eenheden. De bodemligging is gebaseerd op de Vaklodingen data van 2015.*

## 3 Resultaten

### 3.1 Grootschalige veranderingen in sedimenttypes

Om een kwalitatieve vergelijking mogelijk te maken tussen de verschillende datasets, en zo een eerste inschatting te geven van de verandering in het bodemslib over de afgelopen eeuw, zijn de bodemgegevens van alle datasets omgerekend naar de door Lely bepaalde klassen (afhankelijk van het zandgehalte). De resultaten hiervan zijn in Figuur 2 gepresenteerd. Hoewel veel zand-slib patronen nagenoeg gelijk zijn gebleven, kunnen ook een aantal belangrijke veranderingen worden geïdentificeerd. Deze worden hier van west naar oost besproken.

Het Balgzand was voor de afsluiting van de Zuiderzee een voornamelijk zandige wadplaat met slechts enkele slibrijke delen. De kaarten van de jaren na de afsluiting laten echter een transitie zien naar een gebied dat steeds slibrijker wordt met afnemende afstand tot de kust. Dit is te wijten aan de beschutte ligging van de plaat, na de bouw van de Afsluitdijk.

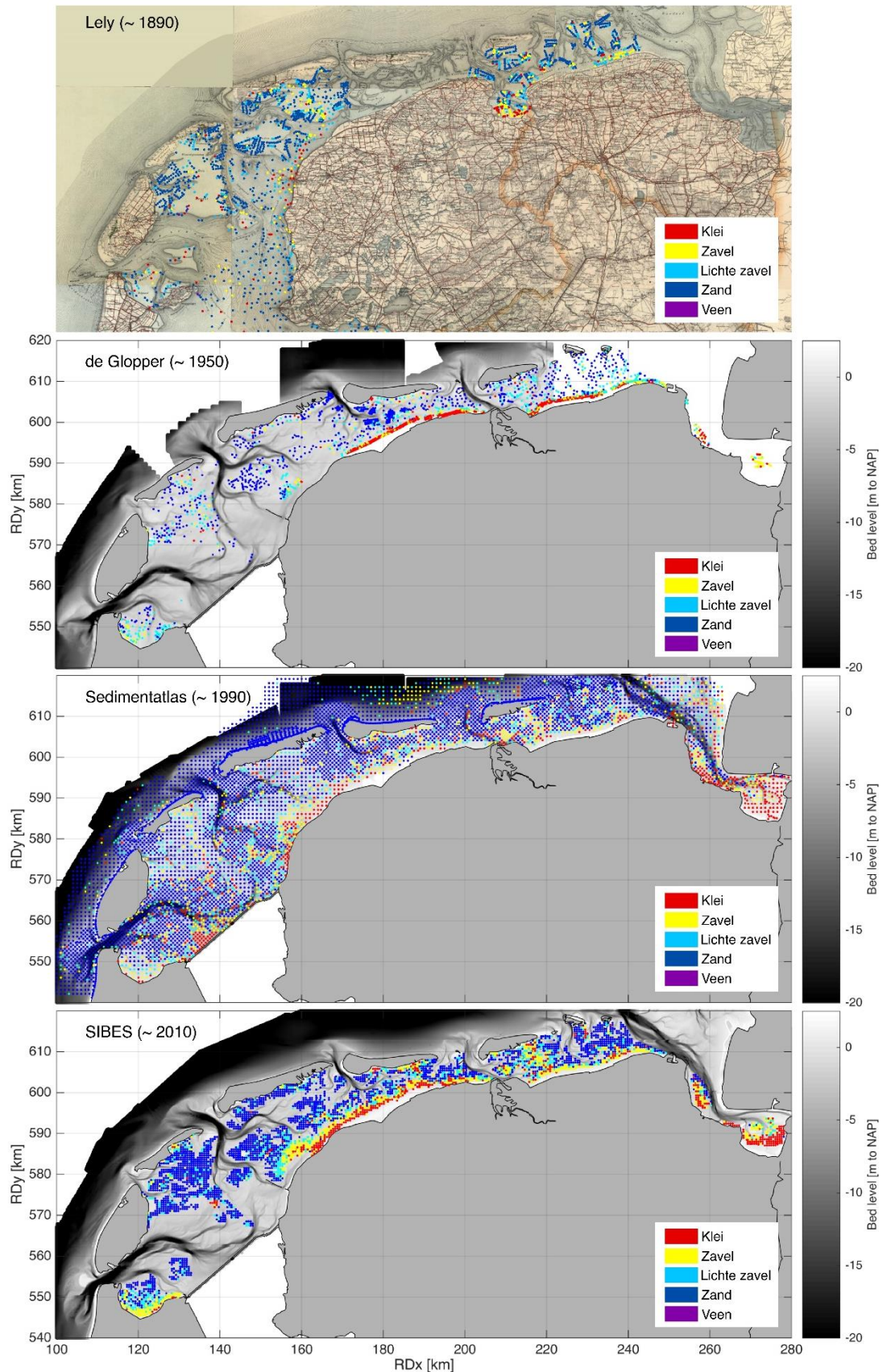
De Vlieter en Javaruggen waren voor de afsluiting primaire geulen, die voor de drainage zorgden van de achterliggende Zuiderzee. Lely ondervond dat deze geulen een voornamelijk zandige ondergrond hadden (>80% zand). De data van de Sedimentatlas toont dat de ondergrond van deze - inmiddels verlaten - geulen wordt gedomineerd door slibrijk sediment.

Het Terschellinger wantij lijkt minder slibrijk te zijn geworden over de afgelopen 125 jaar: daar waar Lely vele gebieden als *Zavel* markeerde, lijken deze geëvolueerd te zijn naar een *Lichte Zavel* of zelfs *Zandige* ondergrond. Hoe geleidelijk deze overgang van de slibgehalten is geweest is moeilijk te zeggen, gezien de data van de jaren '50 weinig datapunten bevat in dit gebied. Daarnaast is de Oostelijke verplaatsing van het wantij zichtbaar, zoals beschreven door Wang, et al. (2013).

Aan de westelijke Friese kust tussen Harlingen en Zwarte Haan bestond de ondergrond rond 1890 al voor een groot deel uit fijn sediment, maar een vergelijking met de daaropvolgende datasets lijkt erop te wijzen dat het aandeel aan fijn sediment door de jaren heen nog verder is toegenomen. De grens waar het sediment van slibrijk naar zandig verspringt lijkt zeewaarts te zijn verschoven. Dit is bijvoorbeeld te zien rond coördinaat RDx= 160 km, RDy=585 km.

In de Oostelijke Waddenzee is het wantij van Schiermonnikoog slibrijker geworden. Deze verandering vond plaats tussen 1950 en 1990, waarschijnlijk vlak na de afsluiting van de Lauwerszee. Daar waar de bodemondergrond grotendeels eerst kon worden geclassificeerd als *Zand* en *Lichte zavel*, zien we duidelijke verschuiving naar de klassen *Zavel* en *Klei*.

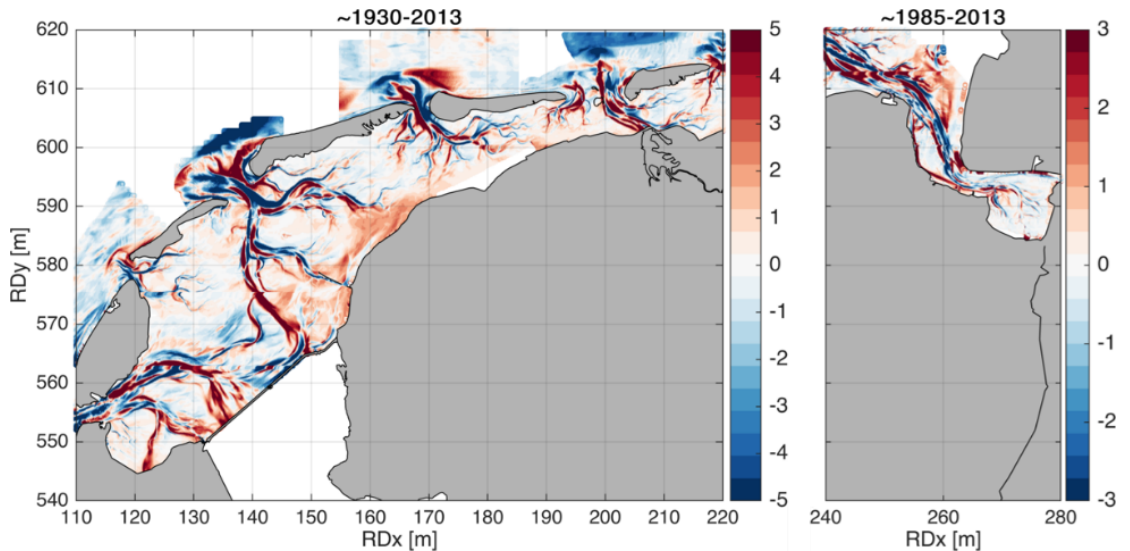
Ook langs de Groningse kust lijkt de ondergrond slibrijker te zijn geworden sinds 1890; dit is voornamelijk zichtbaar in het stuk RDx=230-240. Gezien de geringe hoeveelheid metingen in 1890 zullen boringen nodig zijn om dit nader te onderzoeken.



Figur 2: De bodemsamenstelling van de Waddenzee over de afgelopen eeuw, aan de hand van de door Lely (1892) gehanteerde definities voor klei (<60% zand), zavel (60-80% zand), lichte zavel (80-90% zand), zand (>90% zand) en veen (>20% organisch stofgehalte).

### 3.2 Koppeling met de morfologische evolutie

Volgens Zwarts (2004) hangen veranderingen in de slibfracties samen met morfologische veranderingen veroorzaakt door: 1) de afsluitingen van de Zuiderzee en Lauwerszee, 2) landaanwinningswerken langs de vastelandskust, 3) het storten van baggermateriaal ten noorden van Harlingen en 4) natuurlijke dynamiek van het systeem. Daarom wordt in deze sectie de morfologische ontwikkeling vergeleken met de evolutie van het bodemslib. De morfologische evolutie is gepresenteerd in Figuur 3. De sedimentatie-erosie patronen zijn berekend met de Vaklodingen data en zijn niet gecorrigeerd voor ingrepen en bodemdaling. In Figuur 4 worden de slibgehalten na log-transformatie weergegeven. Een overzicht van de slibgehalten zonder log-transformatie is weergegeven in Appendix A



Figuur 3: Bathymetrische veranderingen in de Waddenzee voor de periodes 1930-2013 en 1985-2013

Zoals verwacht is te zien dat slibrijke gebieden ( $\log(\text{slib}) > 3$ , i.e. slibgehalten boven de 20%) overwegend sedimentierend zijn; achterin de bekkens, in verlaten geulen en op de wantijen heersen rustige hydrodynamische condities waar het fijne sediment kan bezinken.

In het Balgzand zijn na de afsluiting van de Zuiderzee de verlaten geulen opgevuld met sediment (lokaal meer dan 5 m sedimentatie) en zijn de platen opgehoogd. Figuur 4 toont dat de slibgehalten tussen de jaren 50 en de jaren 90 hier aanzienlijk zijn toegenomen. Deze toename wordt nog duidelijker als we de sedimentgegevens van Lely erbij pakken (Figuur 2, bovenste panel).

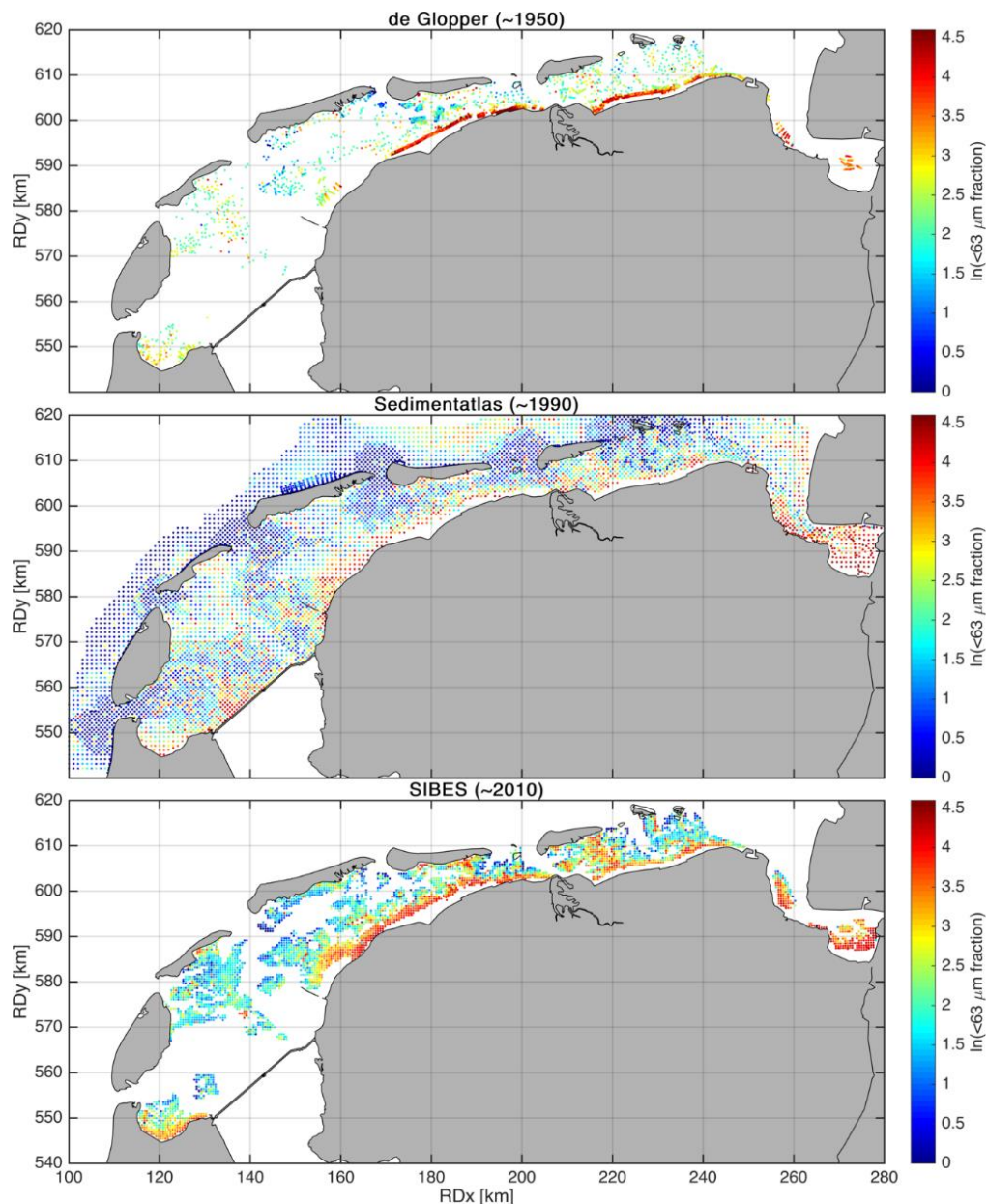
Ook in de verlaten geulen voor de Afsluitdijk zien we een sterke verschuiving in bodemslibgehalten (van minder dan 10% slib naar 40-50% slib) en een sedimentatie van meerdere meters. Dit suggereert dat fijn sediment een belangrijke bijdrage heeft geleverd aan de volumebalans van dit gebied. Dit zal in Sectie 3.3 nader worden toegelicht.

De Friesche kust is het grootste aangroeiende slibsysteem in de Westelijke Waddenzee. Hier was de toplaag van de bodem al slibrijk voor de afsluiting, en lijkt een gestage slibsedimentatie plaats te vinden. Boringen van DINOloket tonen dat niet alleen de toplaag slibrijk is, maar dat ook onder de toplaag een metersdik slibpakket te vinden is. Dit wordt in de discussie besproken.



In de Eems-Dollard is de ondiepte van Randzel (RDx~260 km, RDy~610 km, wantij met Duitsland) sterk gesedimenteerd. Met name aan de Westkant van deze plaat zijn slibgehalten hoog en wordt verwacht dat de bijdrage van slib aan de volumeveranderingen groot zal zijn.

Echter, er zijn ook grote gebieden te onderscheiden die op de lange termijn eroderen en ook slibrijk zijn (zoals bijvoorbeeld een deel van de Waarden in het zeegat van Texel, de plaat Hond en Paap in de Eems en de Dollard zelf. Later in dit rapport worden deze lokale erosietrends verder uitgelicht, o.a. in Figuur 5, Figuur 9 en Figuur 11). Hierbij is het belangrijk te vermelden dat deze gebieden niet alleen netto op de lange termijn eroderen, maar dat deze eroderende trend ook consequent te zien is door de jaren heen. Een belangrijke vraag is of deze gebieden als een lange termijn slibbron fungeren, of dat enkel de toplaag slibrijk is, ondanks het erosieve gedrag.



Figuur 4: Evolutie van de (log-getransformeerde) slibgehalten

### 3.3 Volumebalans

Uit Sectie 3.2 blijkt dat in vele sedimenterende gebieden slibrijk materiaal wordt afgezet. Voorgaande studies hebben aangetoond dat slib een belangrijke bijdrage levert aan de sedimentbalans van de Waddenzeebekkens: Cleveringa (2018) analyseerde de sedimentatie van slib in de wadplaten en kwelders buiten de kuberingsgebieden van de Waddenzee en berekende een bandbreedte in de slibsedimentatie van 0,39 tot 1,17 Mm<sup>3</sup> per jaar. Smits & Nederhoff (2018) voerden een soortgelijke analyse uit voor de kuberingsgebieden in de bekkens van de Westelijke Waddenzee (Marsdiep, Eijerlandse Gat en Vlie), waarbij periode 1991 tot 2015 werd geanalyseerd. Grote slibafzettingen vonden echter ook voor deze periode plaats ten gevolge van de afsluiting van de Zuiderzee: zoals aangegeven in Secties 3.1 en 3.2 zijn voormalig zandige geulen grotendeels opgevuld met slib. In deze sectie wordt daarom een eerste opzet van een volledige zand-slib volumebalans van de bekkens gepresenteerd. Hierbij wordt de hele periode beschouwd waarover Vaklodingen data beschikbaar is.

#### 3.3.1 Methode

De analyse is opgesplitst in 3 deelgebieden: 1) Westelijke waddenzee, 2) Amelander en Friesche zeegat en 3) Groninger wad en Eems-Dollard) vanwege systeemverschillen en vanwege de beschikbaarheid van bodemliggingsdata. Voor de analyse van de Westelijke Waddenzee is gebruik gemaakt van de bodemligging gegevens van Elias (2018). Deze bodems zijn samengesteld uit geaggregeerde meetgegevens uit de Vaklodingen dataset en zijn aangevuld met LIDAR metingen. Voor de andere twee analyses is enkel gebruik gemaakt van Vaklodingen data. Er is niet gecorrigeerd voor menselijke ingrepen (baggerwerkzaamheden, zand- en schelpenwinning, bodemdaling door gaswinning, etc). Hiermee wordt de natuurlijke sedimentatie onderschat. Volgens de berekeningen van Elias (2018) neemt de totale sedimentatie in de Westelijke Waddenzee met ongeveer 40\*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> toe wanneer hier wel voor wordt gecorrigeerd (met name zandwinning).

De gemeten bodemverschillen worden vermenigvuldigd met zand- en slib-(volume)fracties om de sedimentbalans op te splitsen in de bijdrage van beide sedimenttypes. Hierbij is zand gedefinieerd als de fractie met een mediane korrelgrootte tussen 63 µm en 2 mm, en slib als de fractie met een mediane korrelgrootte kleiner dan 63 µm.

Er wordt gebruik gemaakt van bodemsamenstellingsdata van de Sedimentatlas (gemeten als massafracties) gezien deze het meest gebiedsdekkend is. Deze is geïnterpoleerd volgens de *nearest neighbour* methode met behulp van Matlab. Uit een gevoeligheidsanalyse is gebleken dat de interpolatiemethode geen significant effect heeft op de resultaten (<2%). In de discussie wordt verder ingegaan op de gevoeligheid van de resultaten.

De berekening is uitgevoerd met een constante bodemsamenstelling. Hierbij wordt dus aangenomen dat de samenstelling van de jaren 90 representatief is voor de periode na de bouw van de Afsluitdijk. Gezien de grootschalige zand-slibpatronen sinds de jaren 50 niet sterk zijn veranderd, is dit in dit geval een valide aanname. Dit betekent echter wel dat een gedetailleerde analyse van gebieden met afwisselende zand-slib afzettingen niet mogelijk is. Deze resultaten kunnen worden gevalideerd met behulp van boringen.

De massafracties worden omgerekend naar volumefracties gebruik makend van de lokale bodemsamenstelling en de formulering voor de droge dichtheid van zand-slib mengsels van Van Rijn (2019):

$$\rho_{dry} = \left(1 - \frac{p_{org}}{100}\right) \left[400 \left(\frac{p_{clay}}{100}\right) + 800 \left(\frac{p_{silt}}{100}\right) + 1600 \left(\frac{p_{sand}}{100}\right)\right]$$

De gevoeligheid van de resultaten voor de droge dichtheidsformulering van zand-slibmengsels is onderzocht door de berekening ook uit te voeren met de formulering door Mulder (1995). De resultaten hiervan worden besproken in hoofdstuk 4.

Er is een correctiefactor uitgevoerd voor slibpercentages onder de 15%, waarbij wordt aangenomen dat deze niet bijdragen aan volumeveranderingen, omdat in dit geval sprake is van een zandskelet waarbij slib enkel de poriën opvult (Oost, et al., 2018). Hierbij geldt dus dat wanneer  $p_{slib} < 0,15$ :

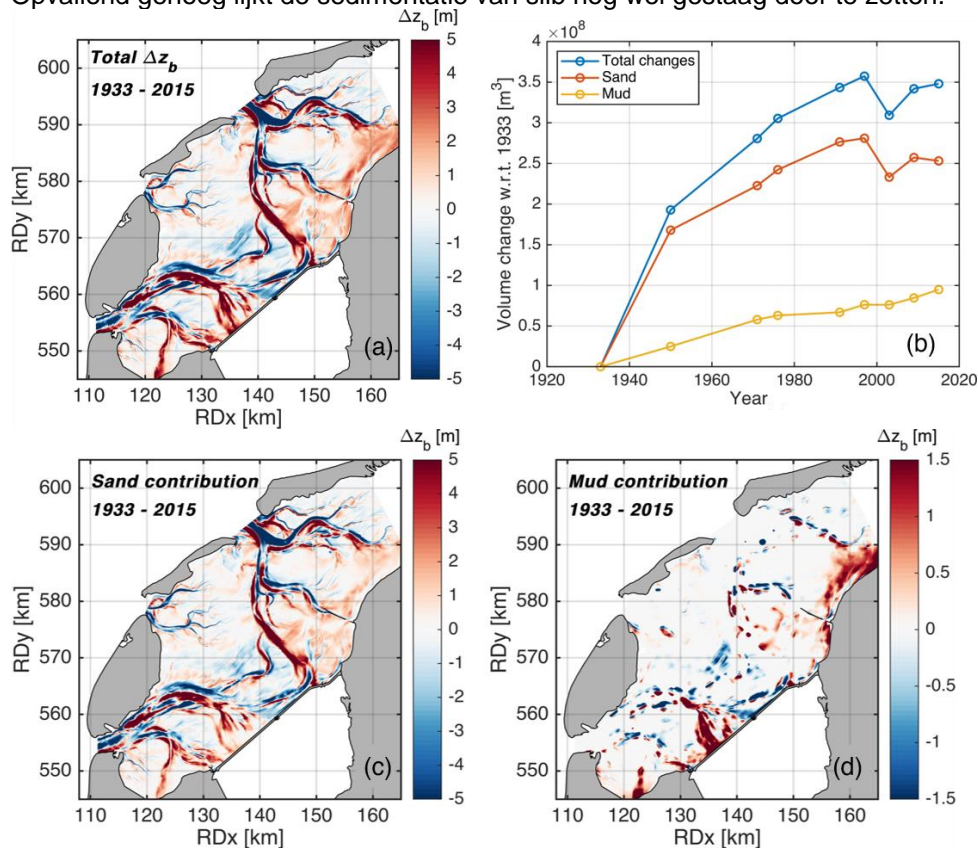
$$\Delta V_{slib} = 0$$

$$\Delta V_{zand} = \Delta V_{tot}$$

### 3.3.2 Westelijke Waddenzee

Figuur 5 toont de resultaten van de grootschalige volumebalans voor de bekkens van het Marsdiep, het Eijerlandse Gat en het Vlie voor de periode 1933 tot 2015. In Figuur 5a worden de totale bodemveranderingen weergegeven, de ruimtelijke patronen van de totale zand-slib bijdrage zijn weergegeven in Figuur 5c en d. De resultaten tonen dat de bijdrage van slib aan de sedimentatie met name in de verlaten geulen van het Balgzand en voor de Afsluitdijk en in het gebied rond Oostbierum en het Terschellingerwad groot is geweest. In grote delen hiervan is sinds 1933 meer dan 1.5 m slib bezonken. Er is slib geërodeerd uit de Doove balg en uit de Waarden, maar dit is significant kleiner dan het volume dat is gesedimenteerd. Het verloop van de sedimentatie/erosie patronen voor zand en slib voor alle beschouwde jaren is weergegeven in Appendix B.

Figuur 5b toont het verloop van de volumeveranderingen voor de twee sedimentfracties. De netto respons van de zandfractie lijkt sinds de jaren '90 sterk te zijn gedempt. Grote bruto veranderingen vinden nog steeds plaats, maar deze zijn met name te linken aan geulmigratie. Opvallend genoeg lijkt de sedimentatie van slib nog wel gestaag door te zetten.

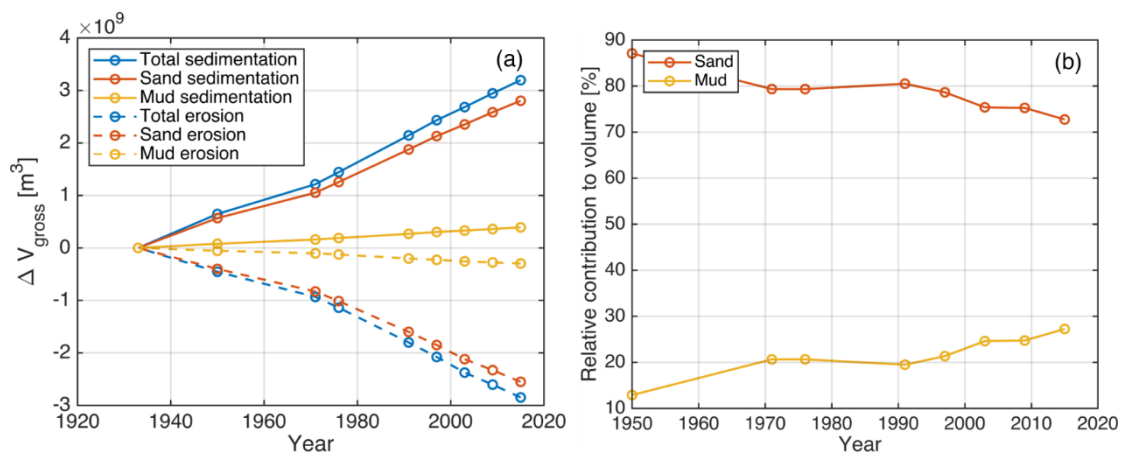


Figuur 5: Volumebalans van de Westelijke Waddenzee: a) bathymetrische veranderingen op basis van Vaklodings data, b) berekende volumeveranderingen in de bekkens, c) geschatte bodemveranderingen ten gevolge van zand sedimentatie en erosie d) geschatte bodemveranderingen ten gevolge van slib sedimentatie en erosie. Merk op dat de kleurenbalken verschillende assen hebben.

Figuur 6a toont de bruto volumeveranderingen in de Westelijke Waddenzee, waarin de totale sedimentatie en erosie weer zijn opgesplitst in de zand- en slibfractie (rode en gele lijnen). Begin jaren '70 heeft een significante trendbreuk plaatsgevonden: zowel de totale sedimentatie volumes als de erosie volumes zijn toegenomen, wat betekent dat het systeem in zijn geheel dynamischer is geworden. Voor de zandfractie zien we dat de totale erosievolumes meer zijn toegenomen dan de sedimentatievolumes, met name rondom het jaar 2000. Dit resulteert in een sterk afgenomen netto sedimentatie van zand, als weergegeven in Figuur 5b. Ook voor de slibfractie zien we dat de trendbreuk sterker is in de erosievolumes. Echter, de sedimentatievolumes blijven hier nog consequent hoger, resulterend in een min of meer constante aanslibbing.

In Figuur 6b is de relatieve bijdrage van zand en slib aan de totale volumeverandering weergegeven.

Hier is te zien dat de bijdrage van slib door de jaren heen is toegenomen en van 13% (voor de periode 1933-1950, initiële respons Afsluitdijk) naar 27% is gestegen (voor de periode 1933-2015). Deze bijdrage is aanzienlijk hoger dan het huidige slibpercentage in de toplaag van de bodem in dit gebied ( $p_{\text{slib}}$ , mediaan = 12,9%).

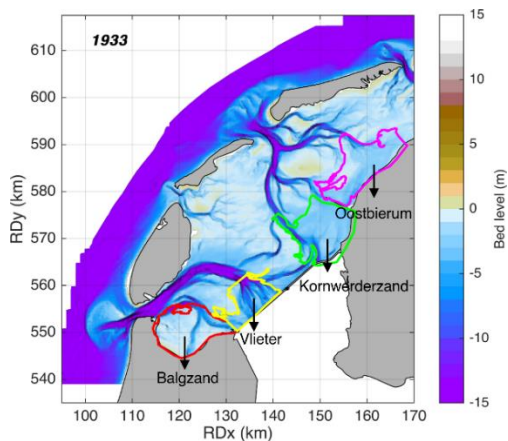


Figuur 6: a) Bruto volumeveranderingen in de bekkens van de Westelijke Waddenzee, b) relatieve bijdrage van zand en slib, cumulatief berekend (voor de totale periode)

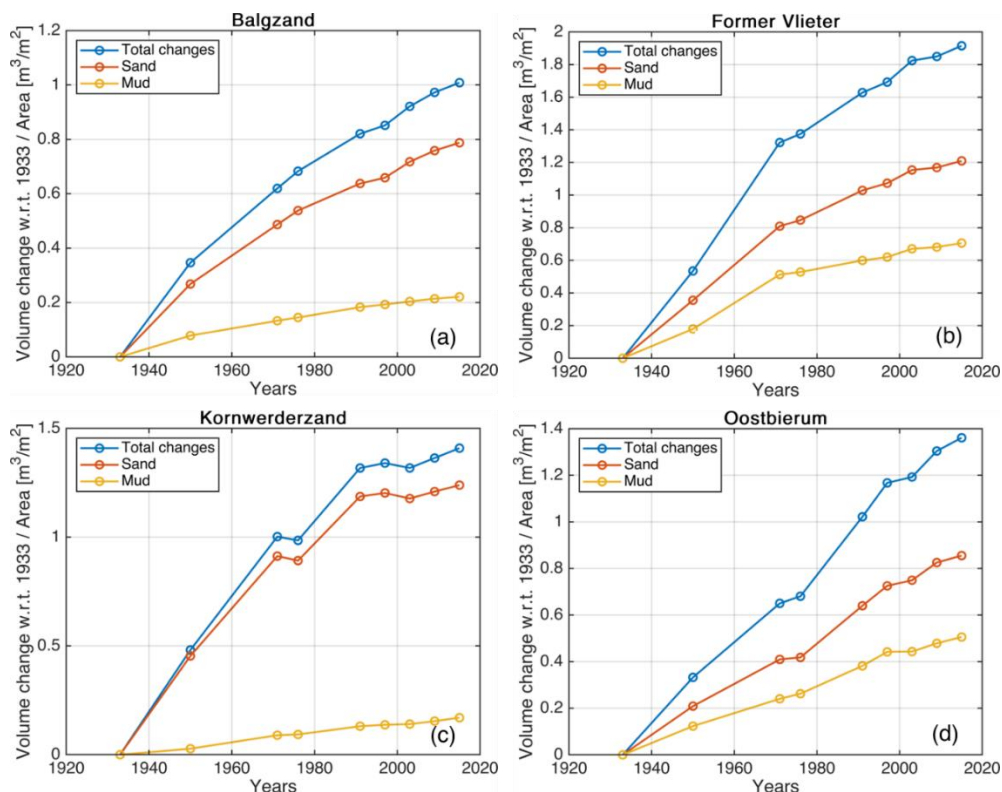
Om de grote bijdrage van slib aan de totale volumeveranderingen in de Westelijke Waddenzee beter te begrijpen, zijn vier deelgebieden waarin veel slib is bezonken verder geanalyseerd (zie Figuur 8). Hierbij zijn de volumeveranderingen per  $\text{m}^2$  weergegeven, om een vergelijking tussen de deelgebieden mogelijk te maken. De polygonen waarop de analyses gebaseerd zijn, zijn weergegeven in Figuur 7.

In het Balgzand en in de verlaten Vlieter zien we een duidelijke afname van de sedimentatiesnelheden door de jaren heen (zowel voor de zand- als de slibfractie). Daarnaast valt het op dat de respons in het Balgzand sneller was (met maximale sedimentatie snelheden tussen 1933 en 1950) dan in de Vlieter (maximale sedimentatie snelheden vonden later pas plaats, namelijk tussen 1950 en 1971). De afstand tot het zeegat kan hierin een rol hebben gespeeld. Hierbij moet worden opgemerkt dat de maximale sedimentatiesnelheden in het Balgzand wel lager zijn. In Kornwerderzand zien we ook een afname van de sedimentatiesnelheden, maar deze heeft pas in de jaren '90 plaatsgevonden. Bovendien is dit signaal sterker voor de zandfracties. Het gebied van de vlakte van Oostbierum lijkt nog altijd te sedimenteren. De procentuele bijdrage van slib aan de totale volumeveranderingen is met name groot in de Vlieter en in Oostbierum (37-39%).





Figuur 7: Polygonen deelgebieden voor volumebalansen



Figuur 8: Volumebalans voor sterk sedimenterende slibrijke deelgebieden in de Westelijke Waddenzee

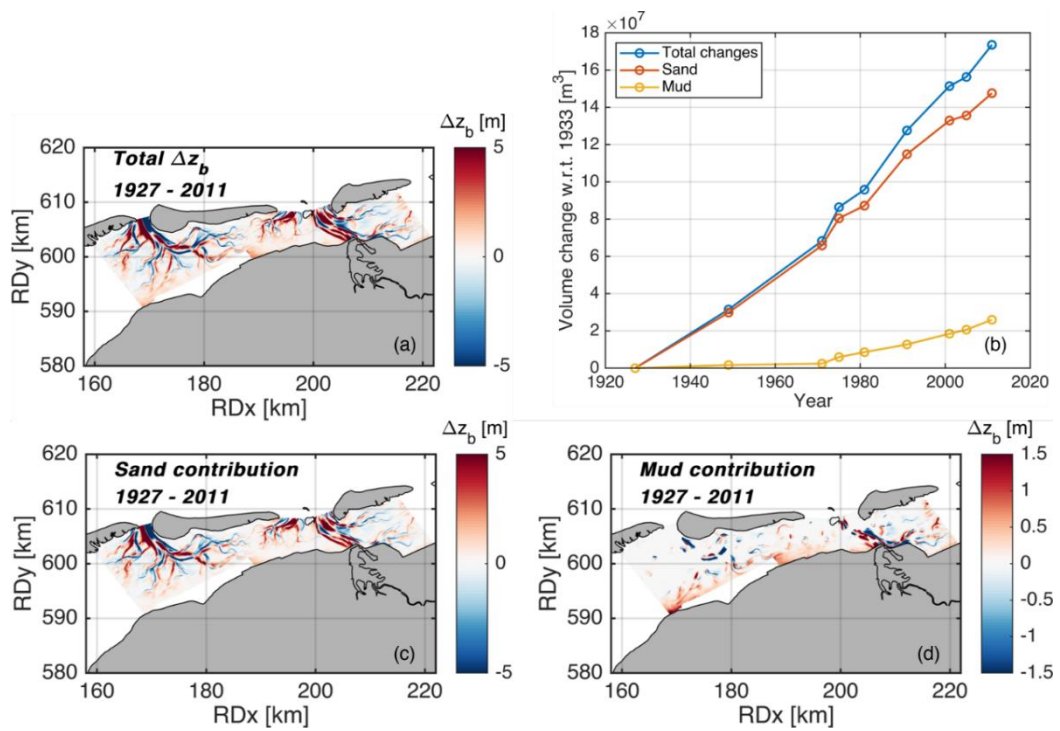
### 3.3.3 Ameland en Friesche zeegat

De resultaten van de volumebalans voor de bekken van het Ameland en het Friesche zeegat zijn weergegeven in Figuur 9. Hierin zijn alleen gebieden meegenomen waar Vaklodingen data van beschikbaar is, wat betekent dat de kwelders ten westen van Holwerd aan de Friese kust en de kwelders langs de Groningse kust buiten beschouwing zijn gelaten. In deze bekken is de bijdrage van slib met name langs de vastelandskust en bij het wantij van Schiermonnikoog groot. Een trendbreuk in de slibvolumes is zichtbaar na 1971, waarna de slibsedimentatie sterk is toegenomen. Dit is zeer waarschijnlijk een gevolg van de afsluiting van de Lauwerszee in 1969.

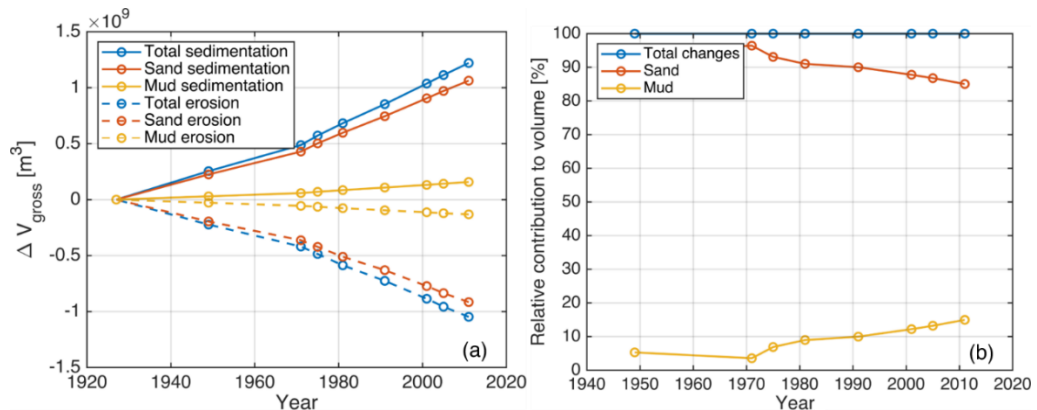
In de Westelijke Waddenzee zagen we eerder een min of meer constante slibsedimentatie, terwijl de netto aanzanding sterk is afgenomen (en in sommige periodes zelfs negatief is, zie Figuur 5b). In de Oostelijke Waddenzee zien we echter dat beide trends (zand en slib

sedimentatie, netto) nog altijd positief zijn en niet significant afnemen (voor slib neemt deze zelfs toe). Net als in de Westelijke Waddenzee zijn de bruto sedimentatie en erosie volumes in de Oostelijke Waddenzee aanzienlijk toegenomen rond 1971 (Figuur 10a). Volgens deze analyse is de bijdrage van slib aan de totale sedimentatie in de periode 1927-2011 15% (Figuur 10b). Deze waarde zal een stuk hoger liggen wanneer de vastelandskwelder Noorderleech (ongeveer tussen Zwarte Haan en Holwerd) wordt meegenomen in de analyse (dat is nu niet gedaan omdat hier geen Vaklodingen data van beschikbaar is). Cleveringa (2018) concludeerde op basis van een sedimentatiesnelheid van 1,0 tot 2,0 cm per jaar, dat hier 216.790 tot 585.332 m<sup>3</sup> slib per jaar wordt afgezet. Indien we dit meenemen in onze berekeningen (ervan uitgaande dat deze sedimentatiesnelheden representatief zijn voor de periode 1927-2011), komen we uit op een totale bijdrage van slib van 25%-43%.

Daarnaast stelt hij dat volume dat in de deelgebieden buiten de kuberingsvakken van de hele Waddenzee sedimenteert waarschijnlijk een omvang heeft van 12% tot 31% van de sedimentatie binnen de kuberingsvakken. Dit is een omvang die niet verwaarloosd mag worden bij het beschouwen van de sedimentatie in (en sedimentbalansen van) het Waddengebied.



Figuur 9: Volumebalans in de bekken van het Ameland en Friesche zeegat

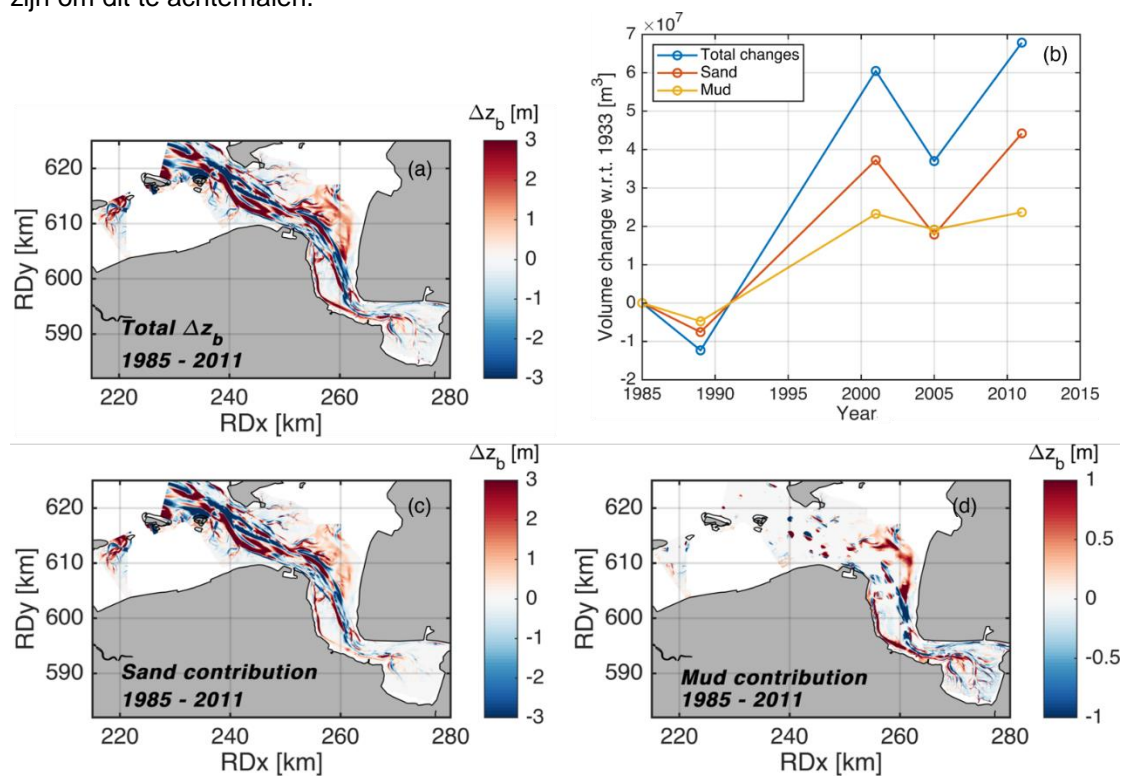


Figuur 10: a) Bruto volumeveranderingen in de bekken van het Ameland en Friesche zeegat, b) relatieve bijdrage van zand en slib

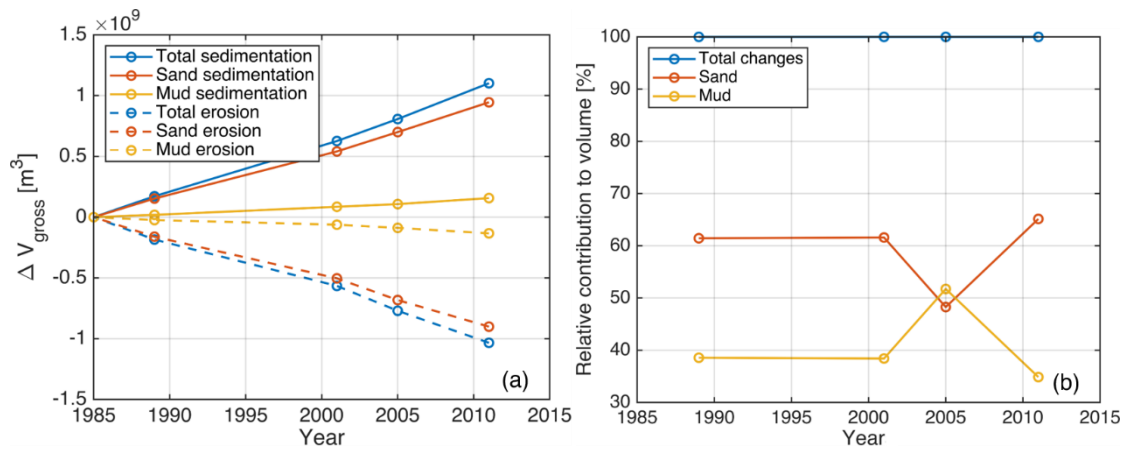
### 3.3.4 Groninger Wad en Eems-Dollard

Vanwege databeschikbaarheid van de bodemligging is de volumebalans van de Eems-Dollard voor een kortere periode geanalyseerd. De lange termijn trend is importerend (Figuur 11), met een gemiddelde sedimentatiesnelheid van 2,64 miljoen m<sup>3</sup>/jaar.

In de periode 1985-2000 zien we dat slib en zand een vergelijkbare bijdrage leverden aan deze sedimentatie (Figuur 12b, ongeveer 40% en 60% respectievelijk). Dit komt overeen met de bevindingen van Elias & van Maren (2020). Hoewel zand en slib een vergelijkbare bijdrage leveren, verschillen de bruto volumeveranderingen ervan ongeveer een orde van grootte. Dit is omdat de bruto veranderingen van zand met name worden bepaald door de geulmigratie en dit (bijna) geen netto volumeveranderingen teweegbrengt. In 2005 zien we een abrupte afname van de bijdrage van zand, die gepaard gaat met een netto erosie van het beschouwde gebied (Figuur 11b). Het is nog wel de vraag of dit het gevolg is van een afwijking in de data. Deze meting is uitgevoerd door WSA Emden en is vanuit het Gauss-Kruger stelsel omgezet naar RD en verticaal is de hoogte aangepast naar NAP. Er zijn twijfels of deze correctie goed is uitgevoerd (Elias & Maren, 2020). Een detailanalyse van verschillende deelgebieden zal nodig zijn om dit te achterhalen.



Figuur 11: Volumebalans het Groninger Wad en de Eems-Dollard

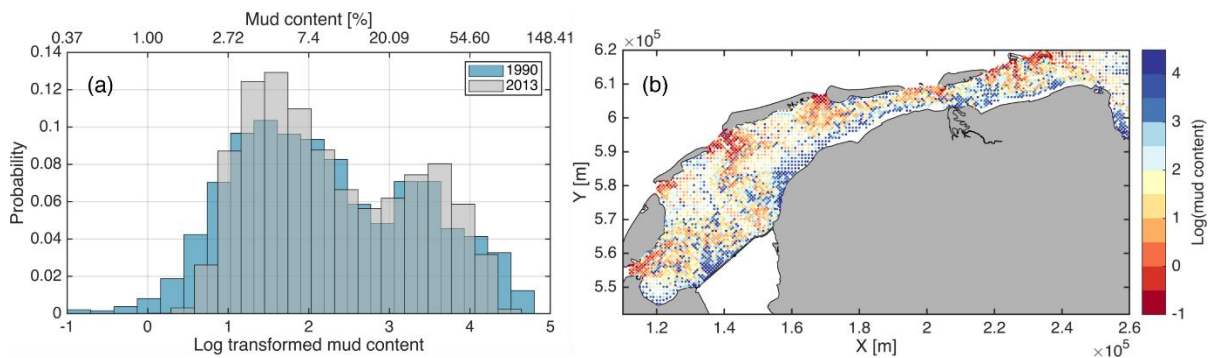


Figuur 12: Bruto volumeveranderingen in de bekkens van het Groninger Wad en de Eems-Dollard, b) relatieve bijdrage van zand en slib

### 3.4 Bimodale verdeling van het slibgehalte

Herman, et al. (2018) lieten eerder zien dat de statistische verdeling van het log-getransformeerde slibgehalte een bimodale verdeling heeft, met vele observaties met lage slibgehalten (range 2-7%, modus omstreeks 4,5%) en vele met hoge slibgehalten (range 20-50%, modus omstreeks 35%), maar minder er tussenin. Bovendien toonden ze dat vele observaties die tussen de modi in vallen een gemiddelde waarde (gemiddeld over meerdere SIBES jaren) hebben die naar een van de twee modi toe neigt.

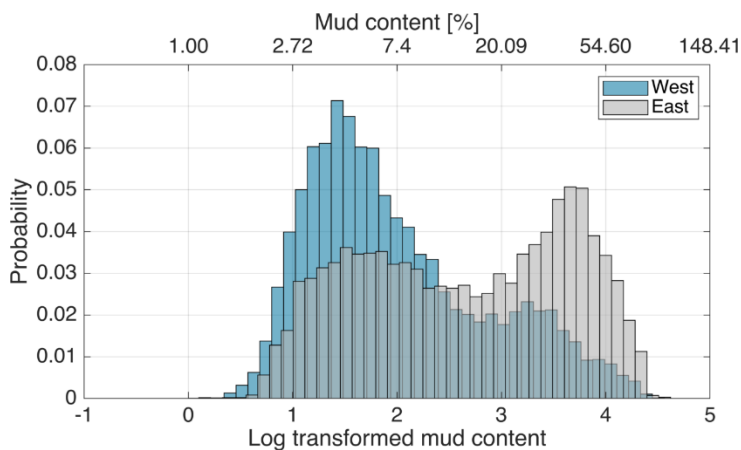
De waarnemingen werden gedaan voor de observaties van de SIBES dataset. Figuur 13a toont de statistische verdeling berekend met de SIBES data (2013, grijs) en met data van de Sedimentatlas (~1990, blauw). Hierbij zijn enkel de gebieden geanalyseerd die voor beide datasets zijn bemonsterd (de litorale zones van de Waddenzee bekkens, zie Figuur 4). In Figuur 13b is te zien wat de ruimtelijke verdeling is van deze waarden. Hierin is voor het geheel alle data van de Waddenzee geplot (litoraal en sublitoraal). Het valt op dat de eerste modus (lage slibgehalten) relatief op dezelfde plek ligt voor beide datasets. De tweede modus (hoge slibgehalten) lijkt iets naar rechts te zijn verschoven, wat er op zou kunnen wijzen dat de slibrijke platen relatief slibrijker zijn geworden. Dit kan echter ook een gevolg zijn van de data zelf: deze analyse is immers gevoelig voor het aantal datapunten per gebied. Algemeen kunnen we stellen dat de bimodale verdeling van de slibgehaltenes relatief stabiel is gebleven over de afgelopen 25 jaar.



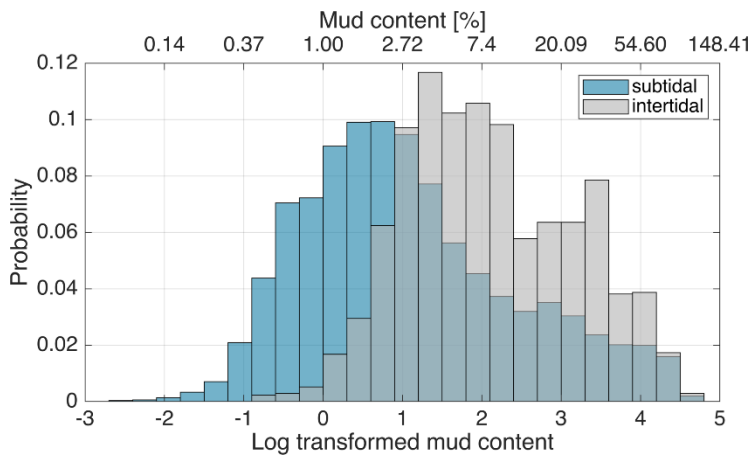
Figuur 13: Bimodaliteit van de bodemslibgehaltenes.: a) De verdeling voor de SIBES data (2013) en de data van de Sedimentatlas op de intergetijdengebieden (1990), b) de log-getransformeerde slibgehaltenes voor de hele Waddenzee (berekend met de data van de Sedimentatlas).



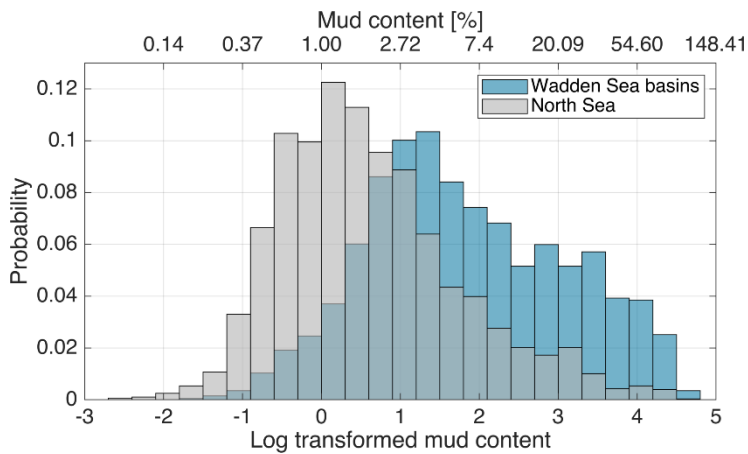
Als we deze verdeling los analyseren voor de Westelijke Waddenzee (eerste drie zeegaten) en voor de oostelijke Waddenzee (inclusief Eems-Dollard), zien we duidelijke verschillen (Figuur 14): de modus voor de lage slibgehalten bevindt zich nagenoeg op dezelfde plek, terwijl de modus voor de hoge slibgehalten voor de Oostelijke Waddenzee een stuk hoger ligt. Dit toont dat de “slibrijke” delen van de Oostelijke Waddenzee een stuk slibrijker zijn dan in de Westelijke Waddenzee. Bovendien heeft de Westelijke Waddenzee meer slibarme observaties en de Oostelijke Waddenzee meer slibrijke observaties. Hierbij moet worden vermeld dat dit niet direct een gevolg is van een hogere plaat/geul verhouding in Oost vergeleken met West (waarbij de platen over het algemeen slibrijker zijn en de geulen slib arm). De gepresenteerde observaties zijn immers allemaal bemonsterd op intergetijdenplaten. Bovendien lijkt de waargenomen bimodaliteit met name een intergetijden fenomeen te zijn: Figuur 15 toont de berekende verdelingen voor de subtidale gebieden en de platen. Ten gevolge hiervan is in de statistische verdeling van de slibgehalten op de Noordzee (Sedimentatlas data, Waddenzee bekkens uitgesloten) geen duidelijke bimodaliteit te zien (zie Figuur 16).



Figuur 14: Bimodaliteit in de platen van de Westelijke en de Oostelijke Waddenzee (incl Ems-Dollard) berekend met SIBES data



Figuur 15: De verdeling van de log-getransformeerde slibgehalten op de platen en in de geulen. Berekend met data van de Sedimentatlas.



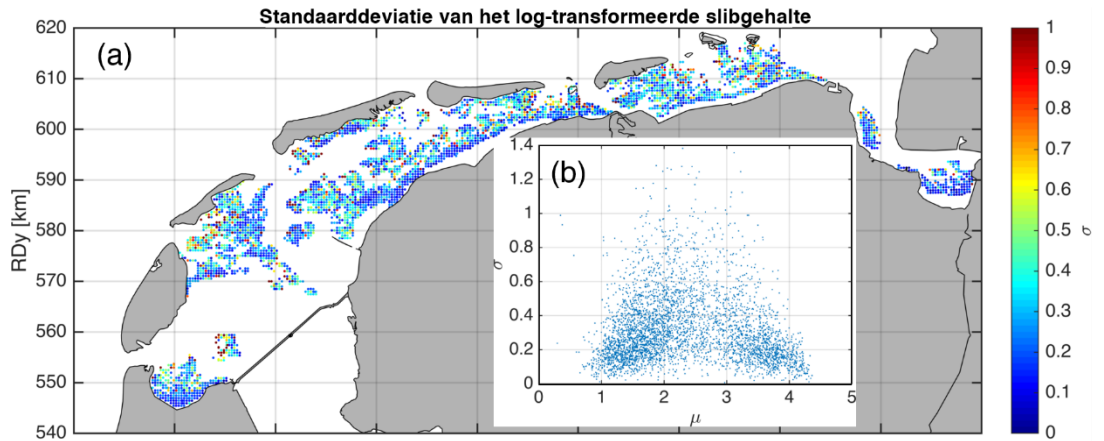
Figuur 16: De verdeling van de log-getransformeerde slibgehalten in de Waddenzee bekkens en in de Noordzee. Berekend met data van de Sedimentatlas.

Het bimodale karakter van de slibgehalten in de bodem is ontdekt op systeemsgaal. Op kleine schaal (individuele platen/geulen) kan deze verdeling niet altijd worden afgeleid, mede omdat hier een hogere dataresolutie voor nodig zou zijn. De huidige data heeft immers een resolutie van 500-1000 m. De bimodaliteit manifesteert zich op deze kleine schaal echter ook in de vorm van harde zand-slib grenzen (van Ledden, 2003). Dit betekent dat er mechanismes zijn die een lage of hoge slibgehalten in een bepaald gebied in stand houden, die ook over kleine ruimtelijke afstand meer of minder dominant worden. Uit deze aanvullende analyse van Herman et al. (2018) blijkt dat de bimodaliteit zich alleen manifesteert op intergetijdengebieden en dat de westelijke en oostelijke Waddenzee een gespiegelde bimodaliteitscurve hebben, waarbij de westelijke Waddenzee vooral platen met lage slibgehalten toont en de oostelijke Waddenzee platen met hoge slibgehalten.

## 3.5 Variabiliteit

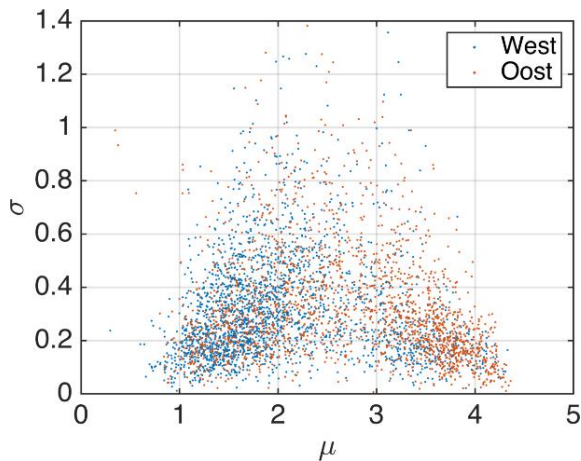
### 3.5.1 Korte termijn: jaarlijkse variabiliteit in zomermetingen

De jaarlijkse observaties van de SIBES dataset maken het mogelijk om de korte termijn variabiliteit van de slibgehalten te analyseren en hiermee de lange termijn ontwikkeling in perspectief te plaatsen. Eerder lieten Herman, et al. (2018) al zien dat locaties met een gemiddelde waarde tussen de twee modi in (zie Sectie 3.4) een hogere standaarddeviatie hebben dan locaties met een gemiddelde waarde rond een van de twee modi (deze zijn veel stabiel, zie Figuur 17b). De standaard deviatie toont de variabiliteit over de beschouwde periode (2008-2013). Figuur 17a toont de ruimtelijke patronen van de standaard deviatie van de log-getransformeerde slibgehalten. Hieruit valt op dat de hele kuststrook relatief stabiel is, evenals het Balgzand en de Eems-Dollard.



Figuur 17: Korte termijn variabiliteit van het slibgehalte (na log-transformatie), berekend met de SIBES data 2008-2013: a) ruimtelijke verdeling van de standaarddeviatie, b) relatie tussen de standaarddeviatie en het gemiddelde slibgehalte per meetstation

Figuur 18 toont de analyse van Figuur 17b, opgesplitst in de Westelijke en de Oostelijke Waddenzee. Hier zien we dat de variabiliteit van beide gebieden vergelijkbaar is. Ook blijkt hieruit dat de Westelijke Waddenzee relatief meer slibarme platen heeft, en de Oostelijke Waddenzee juist meer slibrijke platen bevat (zoals eerder waargenomen in Figuur 14).

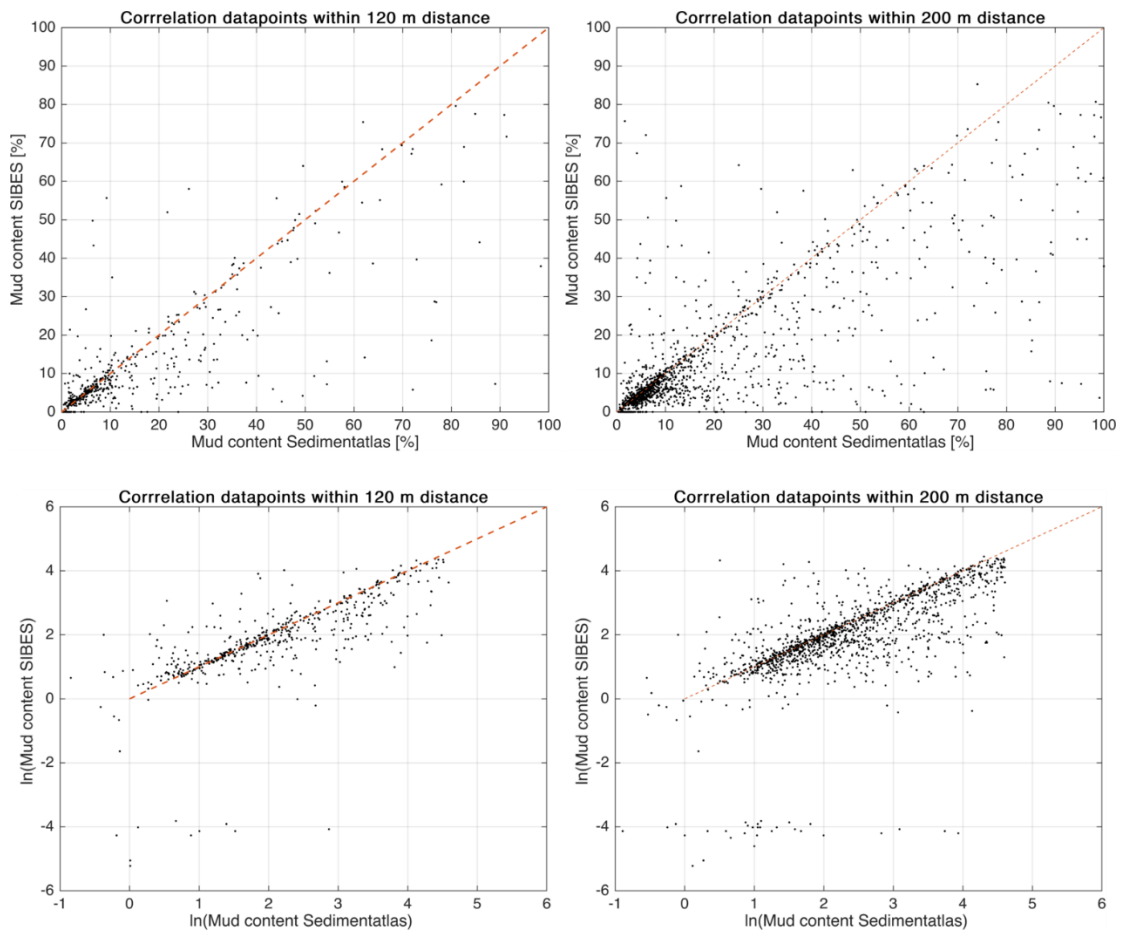


Figuur 18: Variabiliteit van de bodemslibgehalten (na log-transformatie) in de Westelijke en de Oostelijke (inclusief Eems-Dollard) Nederlandse Waddenzee

De bevinding dat de observatiepunten met een slibgehalte tussen de twee modi in meer variabel is, is gedaan voor alle data, zonder deze te linken aan specifieke locaties. Om een beter inzicht te krijgen in dit fenomeen zijn in Appendix C voor een aantal deelgebieden de gemeten slibwaardes geplote voor 2008-2013. Deze slibwaardes zijn ingedeeld in een aantal klassen, waarvan grofweg kan worden gesteld dat de paarse klasse de metingen in het “dal” van de bimodale verdeling zijn. Wat hierin opvalt is dat de *tussenwaardes* (tussen de twee modi in) die een overgang vormen tussen een slibrijk en een slibarm gebied relatief stabiel zijn. Een voorbeeld hiervan is het Balgzand. Daarentegen is te zien dat wanneer tussenwaardes zich enkel tussen slibarme gebieden bevinden, deze een grotere variabiliteit tonen, zoals bijvoorbeeld op de platen bij het Eijerlandse gat. Deze bevindingen worden ondersteund door de berekende variabiliteit in Figuur 18.

### 3.5.2 Middellange termijn variabiliteit

Zoals eerder besproken, vertoont de bimodale verdeling van het voorkomen van slib in de jaren '90 geen grote verschillen met de huidige verdeling (SIBES). Dit suggereert een huidige grootschalige stabiliteit op de middellange termijn (jaren-decennia). Figuur 19 toont de correlatie tussen observaties van beide datasets. Omdat de meetpunten echter niet exact op dezelfde locatie liggen, zijn alleen punten binnen een straal van 120 (links) of 200 m (rechts) met elkaar vergeleken. De figuren laten zowel de slibgehalten zien zonder en met log-transformatie. We zien hier een duidelijke trend rondom de 1:1 lijn. Dit suggereert 2 dingen: ten eerste laat het feit dat vele punten rondom een lijn liggen zien dat er geen grote veranderingen zijn geweest in de slibgehalten op de meeste plekken. Ten tweede zien we dat deze punten rondom de 1:1 lijn liggen, wat pleit voor dat de metingen van de Sedimentatlas en die van SIBES vergelijkbare resultaten geven. Dit ligt in de lijn der verwachtingen gezien beide analysemethodes gebaseerd zijn op laserdiffractie.



Figuur 19 Correlatie tussen de Sedimentatlas data en SIBES data voor observatiepunten die binnen een straal van 120 m (links) en 200 m (rechts) van elkaar vandaag liggen.

## 4 Discussie

In de analyse van de grootschalige evolutie van de bodemslibgehaltenes zijn datasets met elkaar vergeleken waarvan de sedimentmonsters op verschillende dieptes zijn genomen. Hier is niet voor gecorrigeerd, omdat het een kwalitatieve analyse betreft om de algemene sedimenttypes aan te duiden (Figuur 2). Swarts (2004) toonde echter aan dat het slibgehalte in de toplaag gemiddeld 26% hoger is dan in de laag 5-25 cm (terwijl de mediane korrelgrootte overigens niet verschilt voor de laag 0-5 cm en 5-25 cm).

Bovendien is de variabiliteit en bijbehorende onzekerheid door het gebruik van verschillende analysemethodes groter dan de onzekerheid door het verschil in diepte. Swarts (2004) gaf eerder aan dat de Sedimentatlas een sterke overschatting van de slibgehaltenes geeft, waarbij het “slibgehalte” (in dit geval de 16  $\mu\text{m}$  fractie) bepaald met de Malvern 2 tot 3 maal zo hoog bleek te liggen als bepaald met de afslibmethode. Later werd geconcludeerd dat deze conclusie niet geldig was voor de 63  $\mu\text{m}$  fractie en dat een factor 1,6-1,8 waarschijnlijk een betere inschatting geeft (Arcadis, 2013). Figuur 19 toont echter dat de metingen van de Sedimentatlas en SIBES zeer vergelijkbaar zijn en dat algemene opvattingen omtrent de overschatting van het slibgehalte in de Sedimentatlas dataset niet geldig zijn in deze context.

De gepresenteerde volumebalans geeft een schatting voor de relatieve bijdragen van zand en slib, waarbij deze schatting afhankelijk is van een aantal aannames. Dit zijn onder andere (1) de gekozen bodemslibkaart, (2) de relatie tussen de bodemsamenstelling en de droge dichtheid en (3) het corrigeren van de volumebijdrage van lage slibgehaltenes. Eerder is al vastgesteld dat de interpolatiemethode slechts een verschil tot 2% geeft, dus die wordt hier niet meer meegenomen. De gepresenteerde analyses zijn uitgevoerd met data van de Sedimentatlas Waddenzee (1), met de dichtheidsformulering van Van Rijn (2019) (2) en inclusief de correctiefactor (3). Om de gevoeligheid van de resultaten voor deze aannames te testen, is exact dezelfde analyse van de Westelijke Waddenzee uitgevoerd voor andere mogelijke keuzes (zie Tabel 1). Hierbij zijn alle mogelijke varianten tussen de aannames getest.

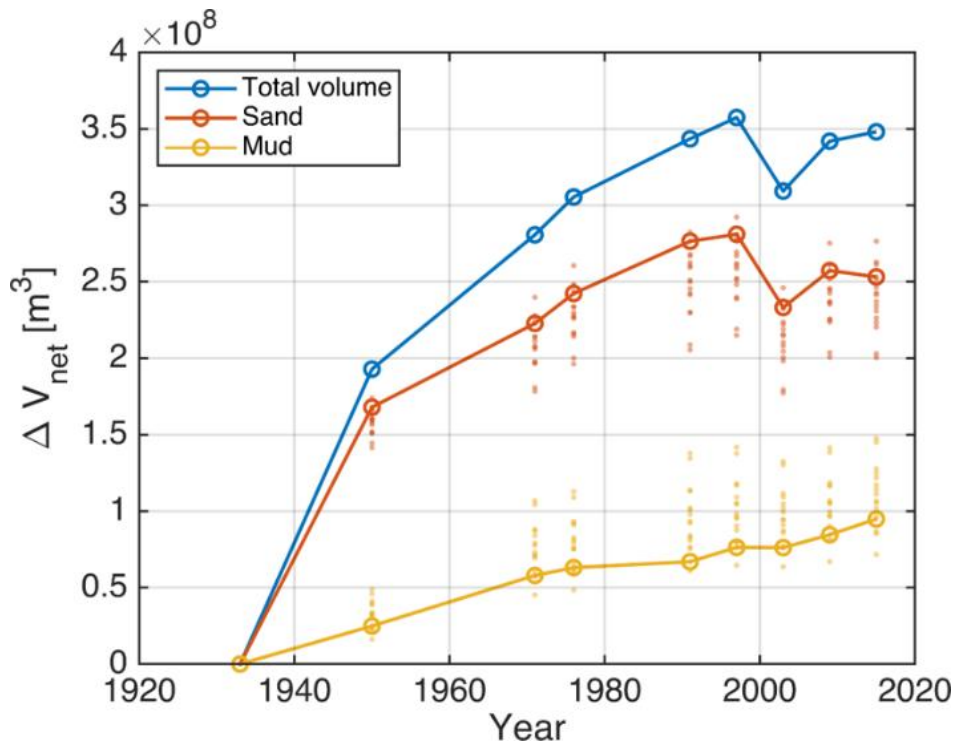
Tabel 1: Aannames van de zand-slib volumebalansen. De aannames van de best guess zijn gemarkeerd in blauw, de overige opties waarmee de spreiding is berekend zijn grijs gemarkeerd.

Aanname 1: Data bodemslib	Aanname 2: Dichtheid Zand-Slib mengsels	Aanname 3: Correctiefactor $V_{\text{slib} < 15\%}$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sedimentatlas</li> <li>• SIBES, gebaseerd op gemiddelde waarden per meetstation</li> <li>• SIBES, gebaseerd op maximale waarden per meetstation</li> <li>• SIBES, gebaseerd op minimale waarden per meetstation</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• van Rijn, 2019</li> <li>• Mulder, 1995</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meenemen</li> <li>• Niet meenemen</li> </ul>

Figuur 20 toont de resultaten van alle berekende combinaties, zie hiervoor het spreidingsdiagram. De doorgetrokken streep toont de resultaten volgens de “best guess”. Deze figuur toont de robuustheid van de resultaten: de daadwerkelijk relatieve bijdrage van slib zal tussen de 21 en 42% liggen. Dit is nog altijd aanzienlijk groter dan het ruimtelijk gemiddelde slibgehalte in de toplaag van de bodem voor en na de afsluiting van de Zuiderzee. De aannames hebben geen invloed op de tijdelijke patronen van de zand/ slib volumeveranderingen. De resultaten blijken het meest gevoelig te zijn voor de gekozen dataset (1), gevolgd door de dichtheidsformulering (2) en als laatste het wel/niet meenemen



van de correctiefactor voor lage slibgehaltenes (3). Het rekenen met de Sedimentatlas en met de SIBES gebaseerd op gemiddelde waarden geeft gelijkwaardige resultaten. De resultaten van de *best guess* zitten tamelijk aan het uiteinde van de range zit. Dit komt met name doordat we hier de droge dichtheid met de formulering van Van Rijn (2019) berekenen, en deze enigszins rekening houdt met compactie, terwijl de formulering van Mulder (1995) dat niet expliciet doet. Gezien de lange tijdschaal van de analyse is dit gewenst. Daarnaast heeft de correctiefactor voor lage slib percentages hier een kleine invloed op.

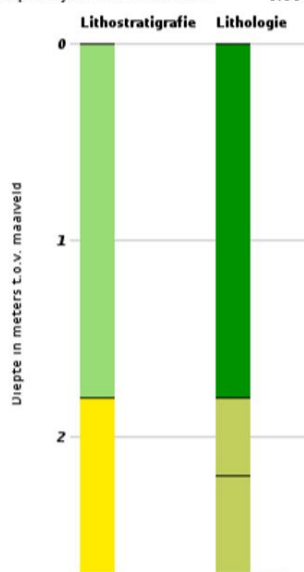


Figuur 20: Spreiding tussen de mogelijke resultaten van de volumebalans Westelijke Waddenzee, afhankelijk van de aannames. Ieder punt geeft het resultaat weer van een berekening met een mogelijke set aannames. Hiermee wordt de totale spreiding van de resultaten, per periode, weergegeven. De doorgetrokken streep toont de resultaten volgens de "best guess".

Deze analyse kan worden aangevuld met een uitgebreide validatie met boringen op de plekken waar volgens de analyse veel slib permanent is bezonken. Hier was binnen dit project geen tijd voor. Wel zijn enkele boringen van DINOloket bekeken ter validatie van de eerste resultaten van de Westelijke Waddenzee. Figuur 21 toont boringen op drie locaties waar volgens de analyse meters slib is bezonken. Profiel 1 (Balgzand) is genomen in 1946 en toont dat hier fijn sediment te vinden is tot -1.8 m diepte, waaronder een leemgrond zich bevindt. Profiel 2 is in hetzelfde jaar genomen in de verlaten Vlieter en toont dat hier 3.5 m fijn sediment te vinden is. Deze profielen zijn in overeenstemming met de berekende sedimentatie. Profiel 3 is genomen langs de Friesche Kust (in 1982) en toont dat hier tot aan 16m diepte de grond geclassificeerd is als klei. Dit bewijst dat de gemeten slibgehaltenes niet beperkt blijven tot de oppervlakte, maar dat zich onder maaiveld niveau een metersdik slibpakket bevindt. Ook dit is in overeenstemming met de berekende volumes.

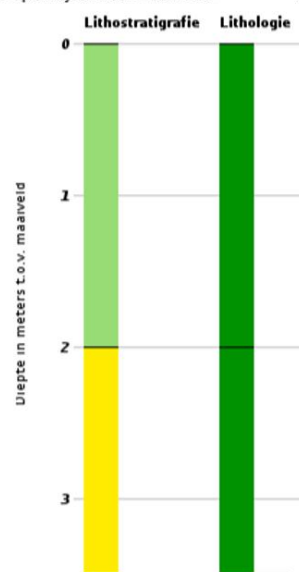
### Boormonsterprofiel 1

Identificatie: B14E1201  
Coördinaten: 122834, 546002 (RD)  
Maaiveld: -2.40 m t.o.v. NAP  
Dieptetraject t.o.v. Maaiveld: 0.00 m - 2.70 m



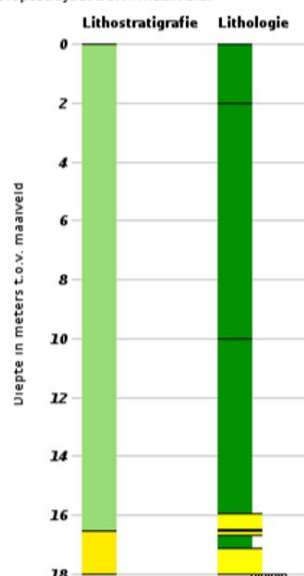
### Boormonsterprofiel 2

Identificatie: B09H1320  
Coördinaten: 133421, 555443 (RD)  
Maaiveld: -6.90 m t.o.v. NAP  
Dieptetraject t.o.v. Maaiveld: 0.00 m - 3.50 m



### Boormonsterprofiel 3

Identificatie: B05G0090  
Coördinaten: 161066, 584298 (RD)  
Maaiveld: -1.50 m t.o.v. NAP  
Dieptetraject t.o.v. Maaiveld: 0.00 m - 18.00 m



Figuur 21: Boringen DINOloket. In de legenda staat NA voor formatie van Naaldwijk en BX voor formatie van Boxtel.

Uit de volume analyse blijkt dat er in de afgelopen eeuw grote morfologische veranderingen hebben plaatsgevonden ten gevolge van onder andere menselijke ingrepen. Deze veranderingen hebben een grote import van sediment teweeggebracht. Over de bron van de zandfracties is al veel geschreven: de zandhonger in het bekken wordt aangevuld door de buitendelta's, die op hun beurt weer een erosieve trend hebben getoond (Elias, Van Der Spek, Wang, & De Ronde, 2012). De vraag is of de geobserveerde sliedsedimentatie in bijvoorbeeld

de verlaten geulen een herverdeling van slib is, of dat het sediment van buitenaf komt. De resultaten tonen een (sterke) netto import van slib. Dit suggereert een netto slib import van buitenaf (waar het aanbod ruimvoldende is), die mogelijk wordt gemaakt mits de condities gunstig zijn.

Uit de resultaten van de volumebalansen is gebleken dat de bruto sedimentatie/erosievolumes vanaf de jaren '70 zijn toegenomen (terwijl de totale netto volumeveranderingen destijds niet sterk veranderden). Dit suggereert dat het systeem dynamischer is geworden. Dit zou onder andere te maken kunnen hebben met de toename in de getijslag, zoals waargenomen door Nederhoff et al. (2017) (alle meetstations binnen de Waddenzee bekkens tonen een relatief abrupte toename in de M2 amplitude, die plaatsvond in de jaren '70). Echter, dit zou ook een meetartefact van de Vaklodingen data kunnen zijn. Er wordt geadviseerd hier in de toekomst nader onderzoek naar te doen.

Zowel Oost et al. (2018) als Smits & Nederhoff (2018) hebben eerder inschattingen gedaan van de slibsedimentatie in de Waddenzeebekkens. Oost et al. (2018) schatten een recente slibsedimentatie van  $0.7-4.1 \cdot 10^9$  kg/jaar en  $0.7-3.4 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup>/jaar. Hiermee zou slib voor 8-37% bijdragen aan de huidige jaarlijkse sedimentatie. Smits & Nederhoff (2018) analyseerden de bijdrage van slib aan de sedimentatie van de Westelijke Waddenzee in de periode 1991 tot 2015 en merkten op dat de totale sedimentatie in deze periode sterk fluctueert, waardoor de relatieve bijdrage van slib sterk verschilt afhankelijk van de gekozen periode. Op basis van de Sedimentatlas werd geschat dat slib een bijdrage leverde tussen 13-29%. De sterk fluctuerende netto sedimentimport in de Westelijke Waddenzee is in de voorliggende studie ook opgemerkt. Door de volumeverandering van zand- en slib los te analyseren is waargenomen dat deze fluctuaties zeer waarschijnlijk een zandig fenomeen zijn, terwijl de slibimport nog altijd min of meer constant lijkt door te zetten. Daarnaast is getoond dat de totale bijdrage van slib ongeveer een factor 2 gevoelig is voor de aannames van de analyse, maar dat dit het gedrag van de berekende slibsedimentatie (netto sedimentatie/erosie) niet beïnvloedt, waardoor de lange termijn trends goed kunnen worden geanalyseerd.

Cleveringa (2018) stelde dat volume dat in de deelgebieden buiten de kuberingsvakken van de hele Waddenzee sedimenteert waarschijnlijk een omvang heeft van 12% tot 31% van de sedimentatie binnen de kuberingsvakken. Dit is een aanzienlijke omvang die niet verwaarloosd mag worden bij het beschouwen van de sedimentatie in de Waddenzee. Daarom wordt aanbevolen om in een vervolgstudie de resultaten van Cleveringa (2018) te combineren met de resultaten van de huidige studie, om tot een complete slibbalans te komen.

## 5 Conclusies

Grote veranderingen in de slibgehalten vonden plaats na de afsluiting van de Zuiderzee: voormalig zandige verlaten geulen slibden dicht en ook in het Balgzand is hierna een sterke toename van het bodemslib geweest. Het Terschellinger wantij is daarentegen slibarmer geworden. Tussen 1950 en 1990 is de hoeveelheid slib op het wantij van Schiermonnikoog sterk toegenomen, waarschijnlijk ten gevolge van de afsluiting van de Lauwerszee.

Uit de zand-slib volumebalans is naar voren gekomen dat slib in belangrijke mate heeft bijgedragen en nog bijdraagt aan de sedimentatie van de Waddenzeebekkens. Deze bijdrage is ongeveer 27% in de Westelijke Waddenzee en 15% in de Oostelijke Waddenzee (Amelander en Friesche zeegat) voor de periode 1927/1933-2015. Hierin zijn alleen de gekubeerde gebieden van de Vaklodingen data meegenomen. Het is opvallend dat het aandeel van slib aan de netto sedimentatie door de tijd is toegenomen. In het Groninger Wad en de Eems-Dollard (geanalyseerd als 1 gebied) zorgde slib voor bijna 40% van de totale sedimentatie in de periode 1985-2015.

Hoewel de bodemslibgehalten grote lokale variaties tonen over de afgelopen 125 jaar, is het opvallend dat deze relatief stabiel zijn gebleven sinds 1990. Dit is onder andere zichtbaar in de statistische verdeling van het bodemslib: de bimodale verdeling hiervan vertoont geen grote schommelingen. Deze bimodale verdeling lijkt overigens een eigenschap te zijn van de intergetijdengebieden: zowel geulen in de bekkens als de kustzone aan de Noordzee kant vertonen deze verdeling niet of nauwelijks.

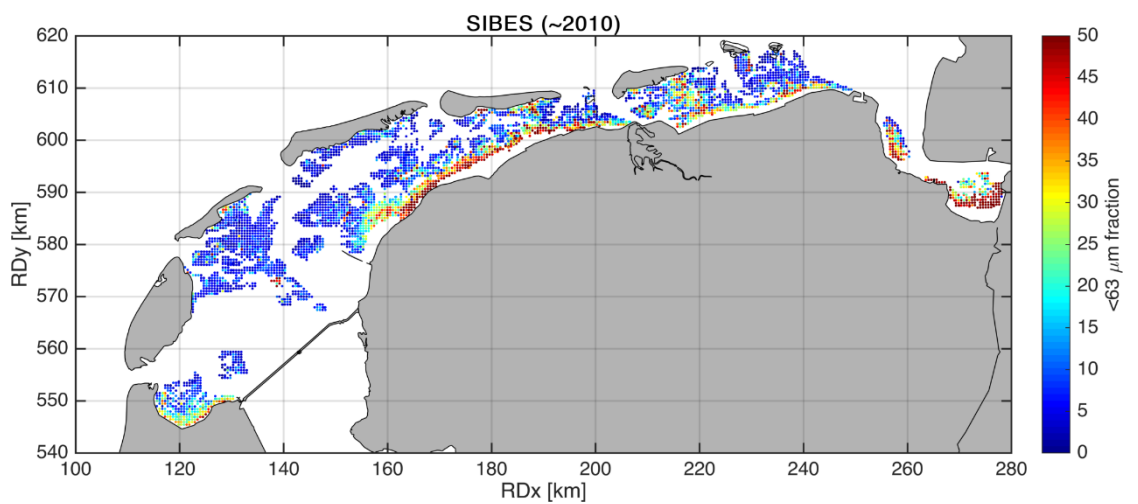
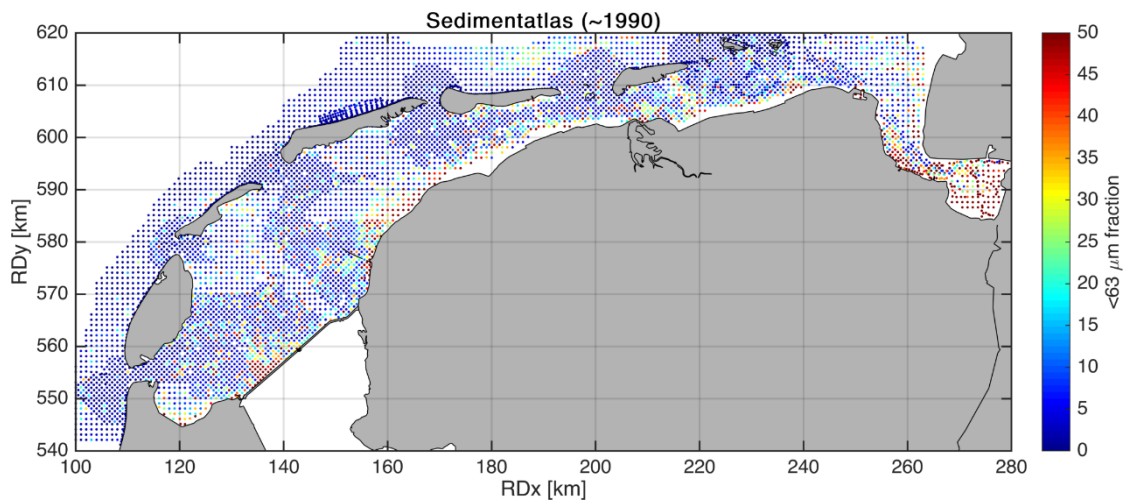
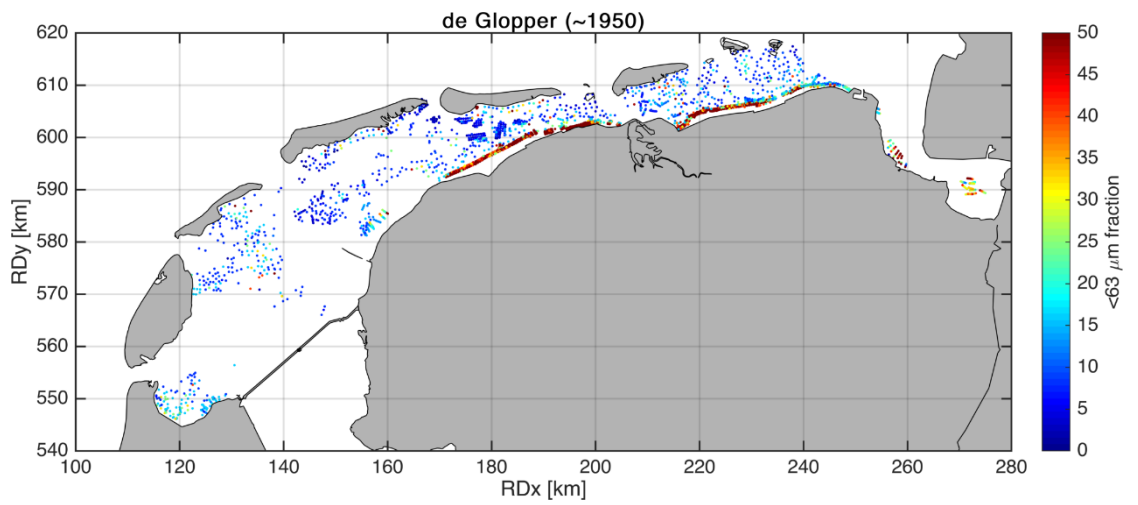
## 6 Referenties

- Arcadis. (2013). *Bijdrage slib aan de sedimentatie in de Waddenzee, Rapport in opdracht van Frisia Zout*. Arcadis rapport 076892814:A.
- Cleveringa, J. (2018). *Slibsedimentatie in de kwelders van de Waddenzee. Bijdrage aan de kwantificering van sinks voor slib in de Waddenzee i.h.k.v. project KRW Slib*. Arcadis.
- de Glopper, R. J. (1967). Over de bodemgesteldheid van het waddengebied. *Van zee tot land*, 5-61.
- de Koning, J., & Wiggers, A. (1964). *Over de bodemgesteldheid van de oostelijke wadden*. Kampen: Rapp Directie van de Wieringermeer.
- de Vries, B., Dankers, P., & Vroom, J. (2018). *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*.
- Elias, E. (2018). *Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1926-2015). Rapport 11202190-002*. Deltares .
- Elias, E., & Maren, D. v. (2020). *Morfologische veranderingen Eems-Dollard en Groninger Wad*. Delft: Deltares.
- Elias, E., Van Der Spek, A., Wang, Z., & De Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands Journal of Geosciences*, 293-310.
- Herman, P., van Kessel, T., Vroom, J., Dankers, P., Cleveringa, J., de Vries, B., & Villars, N. (2018). *Mud dynamics in the Wadden Sea: Towards a conceptual model*. Delft: Deltares.
- Hoekstra, H., Winkels, H., & Gerritsen, J. (1998). *De bodemopbouw van de buitendijkse gronden langs de noordkust van Friesland en Groningen. Flevovericht 414*. Lelystad: RWS-Directie IJsselmeergebied.
- Hofstee, J. (1980). *Toelichting op de analysemethoden voor grond, gewas, water en bodemvocht*. Rapport Rijksdienst voor de IJsselmeerpolders.
- Lely, C. (1892). *Resultaten van het Technisch Onderzoek, Zuiderzee-Vereniging. Nota 1-8*.
- Mulder, H. (1995). *De droge dichtheid als functie van het slibgehalte t.b.v. een sediment balans*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat RIKZ.
- Nederhoff, K., Smits, B., & Wang, Z. (2017). *KPP Kennisontwikkeling Morfologie Waddenzee. Data analyse hypsometrie en getij*. Delft: Deltares.
- Oost, A., van der Spek, A., van Oeveren, C., & Tonnon, P. (2018). *The yearly contribution of mud to the net yearly sedimentation volume in the Dutch Wadden Sea*. Delft: Deltares.
- RIKZ. (1998). *Sedimentatlas Waddenzee (CD-Rom)*. Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- Smits, B., & Nederhoff, K. (2018). *Meso schaal volumebalans Westelijke Waddenzee*. Delft: Deltares.
- van Ledden, M. (2003). *Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins (PhD-thesis)*. . Delft: Delft University of technology.
- van Rijn, L. (2019). Settling and Consolidation of Soft Mud-Sand Layers. *J. waterway, port, Coastal, Ocean Eng.* 145 (1): 04018028.
- Wang, Z., Vroom, J., van Prooijen, B., Labeur, R., & Stive, M. (2013). Movement of tidal watersheds in the Wadden Sea and its consequences on the morphological development. *International Journal of Sediment Research*.
- Wiggers, A. (1951). *De bodemgesteldheid van het westelijk waddengebied*. Zwolle: Rapp. Directie van de Wieringermeer.
- Wiggers, A. (1953). *Voorlopig rapport over de bodemgesteldheid van de Dollard*. Zwolle: Rapp. Directie van de Wieringermeer.

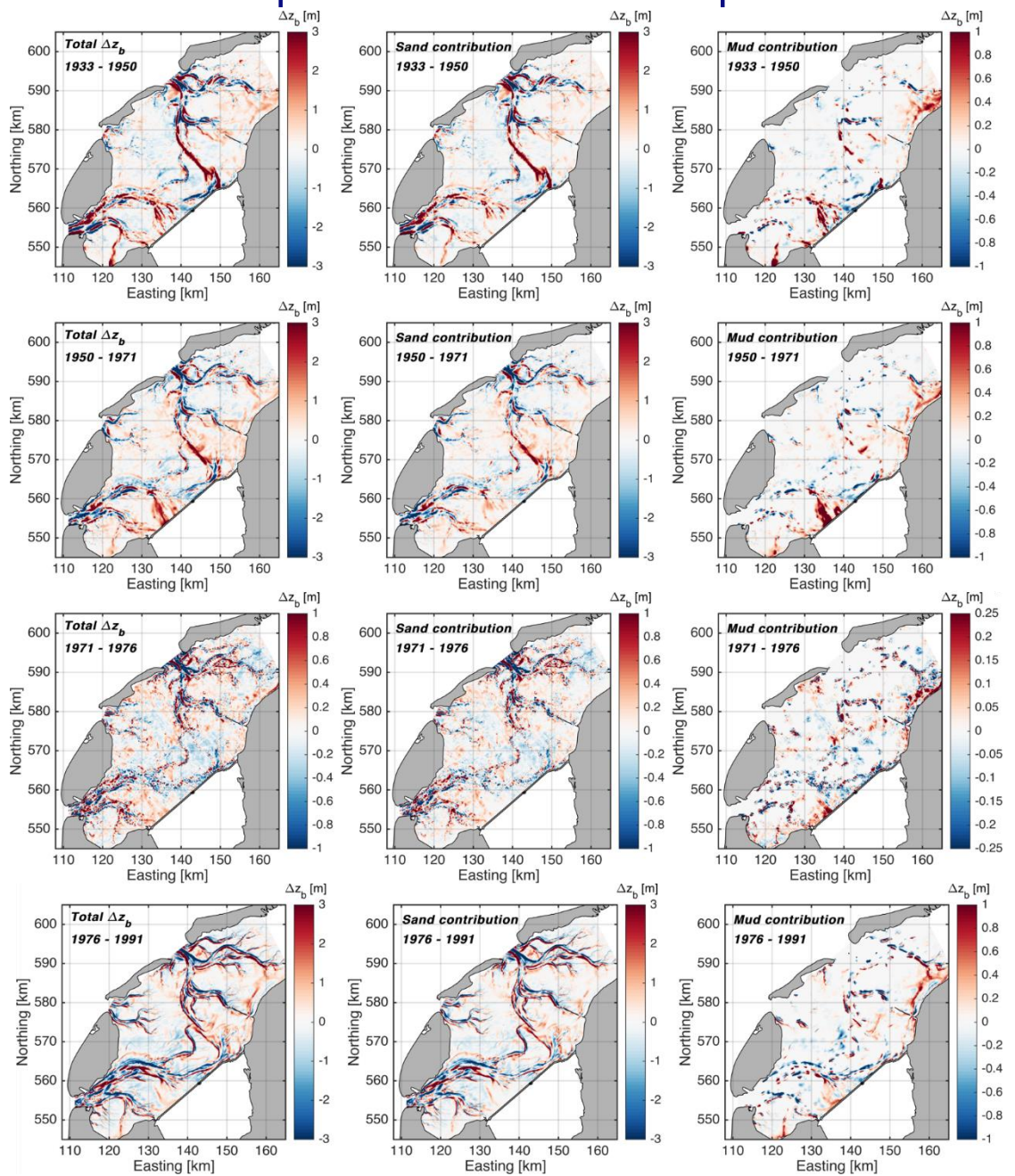


Zwarts, L. (2004). *Bodemgesteldheid en mechanische kokkelvisserij in de Waddenzee.*  
*Rapport RIZA/2004.028 ISBN 9036956862.*

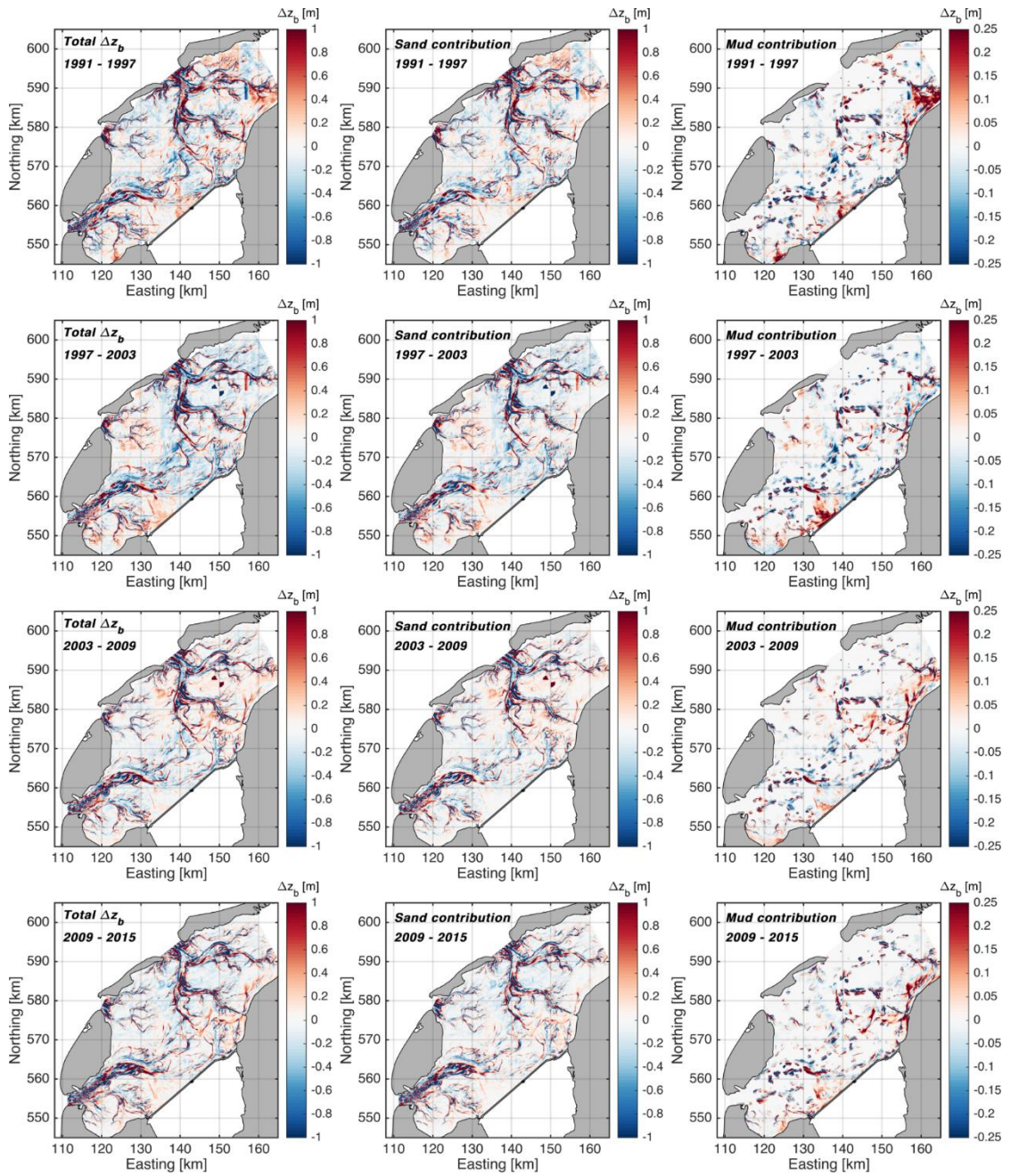
# Appendix A: Bodemslib kaarten zonder log-transformatie

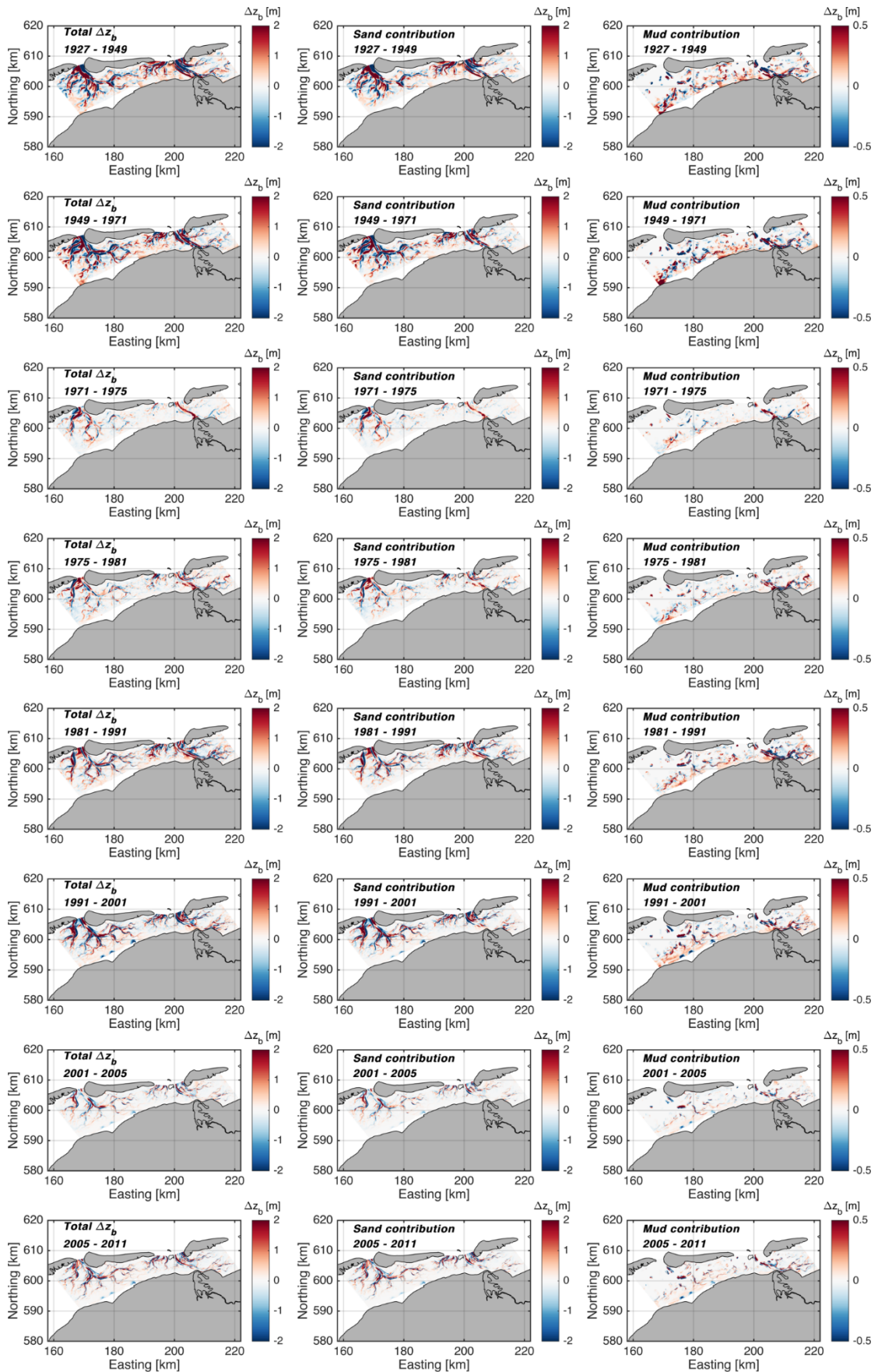


# Appendix B: Verloop sedimentatie/erosie patronen

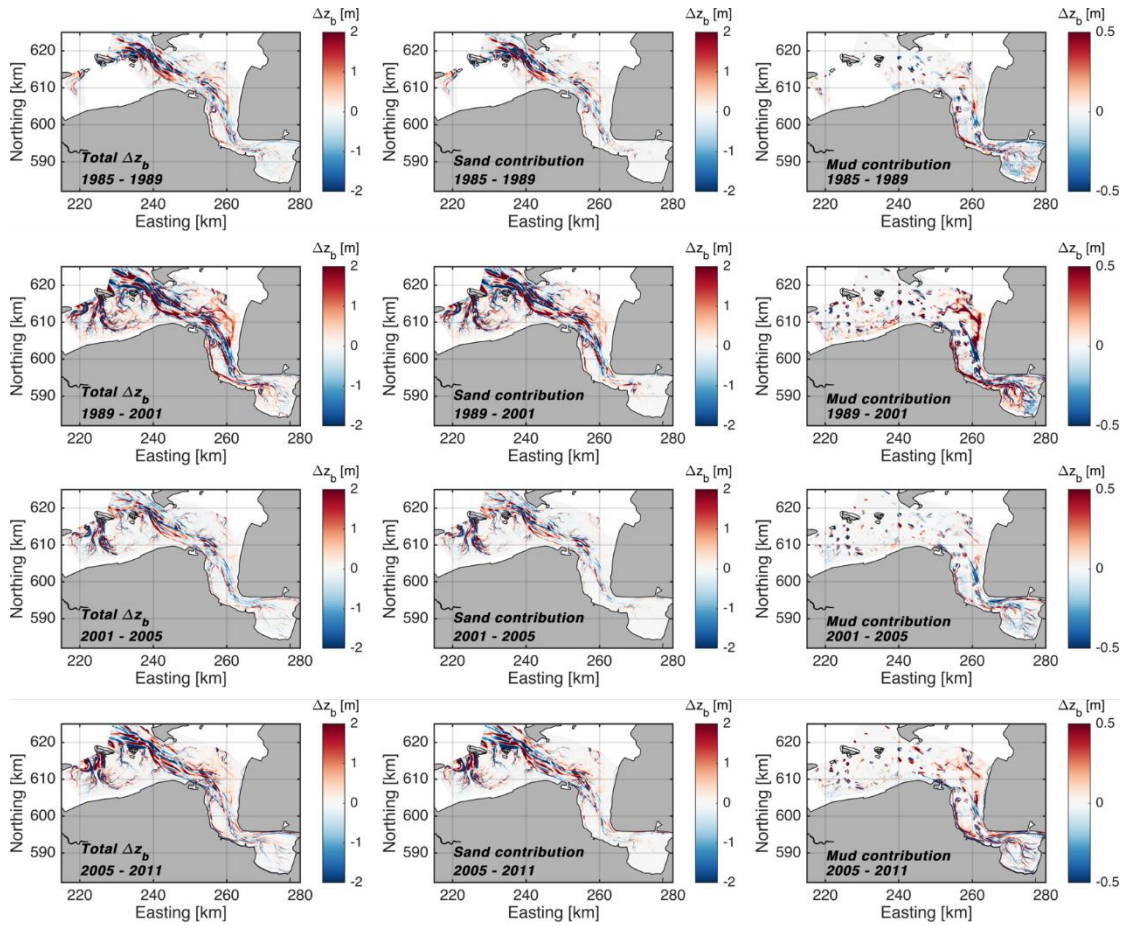




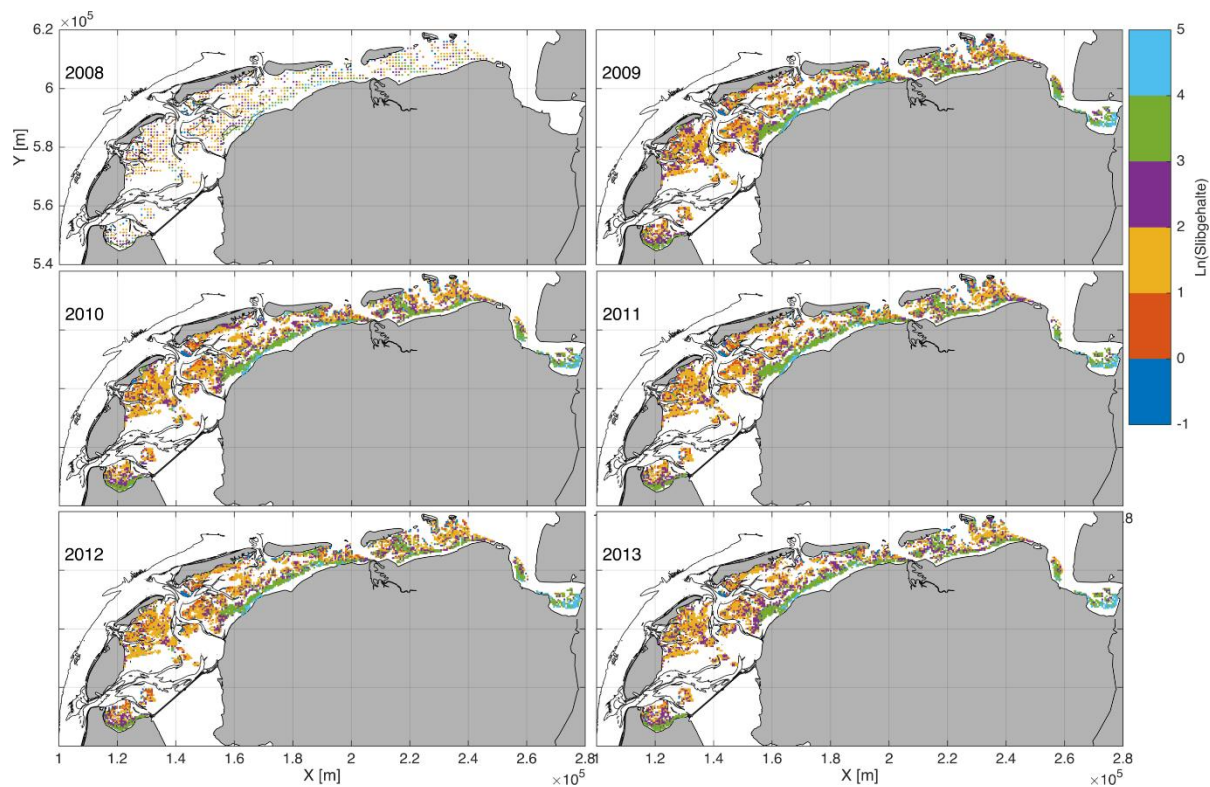


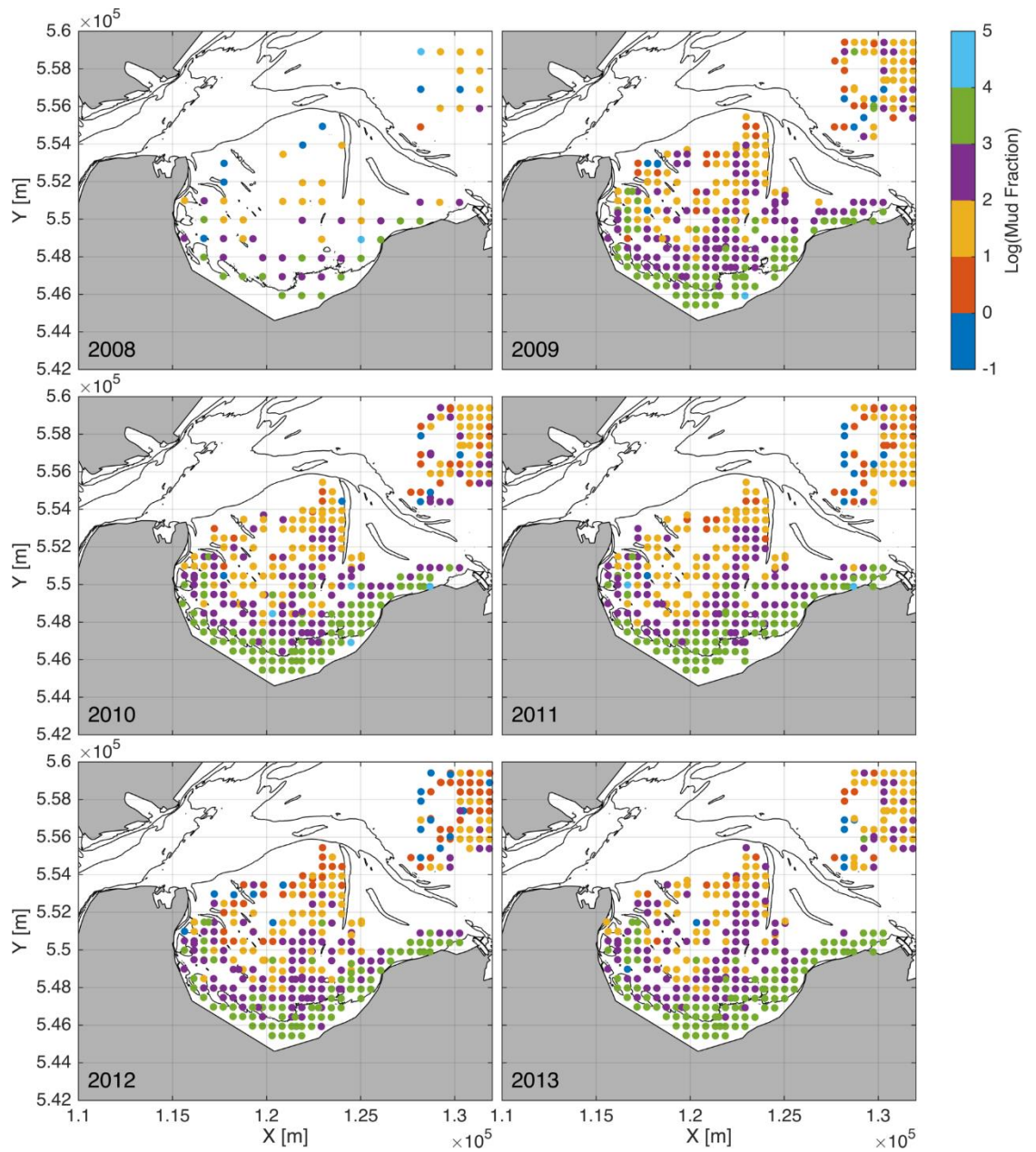


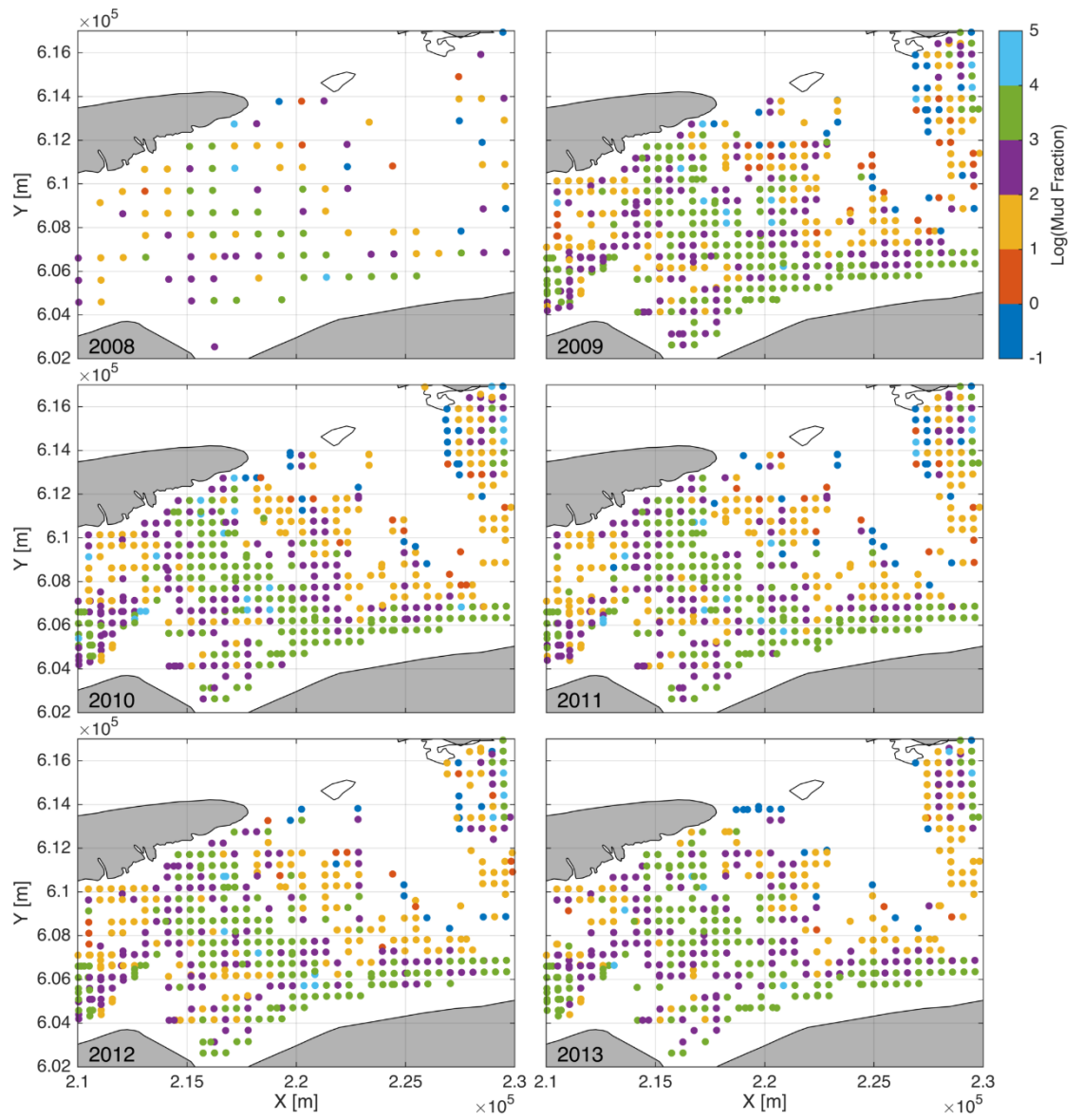




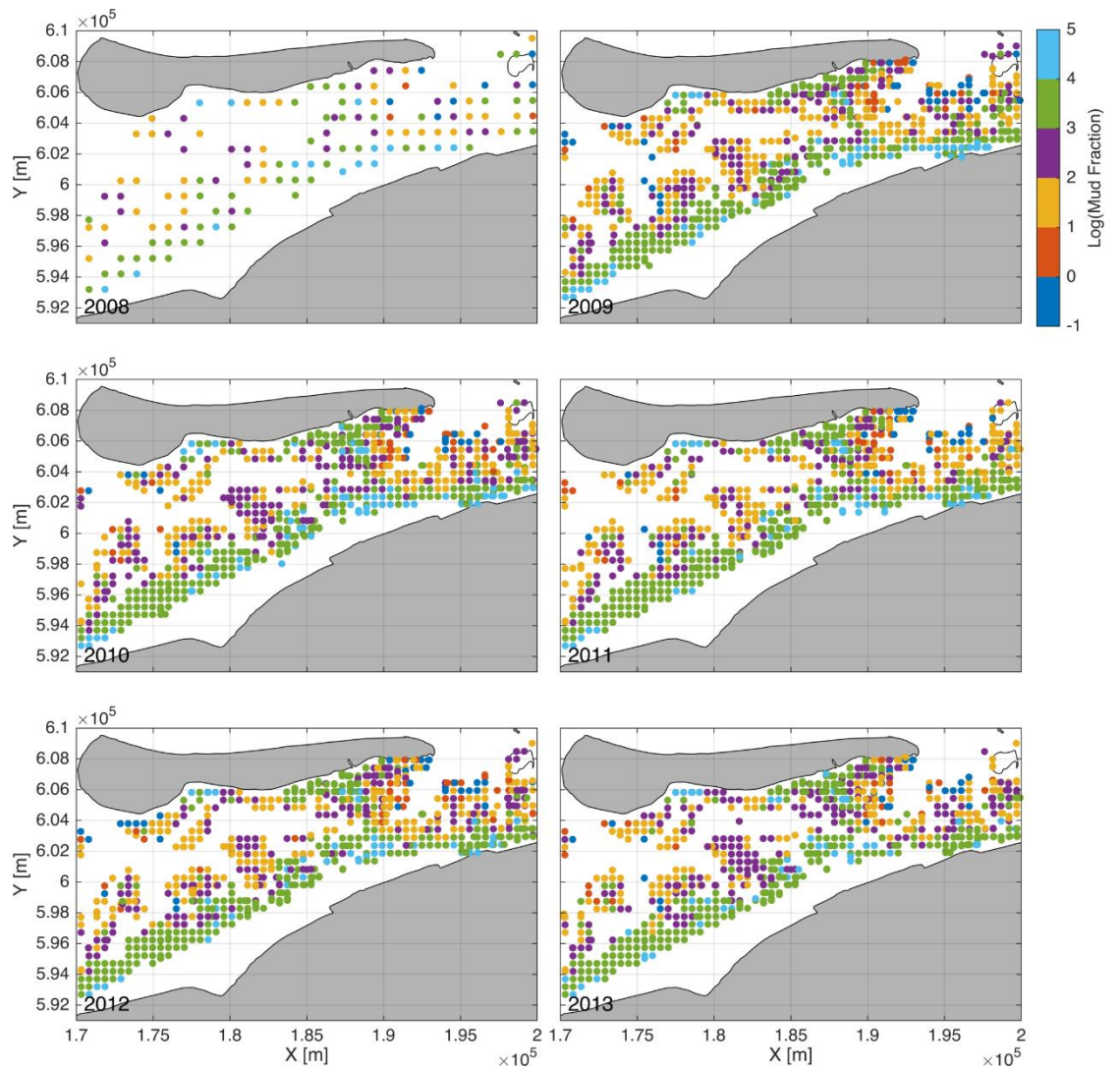
## Appendix C: Variabiliteit log-getransformeerde slibgehaltenes



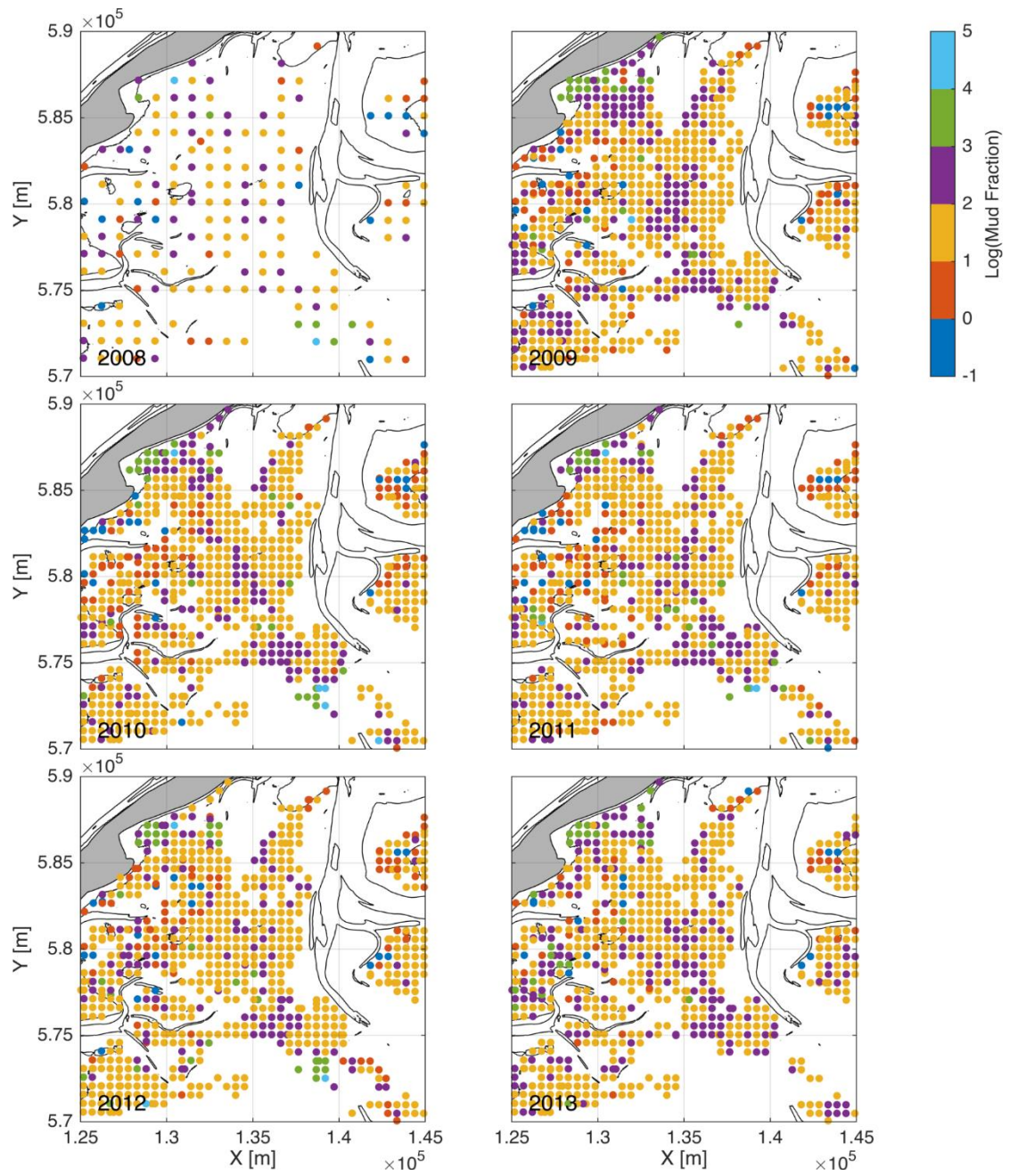












Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

**Deltares**

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