

## Memo

<b>Datum</b> 8 december 2021	<b>Ons kenmerk</b> 11206799-004-ZKS-0002	<b>Aantal pagina's</b> 1 van 26
<b>Contactpersoon</b> Julia Vroom	<b>Doorkiesnummer</b> +31(0)88 335 8061	<b>E-mail</b> Julia.Vroom@deltares.nl
<b>Onderwerp</b> Slibdynamiek in de Waddenzee		

## 1 De Waddenzee en slib

### 1.1 Belang van slib voor de Waddenzee

Slib is fijn sediment, dat in de Waddenzee alom aanwezig is. Het zit in de *waterkolom* als 'zwevende stof' en wordt afgezet op de *bodem*. Daar kan het weer worden opgewoeld door stroming en golven. Zwevend slib beïnvloedt de hoeveelheid licht die in de waterkolom kan doordringen. De hoeveelheid licht is van belang voor de primaire productie, de algengroei die de basis van het voedselweb vormt en daarmee doorwerkt naar andere organismen, zoals schelpdieren die algen uit het water filteren en zelf door vogels worden gegeten. Hoge concentraties zwevend slib vormen een belemmering voor zichtjagers, bijvoorbeeld visetende vogels, en voor filtrerende organismen. Toxische stoffen hechten aan slib, worden met het slib door de Waddenzee verspreid en kunnen in slibrijke gebieden accumuleren.

Zand en slib sedimenteren en eroderen in de Waddenzee. Omdat slib zich vooral afzet in luwere gebieden, zijn er slibarme en slibrijke bodems in de Waddenzee. Geulen en stranden zijn veelal zandig, getijdenplaten zijn soms zandig en soms slibrijk, kwelders zijn altijd slibrijk. Kweldervegetatie bevordert het invangen van slib, doordat het de stroming afremt en de bodem beschermt bij stormen. Doordat slib een belangrijke bijdrage levert aan het meegroeien van kwelders en wadplaten met relatieve zeespiegelstijging, is slib op de lange termijn van belang voor de geomorfologische ontwikkeling en voor de hoogwaterveiligheid.

Slib in de bodem heeft ook invloed op de ecologie via bentische algen (microfyto benthos), die zich het best ontwikkelen op slibrijke bodems waar genoeg nutriënten voorhanden zijn. Deze algen zijn een belangrijke voedselbron voor bodemdieren. Bovendien leggen ze slib vast op de bodem, in en rondom de zomerperiode, waardoor er (tijdelijk) minder slib in de waterkolom terecht komt.

Op sommige plaatsen ervaren we overlast van slib, bijvoorbeeld als het bezinkt in havens en vaargeulen. Om de toegankelijk te garanderen, moet dit slib gebaggerd worden, waarna het elders in de Waddenzee weer wordt verspreid. Door rekening te houden met de stroming en het gedrag van het slib, kunnen we het slib zo verspreiden, dat er een optimum gevonden kan worden tussen de vaarafstanden en de retourstroom van verspreid slib naar de havens en vaargeulen.



Algen op slib (foto: Jelmer Cleveringa)



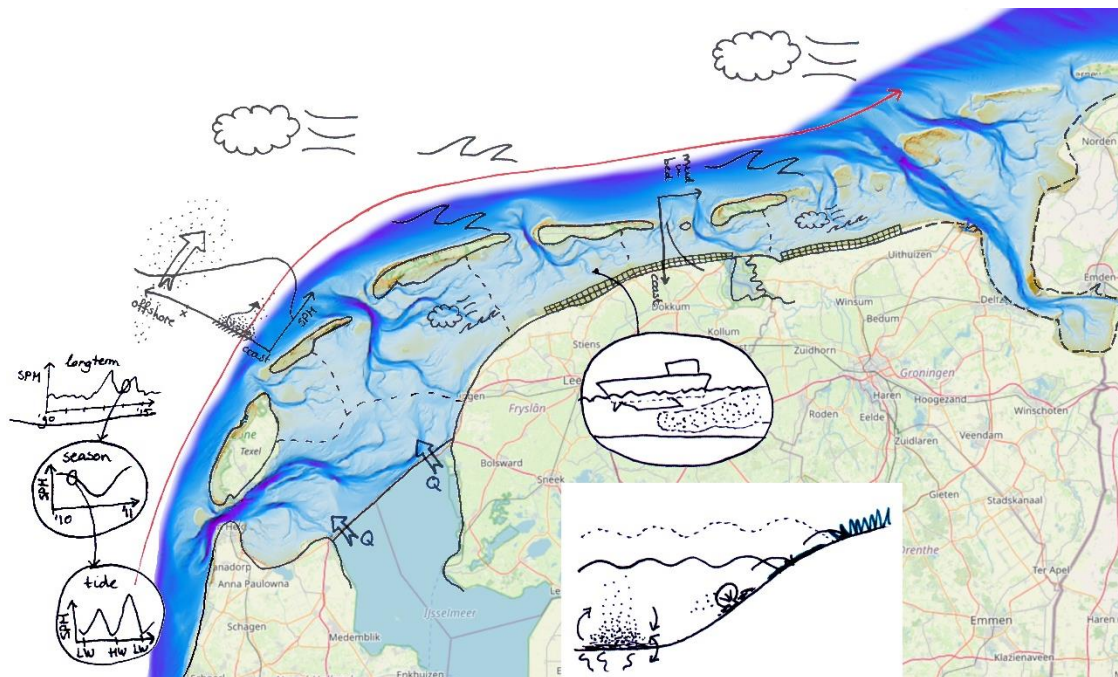
Hoge vertroebeling in de Vaargeul bij Holwerd en helderder water in naastgelegen geulen. Rechtsboven de veerdam en de landaanwinningswerken.



Troebel water ten noorden van Harlingen nabij Koehoal (foto: Bas van Maren)



Bodemvormen op slibrijke wadplaten nabij Koehoal (foto: Julia Vroom)



Bodemligging van de Waddenzee met dynamiek in zwevend stof gehalte op verschillende tijdschalen weergegeven en het verschil in zwevend stofgehalte nabij de kust en offshore. Slibstroom langs de kust is aangegeven met een rode pijl. Baggerwerken en biologische interacties getoond in de insets.

## 1.2 Rol van de Kaderrichtlijn Water; wettelijke kaders

In de Kaderrichtlijn Water (KRW, in werking sinds 2000) zijn door de Europese bindende kaders voor de bescherming en duurzaam gebruik van oppervlaktewater beschreven. Hierbij moet de juiste waterkwaliteit en een goede ecologische toestand worden gerealiseerd in 2027. De slibhuishouding is van belang voor de KRW, omdat slib direct en indirect invloed uitoefent op de goede ecologische toestand. Vertroebeling kan een sturende factor zijn voor algen in de waterkolom, maar ook voor onderwatervegetatie als zeegras en voor het voorkomen van filtrerende bodemdieren. De helderheid van het water bepaalt ook waar en hoe een overmaat aan nutriënten tot eutrofiëring leidt. Als de kustwateren zeer troebel zijn, worden eutrofiëringsverschijnselen naar verder op zee verplaatst.

In de eerste tranche van KRW (2012-2016) is het effect van bodemberoerende activiteiten op de slibhuishouding onderzocht. De conclusie luidde dat de effecten lokaal significant kunnen zijn maar dat de slibdynamiek op de schaal van kombergingsgebieden niet significant wordt beïnvloed door bodemberoering<sup>1</sup>.

Daarmee waren niet alle kennisvragen rond slib beantwoord. In 2018 is daarom een tweede fase van het onderzoek gestart. Deze richtte zich op de grootschalige dynamiek van slib in de Waddenzee, in samenhang met de Noordzee en de estuaria. Wat zijn de trends in het slibgehalte in de waterkolom en in de bodem? Wijken die af van de 'natuurlijke' slibconcentratie in de Waddenzee? Is er invloed van menselijke activiteiten, zoals zandwinning, visserij, baggeren, landaanwinningen zoals Maasvlakte II, of grootschalige afsluitingen zoals het IJsselmeer of het Lauwersmeer?

Bij de KRW is het van belang alle menselijke activiteiten die bijdragen aan de ecologische toestand evenwichtig te beschouwen, en zo goed mogelijk rekening te houden met de causale verbanden daarin. Daarbij speelt naast de lokale bodemberoerende activiteiten, ook het grootschalige beheer van de hele kust een rol. In de tweede tranche van het KRW slibonderzoek is onderzocht hoe kan worden bijgedragen aan het verbeteren en handhaven van de kwaliteit van het Waddensysteem via het beheer van slib in en rondom de Waddenzee. Deze brochure beschrijft de resultaten van deze tranche en maakt deze toegankelijk voor een breder publiek.

In de tweede tranche hebben wij beter inzicht verkregen in de langjarige fluctuaties van het gehalte aan zwevend stof in de Waddenzee. We begrijpen nu beter wat de aandrijvende processen zijn voor de fluctuaties op de lange (meerjarige) en seizoenale tijdschaal. In de bodem hebben we duidelijker in beeld gebracht waar slib sedimenteert, wat de bijdrage van de kwelders is in de slibsedimentatie, en hoe het transport van slib door de zeegaten en over de wantijen wordt bepaald door wind en stromingen. Die inzichten hebben we verkregen door goed naar beschikbare gegevens te kijken, maar ook door een nieuw numeriek model te ontwikkelen, waarin we de rol van afzonderlijke processen goed kunnen onderzoeken. Dat model kunnen we ook inzetten bij verkenningen van toekomstig beheer en bij concrete beheerbeslissingen. Met alle uitgevoerde onderzoeken hebben we nu een beter beeld van de *slibbalans*: hoeveel slib komt er de Waddenzee binnen, hoeveel gaat weer naar buiten en wat blijft er waar in de Waddenzee achter?

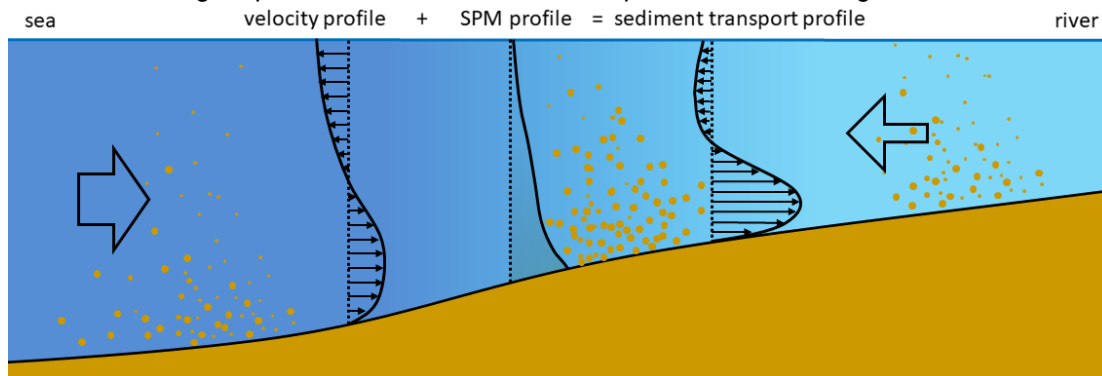
## 2 Aandrijvende processen voor slib in de waterkolom en in de bodem

Hoeveel slib er voorkomt in de waterkolom en de bodem, en waar in het systeem slib accumuleert of verdwijnt, hangt af van een groot aantal processen van uitwisseling, sedimentatie en erosie. In grote lijnen wordt het beïnvloed door de waterstroming (hydrodynamica), de hoeveelheid beschikbaar slib in het systeem, de eigenschappen (bv. zinksnelheid) van de slibpartikels, de eigenschappen van de slibrijke bodems en de ecologische processen van stabilisering en destabilisering door organismen.

### 2.1 Bodemligging en hydrodynamica

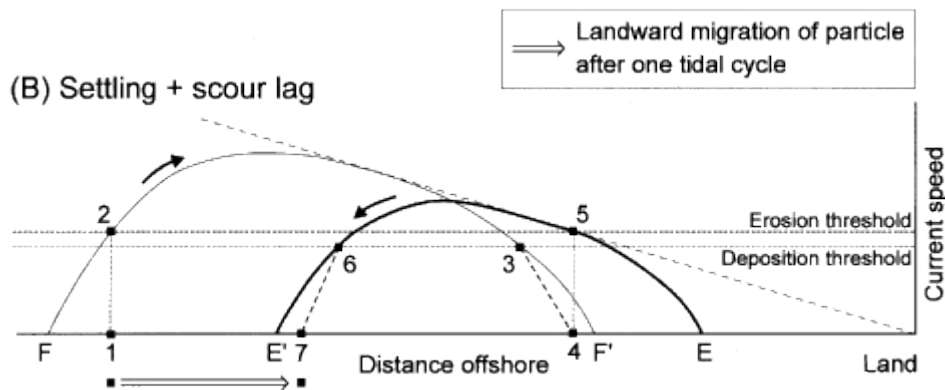
De Waddenzee is een ondiepe binnenzee, die door de Waddeneilanden en buitendelta's wordt afgeschermd van de golven uit de Noordzee. Het getij stroomt via de zeegaten tussen de eilanden de bekkens van de Waddenzee in. Door de vorm van de bekkens slingert het getij op in de Waddenzee, waardoor de getijslag achter in de bekkens groter is dan bij de zeegaten. Waar de getijgolven vanuit twee naastgelegen zeegaten elkaar ontmoeten, ontwikkelt zich een 'wantij'. Hier zijn de gemiddelde stroomsnelheden laag, ligt de bodem relatief hoog en is de bodem over het algemeen slibrijk.

Door de sluizen in de Afsluitdijk worden grote hoeveelheden zoet water onder vrij verval gespuid, en ook op andere plaatsen in de Waddenzee stroomt zoet water binnen. Door het dichtheidsverschil tussen zout zeewater en zoet spuiwater wordt een netto stroming aangedreven die richting de spuisluisen is gericht nabij de bodem en richting zee nabij de oppervlakte. Omdat de zwevende stofgehalten hoger zijn bij de bodem, leidt dit ertoe dat er netto slib wordt geïmporteerd in de Waddenzee. Dit proces noemen we gravitatiecirculatie.



*Schematische weergave van de gravitatiecirculatie als gevolg van het dichtheidsverschil tussen zout (links) en zoet water (rechts). Hierdoor ontstaat een landwaarts gerichte reststroming bij de bodem (linker profiel), die in combinatie met de hogere zwevende stofgehalten (middelste profiel) leidt tot een sterke import van slib (rechter profiel).*

Behalve de gravitatiecirculatie speelt ook de diepteverdeling zelf een rol bij het netto transport van slib naar de ondiepe rustige randen van de bekkens. Wanneer rond kentering de stroming vermindert en het zwevend slib begint uit te zakken, zal slib in ondiep water gemakkelijker en sneller de bodem bereiken dan in diepe geulen ('settling lag'). Eens in de bodem komt het pas laat weer in beweging, omdat er meer stroomsnelheid nodig is om een slibdeeltje uit de bodem op te pikken dan om een slibdeeltje in het water te doen bewegen ('scour lag'). Netto over een getijdencyclus blijft er daardoor meer slib achter in de ondiepe gebieden dan in de diepere geulen, en ontstaat een slibtransport van diep naar ondiep.



Weergave van het effect van 'settling lag' en 'scour lag' op horizontaal transport van een slibdeeltjes. Een deeltje wordt tijdens de vloed opgepakt van de bodem op punt 1 als de stroomsnelheid boven de drempelwaarde uitkomt (2). Het wordt getransporteerd naar punt 3, waar het gaat uitzakken naar de bodem en iets verder landwaarts de bodem bereikt op punt 4. Als tijdens de eb de stroomsnelheid boven de drempelwaarde uitkomt, wordt het weer opgepakt (5) en in ebrichting getransporteerd (6) waar het uitzakt en de bodem bereikt (7).<sup>ii</sup>

Als het getij asymmetrisch is, en er bijvoorbeeld tijdens vloed hogere pieksnelheden optreden dan tijdens eb, dan leidt dit ook tot een netto transport van slib, in dit geval een groter transport van slib in de vloedrichting (landwaarts) dan in de ebrichting. Deze kleine netto transporten binnen een getijdencyclus tellen over langere periodes op.

In de ondiepe Waddenzee heeft wind naast getij een belangrijke invloed op de stromingen. Bij een sterke wind uit het zuidwesten bijvoorbeeld, heeft de wind veel vat op het water in de westelijke Waddenzee omdat de strijklengte groot is. Er treedt dan transport van water en slib in oostelijke richting over de wantijen op, die aanzienlijk kan zijn. Daarnaast wekt de wind golven op. Vanuit de Noordzee dringen alleen lange golven de Waddenzee binnen, maar die zijn voor slibdynamiek niet heel belangrijk. De korte golven die lokaal door de wind worden opgewekt, spelen wel een belangrijke rol omdat ze slib uit de bodem kunnen eroderen, waarna dat slib naar elders kan worden getransporteerd.

Tussen de morfologie (bodempligging en geometrie) en de hydrodynamica is een sterke terugkoppeling. Morfologische veranderingen en bekkenafsluitingen veranderen de hydrodynamiek, die vervolgens weer leidt tot andere sedimentatie- en erosiepatronen. Bij slib speelt daarnaast nog een effect op de bodemruwheid: slibrijke bodems zijn gladder, waardoor de getijvoortplanting kan worden beïnvloed en slibdeeltjes gemakkelijker kunnen worden afgezet.

## 2.2 Slibbeschikbaarheid: sedimentatie en resuspensie van slib

Om de dynamiek van slib in de Waddenzee te begrijpen is het van groot belang om slib in de waterkolom en in de bodem gezamenlijk te beschouwen. Er is immers vaak sprake van herverdeling van slib tussen waterkolom en bodem. Bij die uitwisseling tussen bodem en waterkolom is het van belang zich te realiseren dat een grote verandering in de concentratie zwevend slib het resultaat is van slechts een geringe erosie van de bodem. Een toename in zwevend slib van 100 mg/l is op sommige plaatsen een verdubbeling ten opzichte van het langjarig gemiddelde, op andere plaatsen zelfs een vertienvoudiging. Toch vraagt die toename slechts de erosie van ongeveer 1 mm van de bodem.

De hoeveelheid slib op de bodem die beschikbaar is voor resuspensie varieert binnen een enkele getijdencyclus en ook op de termijn van eeuwen. Hoeveel slib er in de waterkolom terecht komt is afhankelijk van de hydrodynamica (is het gebied nat of drooggevallen, variatie van

stroomsnelheid over de getijcyclus en variatie piekstroomsnelheden over de springtij-doodtijcyclus, seizoensvariatie in golfwerking en windgedreven stroming) en de eigenschappen van het slib die de weerstand tegen erosie bepalen. De sedimentatie van slib wordt beïnvloed door de valsnelheid en de hoeveelheid slib die in de waterkolom beschikbaar is. Als de slibconcentratie in de waterkolom heel hoog is gaan de slibpartikels elkaar beïnvloeden. Ze kunnen zich dan niet meer ongehinderd op de bodem afzetten. Er ontstaat 'fluid mud', een suspensie van slibdeeltjes met de vloeibaarheid van yoghurt. Die suspensie dempt de turbulentie, verandert de verticale menging in de waterkolom en beïnvloedt de grootschalige stromingen in het systeem.

Lokale bronnen van slib in de Waddenzee zijn beperkt aanwezig. Het zijn bijvoorbeeld oude slibafzettingen die door morfologische veranderingen bloot komen te liggen en beschikbaar komen voor erosie. De belangrijkste bron van slib is echter wat van buiten de Waddenzee door stromingen wordt aangevoerd.

## 2.3 Aanvoer van 'nieuw' slib

Met de getijstroming wordt continu zwevend slib aangevoerd dat vanuit het zuidwesten langs de kust naar het noordoosten wordt getransporteerd. De slibstroom wordt gevoed vanuit het zuiden door erosie in het Nauw van Calais en van de Vlaamse Banken, kust- en bodmerosie en in mindere mate aanvoer vanuit rivieren. Door de 'Rijnpluim', dat is de strook met iets zoeter water langs de Nederlandse kust, waaiert het slib niet breed uit over de Noordzee maar blijft tegen de kust aangedrukt. Elk getij wordt een deel van het slib uit deze slibstroom tussen de Noordzee en de Waddenzee uitgewisseld. In de Waddenzee wordt vervolgens een klein deel van het slib afgezet, vooral in luwe gebieden, zoals op wadplaten, in kwelders en in geulen waar de stroomsnelheden en golfwerking relatief laag zijn. De Noordzeekust is overwegend zandig, omdat door de geëxponeerde ligging slib daar niet kan worden afgezet. Hetzelfde geldt voor veel zandplaten nabij de zeegaten. Vooral op de langere termijn is het van belang te weten hoeveel slib er vanaf de Noordzee wordt aangevoerd en welk deel daarvan wordt afgezet in de Waddenzee.

## 2.4 Slibeigenschappen en de invloed van de ecologie hierop

Met slib bedoelen we de fijne fractie van sediment, die bestaat uit klei en silt en een korrelgrootte kleiner dan  $<63 \mu\text{m}$  heeft. Deeltjes groter dan  $63 \mu\text{m}$  (en kleiner dan  $2 \text{ mm}$ ) noemen we zand. In tegenstelling tot zand is slib 'cohesief'. De individuele deeltjes oefenen een aantrekkingskracht uit op elkaar, waardoor ze kunnen samenklonteren en stevig aan elkaar gebonden kunnen blijven.

In de waterkolom spreken we van vlokvorming als deeltjes samenklonteren. De vlokken die daardoor gevormd worden zijn veel groter dan de individuele slibdeeltjes. Ze lijken wat op sneeuwvlokken. Ze hebben een lagere dichtheid dan individuele deeltjes, maar wel een grotere valsnelheid. Daardoor bepaalt vlokvorming mede hoeveel slib kan sedimenteren uit de waterkolom. Vlokvorming is een ingewikkeld proces. Het wordt gestuurd door abiotische omstandigheden als turbulentie en zoutgehalte, en door biologische processen die zorgen voor plakkerig organisch materiaal dat de vlokken bij elkaar kan houden.

De valsnelheid van slib in de Waddenzee varieert grofweg tussen  $0.1$  en  $5 \text{ mm/s}$ . Vlokken met een valsnelheid van  $1 \text{ mm/s}$ , doen er gemiddeld bijna anderhalf uur over om bij een waterdiepte van  $5 \text{ m}$  van het wateroppervlak naar de bodem te zakken. Bij een stroomsnelheid van  $1 \text{ m/s}$ , kan de vlok dan nog een horizontale afstand van ruim  $5 \text{ kilometer}$  afleggen voordat het de bodem bereikt. Daarom wordt de concentratie en het transport van slib niet alleen bepaald door

de lokale stromingscondities, maar ook door de condities in de verdere omgeving en door de hoeveelheid slib die hierin op of in de bodem aanwezig is.

In de bodem zijn de bodemsterkte en de dichtheid van slib belangrijke eigenschappen. De bodemsterkte wordt meestal uitgedrukt als weerstand tegen erosie: de grenswaarde van stroming waarboven erosie plaatsvindt en de hoeveelheid erosie die plaatsvindt als de stroming boven deze grenswaarde uit komt. Direct nadat een sliblaagje op de bodem is afgezet, heeft dit laagje nog weinig sterkte en kunnen de deeltjes gemakkelijk weer in suspensie worden gebracht door stroming of golfwerking. Als het slib langer op de bodem blijft liggen, en naarmate de laag dikker is, gaat de bodem door zwaartekracht consolideren. De deeltjes gaan dichter op elkaar zitten en houden elkaar beter vast, waardoor ze minder gemakkelijk weer geërodeerd kunnen worden. De bodemsterkte neemt dan toe. Dit proces kan lange tijd doorgaan. Oude kleilagen die op grotere diepte en bij hogere druk zijn samengeperst, kunnen zo sterk zijn dat ze door stroming nog nauwelijks kunnen worden geërodeerd.

De ecologie beïnvloedt de eigenschappen van slib op verschillende manieren. Bodemdieren kunnen de slibbodem omwerken bij het graven van gangen en het zoeken naar voedsel. Dit proces wordt bioturbatie genoemd. Het mengt verschillende laagjes in de bodem en verhindert het opbouwen van sterkte. In hoofdzakelijk zandige bodems kan slib dieper de bodem worden ingemengd, waardoor het nog moeilijk kan eroderen. Tegenover deze destabilisering van de bodem staan stabiliserende effecten, bijvoorbeeld van algen (microfytobenthos) die een slijmerige substantie uitscheiden die het sediment samenkit. Zij verhogen daardoor de weerstand van de bodem tegen erosie.

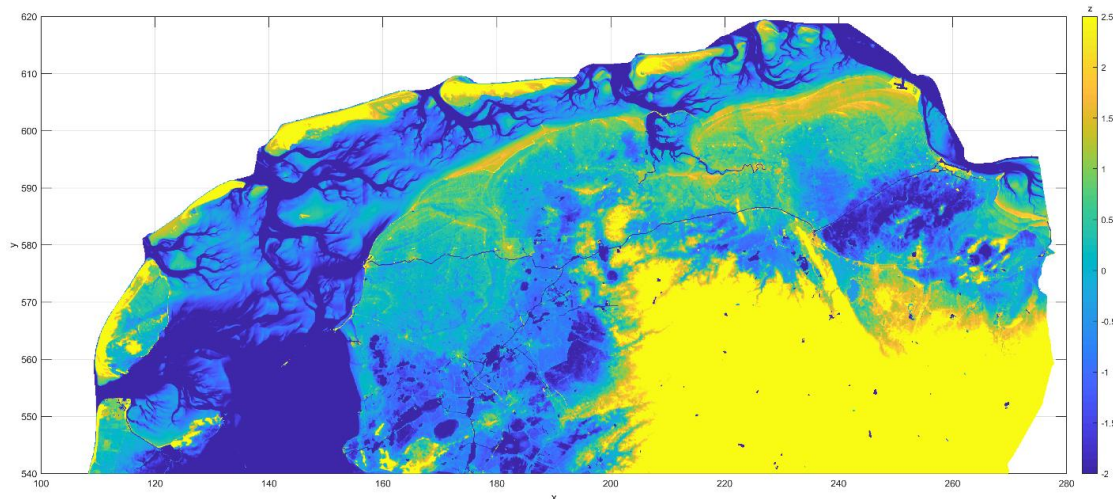
Eigenschappen van slib zoals de valsnelheid en bodemsterkte variëren in de tijd, zowel binnen het getij als met de seizoenen en jaren, en ook ruimtelijk over de Waddenzee. Achterin de bekkens worden bijvoorbeeld kleinere deeltjes afgezet dan dicht bij het zeegat, waardoor de sedimentsamenstelling en de valsnelheid over de Waddenzee varieert.

## 3 Grootschalige en lange termijn veranderingen in bodemslib

### 3.1 Invloed van de mens op het ontstaan en opslibben van de Waddenzee

De huidige Waddenzee is het resultaat van een ontstaansgeschiedenis waarbij de laatste 2.000 jaar de mens een steeds grotere stempel op de geometrie en daarmee ook op de morfologie van de Waddenzee heeft gedrukt. Waar grote delen van de Waddenzee en voormalige Zuiderzee eerst bedekt waren met veen, kreeg de zee steeds meer de overhand. In eerste instantie door afslag van de veengebieden, waarna vervolgens veel fijn sediment kon worden afgezet. Door ontwatering en veenafgravingen werd het land kwetsbaar voor overstromingen en won de zee aan terrein. De Middelsee en Lauwerszee werden gevormd en deels opgevuld met zeeklei. Na de doorbraak van de strandwal bij Texel (12<sup>e</sup> eeuw) werd het Marsdiep gevormd, waardoor ook meer slib naar binnen kon worden gebracht en kon worden afgezet in de vele inhammen, luwe intergetijden- en kweldergebieden. De gestage ophoging van de randen van de Waddenzee werd door de mens geholpen door de ontwatering te verbeteren door het graven van greppels en door dammetjes op te werpen. Grote delen van de opgeslibde gebieden werden vervolgens vanaf het jaar 1000 bedijkt en de vruchtbare slibrijke grond werd bewerkt voor de landbouw. Toenemende overstromingen als gevolg van stormvloed (in combinatie met te lage dijken) en de behoefte aan landbouwgrond in de 16<sup>e</sup>-18<sup>e</sup> eeuw leidden tot verdere bedijkingen en inpolderingen, waardoor grote delen van het land werden afgesloten voor de zee en daarmee voor de aanvoer van fijn sediment. In de afgelopen eeuw werden de meest grootschalige ingrepen gedaan. De Zuiderzee werd in 1932 afgesloten door de Afsluitdijk en de Lauwerszee in 1969 omgevormd tot Lauwersmeer. De afsluiting van de Zuiderzee leidde tot een toename in de getijslag in de westelijke Waddenzee en zelfs tot een toename in het

getijvolume door de zeegaten, ondanks een sterke verkleining van het bekkenareaal. In geulen die door de afsluiting werden afgesneden of te groot werden voor het nieuwe getijvolume, is veel sediment afgezet. Sommige andere geulen zijn juist ruimer geworden. Deze veranderingen werken vandaag de dag nog steeds door. De afsluiting van de Lauwerszee leidde tot een verkleining van het getijprisma en sedimentatie in het bekken van Zoutkamperlaag. De aanpassing aan deze afsluiting is grotendeels voltooid.



Meest recent bedijkte kwelders vormen de hoogste gebieden in de kustzones van de provincies Friesland en Groningen<sup>iii</sup>. Op deze gebieden is veel slib afgezet. Onder: bedijkingsgeschiedenis van Noord-Nederland<sup>iv</sup>.

Met inzicht in de slibimport in de Waddenzee over de langere termijn, in combinatie met de veranderingen in hydrodynamica, kunnen we de ontwikkeling van de sedimentsamenstelling in de bodem, de vertroebeling en de bijdrage van slib aan de morfologische veranderingen begrijpen en vooruitkijken hoe ontwikkelingen doorwerken in de toekomst. Door bodemslibgehaltenes te koppelen aan morfologische veranderingen kan inzicht verkregen worden in hoeveel slib er de afgelopen eeuw in de Waddenzee is afgezet.

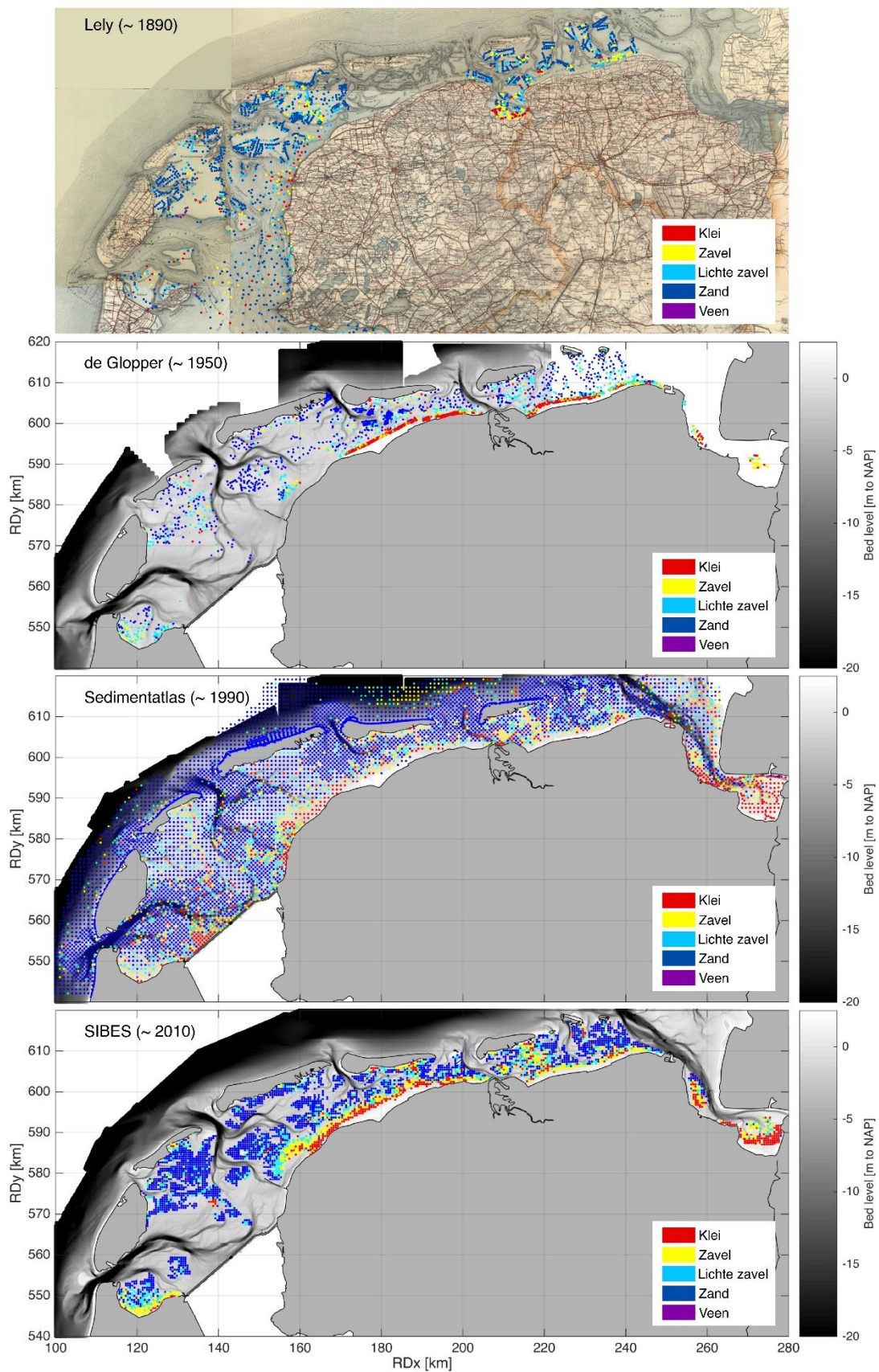
### 3.2 Veranderingen in het bodemslibgehalte over de afgelopen eeuw

Rond 1890 bracht Lely de bodemsamenstelling nauwkeurig in kaart tijdens zijn zoektocht naar geschikte landbouwgronden bij inpoldering van (delen van) de Waddenzee. In de jaren '60 (maar gebaseerd op metingen uit de jaren '50) heeft De Glopper de bodemsamenstelling gerapporteerd, en met de sedimentatlas uit 1990 en de recente SIBES meetcampagne (~2010),



kunnen we de veranderingen in bodemsamenstelling van de Waddenzee van de afgelopen eeuw bestuderen.

Hoewel het bodemslibgehalte in grote gebieden zeer vergelijkbaar is gebleven in de afgelopen eeuw, zijn er ook enkele opvallende veranderingen. De oude, zandige geulen die doorsneden zijn door de Afsluitdijk zijn opgevuld met slibrijk sediment. Op het Balgzand is de bodem slibrijker geworden na de afsluiting, en sinds de jaren '90 ongeveer stabiel. Ten noorden van Harlingen langs de kust werd een eeuw geleden ook al slibrijk sediment gevonden, maar dit slibrijke gebied heeft zich in de afgelopen eeuw verder uitgebreid. Het wantij achter Terschelling verschoof naar het oosten en werd zandiger. Het wantij achter Schiermonnikoog werd tussen 1950 en 1990 slibrijker, waarschijnlijk als reactie op de afsluiting van de Lauwerszee. Sinds de jaren '90 treden er kleine veranderingen op in het bodemslibgehalte op de intergetijdengebieden.



Bodemsamenstelling op basis van beschikbaar kaartmateriaal

## 4 Slib in de waterkolom: trends of fluctuaties?

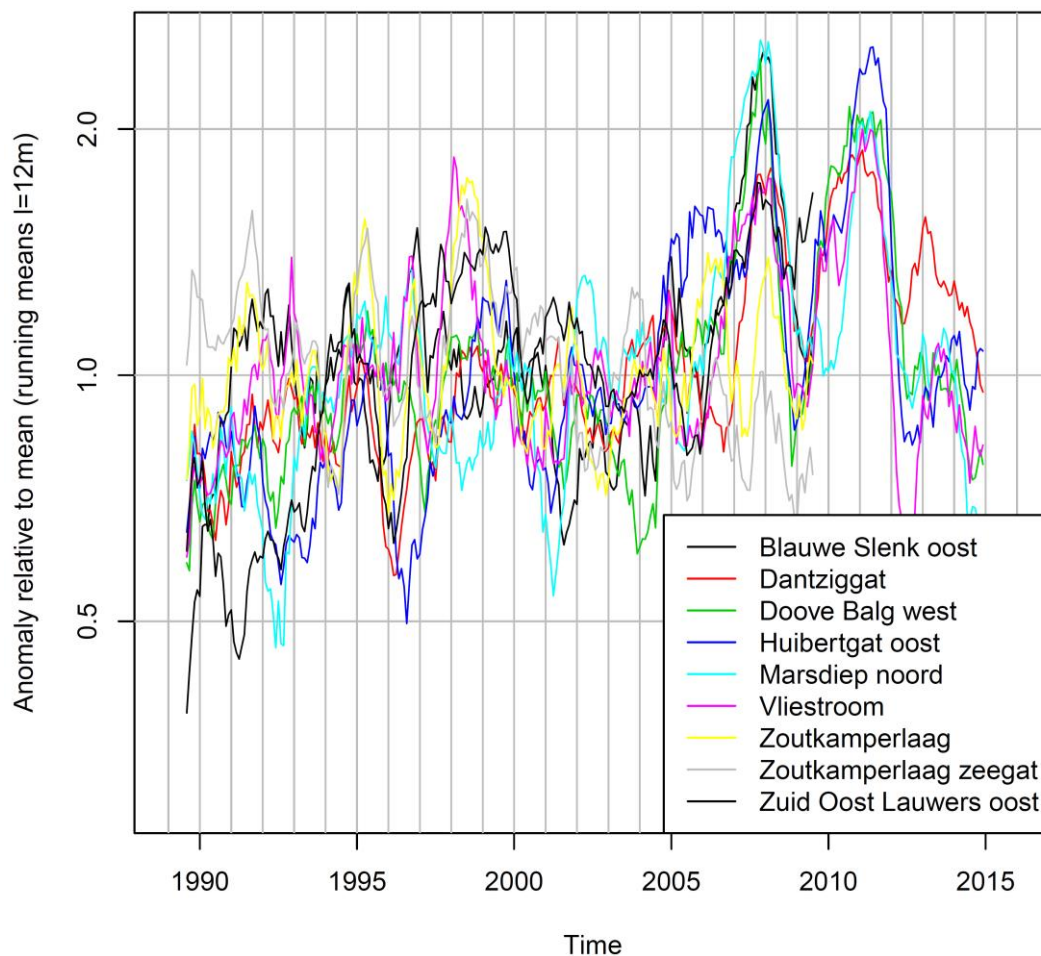
De vertroebeling door zwevende stof in de Waddenzee bepaalt het doorzicht en is daarmee een belangrijke limiterende factor voor algengroei. Op sommige locaties is de vertroebeling door verstoring zeer hoog, zoals in de Vaarweg bij Holwerd en in het bovenstroomse gedeelte van het Eems estuarium. Door het analyseren van monitoringdata van zwevende stof kan inzicht worden verkregen in veranderingen. Het is erg belangrijk om eventuele veranderingen, zeker als die trendmatig zijn over lange periodes, goed te begrijpen. Trendmatige veranderingen die het gevolg zijn van menselijk handelen moeten aanleiding vormen tot het nemen van maatregelen. Natuurlijke variabiliteit is echter deel van het ecosysteem en noopt niet tot handelen.

### 4.1 Langjarige fluctuaties

Sinds de jaren '90 worden gehalten van zwevend stof in de waterkolom op een consistente manier verzameld. Van die gegevens kunnen we een statistische analyse maken. Uit die analyse blijkt dat er grote fluctuaties zitten in het zwevend stofgehalte, maar dat er geen significante trend in de tijdseries zit. De slibconcentratie in de waterkolom is over de afgelopen 30 jaar dus niet trendmatig toegenomen. De zwevend stofgehalten fluctueren tussen de 50 en 200% procent van het langjarig gemiddelde. Bovendien reageren de verschillende stations in de Waddenzee vergelijkbaar, dit is bijvoorbeeld goed te zien aan de pieken in zwevende stof die rond 2008 en 2011 zijn opgetreden. Dit betekent dat er een grootschalige aandrijving verantwoordelijk moet zijn voor de fluctuaties in het zwevende stofgehalte, op de schaal van de gehele Waddenzee. Ook in andere Nederlandse watersystemen, zoals de Ooster- en Westerschelde en de Noordzee zitten fluctuaties in het zwevend stofgehalte met vergelijkbare relatieve afwijking (50 – 200%), vergelijkbaar gedrag tussen de stations, maar met andere fasering dan in de Waddenzee. Omdat de Noordzee niet synchroon fluctueert met de Waddenzee, betekent dit dat eventuele verstoringen niet direct doorgegeven worden van de Noordzee naar de Waddenzee.

Pogingen om de langjarige fluctuatie in zwevend stof te verklaren aan de hand van fluctuaties in meteorologie (bijvoorbeeld windsnelheid en – richting) of ecologie (bijvoorbeeld langjarige fluctuaties in microfytobenthos) hebben tot nu toe geen succes opgeleverd. Het blijft moeilijk om aan de hand van de metingen de verklarende factoren te identificeren. Wellicht zal nader veldonderzoek, in samenhang met modelmatige exploraties, nodig zijn om hier meer inzicht in te verwerven.

Wat wel duidelijk is geworden uit de statistische analyse, is het sterke 'geheugen' van het systeem. Statistisch wordt dat uitgedrukt in 'autocorrelatie': de mate waarin waarnemingen in de tijd gecorreleerd zijn met waarnemingen één, twee of meer tijdstappen eerder. De tijdseries van zwevend stof in de Waddenzee vertonen een sterke autocorrelatie over meerdere maanden, tot langer dan een halfjaar. Een schok in het zwevend stof een half jaar geleden, blijft nog doorwerken in de concentraties nu. Het is door dit sterke geheugen dat de tijdseries langzaam en vrij sterk fluctueren op een tijdschaal langer dan een jaar.

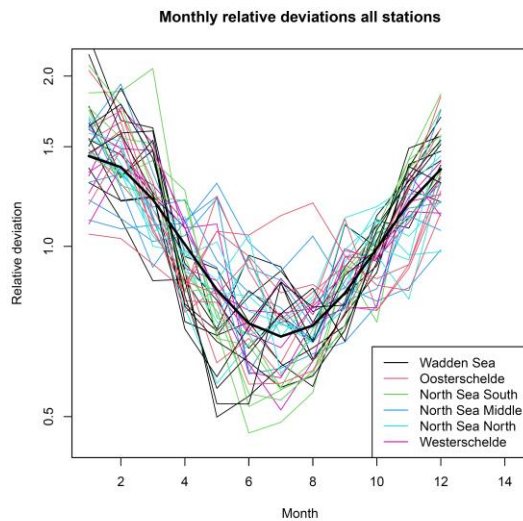


Middellange termijn fluctuaties in zwevende stof, uitgedrukt als afwijking ten opzichte van het langjarig gemiddelde op basis van MWTL metingen<sup>vi</sup>

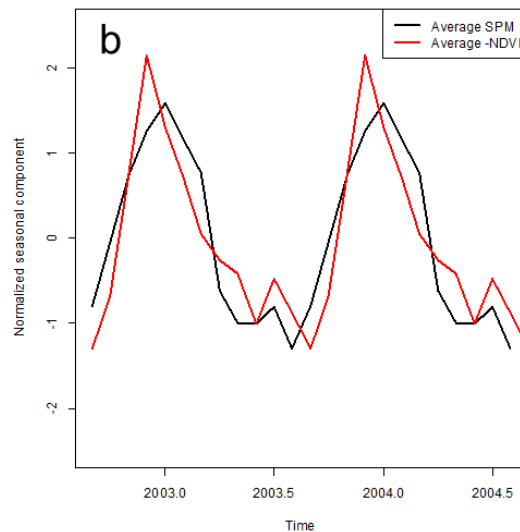
## 4.2 Seizoensfluctuaties

De zwevend stofgehaltenes fluctueren ook binnen het jaar met de seizoenen. In de winter zijn de zwevend stof gehaltenes hoger en in de zomer lager. Opvallend is dat de seizoensfluctuatie, wanneer ze uitgedrukt wordt relatief tot het langjarig gemiddelde, op alle monsterstations ongeveer gelijk is. Zowel de fase als de amplitude komen overeen. Toch gaat het hier over zeer verschillende situaties. Ver uit de kust op de Noordzee is de jaargemiddelde concentratie slechts enkele mg/liter, terwijl die in enkele stations van de Waddenzee tot bijna honderd mg/liter bedraagt.

De seizoensdynamiek wordt veroorzaakt door een combinatie van factoren. Enerzijds kenmerken de wintermaanden zich door hogere golven die meer slib van de bodem in suspensie brengen en houden. Ook groeien er in de zomerperiode benthische algen op de wadplaten (microfytobenthos) die het slib vastplakken aan de bodem door het uitscheiden van een slijmerige substantie. Hierdoor wordt er minder slib geërodeerd en in de waterkolom gebracht. In de ruimtelijke verdeling van microfytobenthos en bodemslib zien we duidelijke overeenkomsten. Daarnaast kunnen algen ook bijdragen aan het samenklonteren van slibdeeltjes in de waterkolom ('flocculatie'), waardoor de valsnelheid van deze samengestelde deeltjes toeneemt waardoor ze sneller naar de bodem zakken. Omdat ook dit proces een groter effect heeft in de zomerperiode dan in de winter, draagt het bij aan de seizoensfluctuatie. Het is bijzonder moeilijk om uit de metingen af te leiden welke factoren het meest bijdragen aan de seizoensfluctuatie.



Seizoensdynamiek in zwevende stof, uitgedrukt als afwijking ten opzichte van het jaargemiddelde op basis van MWTL metingen.<sup>vi</sup>



De relatie tussen NDVI (proxy voor microfytobenthos biomassa, bepaald uit analyse van satellietbeelden, in rood) en het zwevend stofgehalte, gemiddeld over de Waddenzee (zwart), beiden uitgedrukt als afwijking ten opzichte van het jaargemiddelde. NDVI is horizontaal gespiegeld om de correlatie met SPM te verduidelijken.<sup>vi</sup>

### 4.3 Observaties uit de modelberekeningen voor zwevende stof

Met het numerieke model dat voor de Waddenzee is ontwikkeld binnen KRW slib, kunnen verschillende aandrijvende processen voor de slibdynamiek (saliniteit, windforcering) modelmatig worden aangepast of uitgezet. Hiermee krijgen we inzicht in het belang van deze processen. Omdat de metingen de resultante van alle aandrijvende factoren bevatten, is het erg moeilijk om dergelijke inzichten uit de metingen te halen. Er zijn meerdere processen die bij kunnen dragen aan de seizoensfluctuaties.

#### 4.3.1 Effect golven

Uit modelsimulaties blijkt dat de lokaal door de wind opgewekte golven een groot aandeel hebben in de seizoensfluctuatie van het zwevende stof, zowel in de Waddenzee als op de Noordzee. Daarbij zijn vooral de hogere gemiddelde golven (excl. stormen) in de winter van belang, en niet zozeer de stormen zelf. Stormen verhogen de concentratie van het zwevend stof slechts voor een aantal dagen.

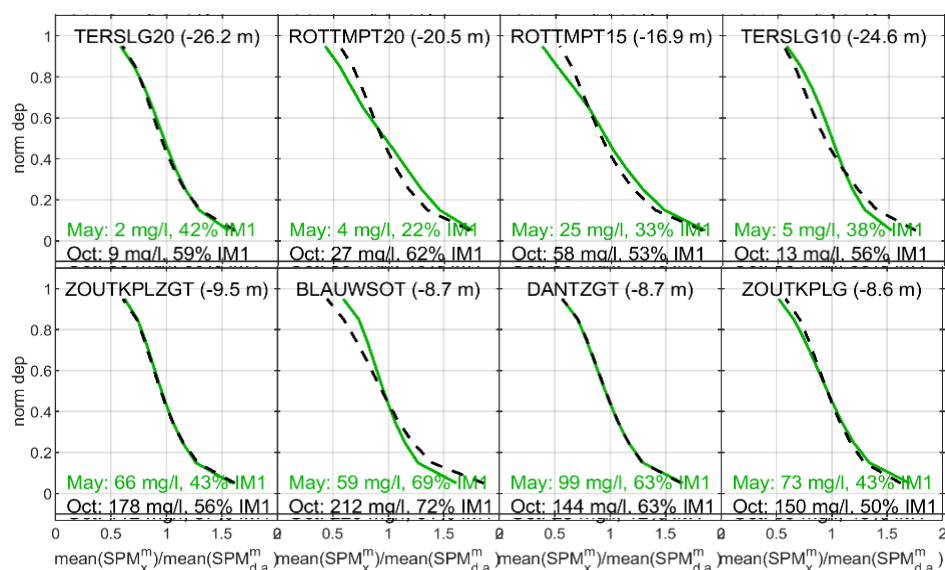
#### 4.3.2 Effect ecologische variaties

Het effect van ecologische seizoensvariaties, zoals de groei van algenmatten en flocculatie, zijn niet in het numerieke model opgenomen. Desondanks wordt de seizoensfluctuatie in het model redelijk goed gereproduceerd, in ieder geval als gevolg van de golven. Dit suggereert dat de ecologische variaties niet dominant zijn in de seizoenaliteit van slib. Het feit dat in de metingen de seizoensfluctuatie vergelijkbaar is op diepe Noordzeestations en ondiepe stations in de Waddenzee, suggereert eveneens dat de specifieke processen in de getijdenzone niet heel belangrijk zijn. Toch blijft dit indirecte evidentie. Het kan echter zijn dat abiotische processen verkeerd zijn ingeregeld, zodat ze een deel van de bijdrage van biologische effecten 'maskeren'. Om het effect van de ecologische sturende factoren af te schatten en mee te nemen in de numerieke modelsimulaties, zijn velddata uit het Waddengebied nodig die de aanwezigheid van microfytobenthos (of preciezer gezegd exopolymeren) en het effect op de

weerstand tegen erosie kwantificeren. Voor de bijdrage van flocculatie is inzicht in de valsnelheid over de seizoenen nodig. Zonder deze meetdata kan het relatieve belang van de processen die tot seizoensfluctuatie leiden niet juist worden ingeregeld in het numerieke model.

#### 4.3.3 Effect verticale menging

Verschillen in verticale menging over de seizoenen tussen de Waddenzee en de Noordzee in het numerieke model, laten zien dat de relatieve verdeling van zwevend stof over de waterkolom in de Waddenzee ongeveer gelijk is over de seizoenen. In de Noordzee is er wel een verschil in verticale menging, maar dit effect op de seizoensdynamiek is veel kleiner dan het effect van golven. Verschillen in verticale menging tussen de Noordzee en de Waddenzee zijn dus niet dominant voor de seizoensfluctuaties in beide systemen.



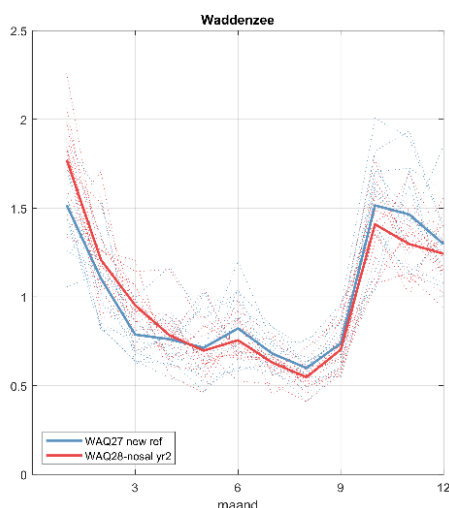
Profielen van SPM in de Noordzee (boven) en Waddenzee (onder) in mei (groen) en oktober (zwart). Er is weinig verschil in de steilheid van het profiel en dus in verticale menging, ondanks aanzienlijke verschillen in het maandgemiddelde zwevende stofgehalte.<sup>vii</sup>

#### 4.3.4 Effect seizoensdynamiek Noordzee op de Waddenzee

We weten ook dat de seizoensdynamiek in de Waddenzee binnen de Waddenzee wordt opgewekt en niet vanaf de grotere Noordzee doorwerkt in de Waddenzee. Dat weten we doordat we in het model de seizoensvariatie op de modelrand hebben vervangen door een jaargemiddelde waarde. Dit had geen effect op de seizoensvariatie in de Waddenzee.

#### 4.3.5 Effect zoetwaterafvoer

We hebben ook onderzocht wat het effect is van de zoetwaterafvoer op de seizoensfluctuaties in zwevende stof. In de winter wordt er immers meer zoetwater gespuid (de spuisluizen in de Afsluitdijk zijn de grootste toeleveranciers van zoet water) dan in de zomer. Ook deze variatie in zoetwaterafvoer draagt nauwelijks bij aan de variatie in zwevend stofgehalte binnen een jaar.



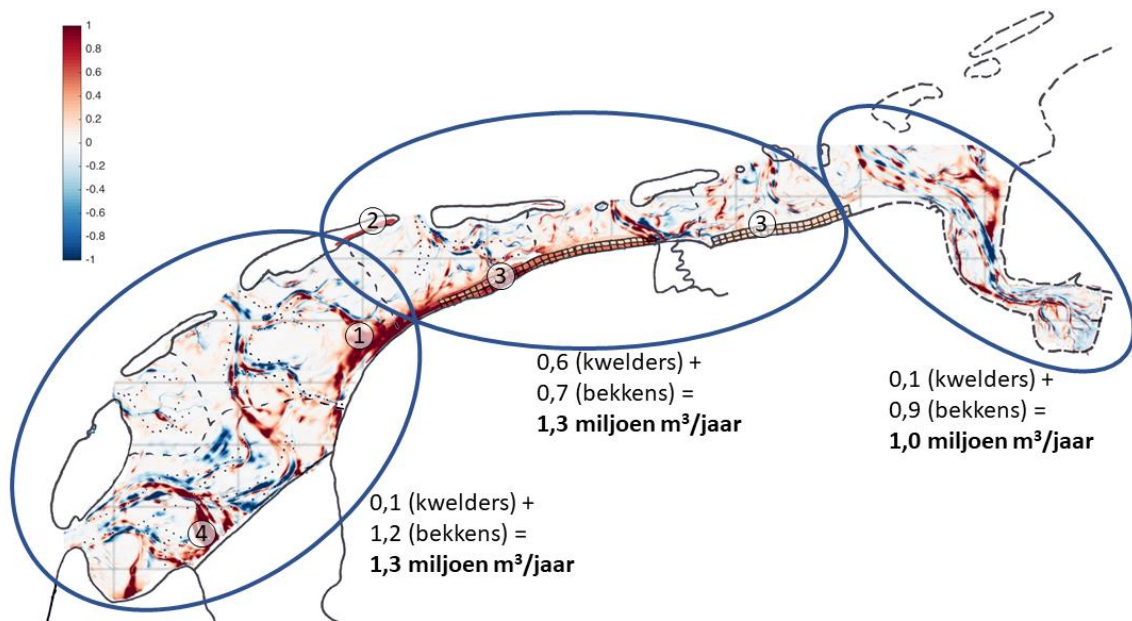
Effect van een som met overgangen tussen zout Noordzee en zoet spuiwater (blauw) en een som zonder verschil in saliniteit tussen zeewater en spuiwater (rood). De variatie van het zwevend stofgehalte over het jaar is nagenoeg identiek.<sup>vii</sup>

## 5 Sedimentbalans

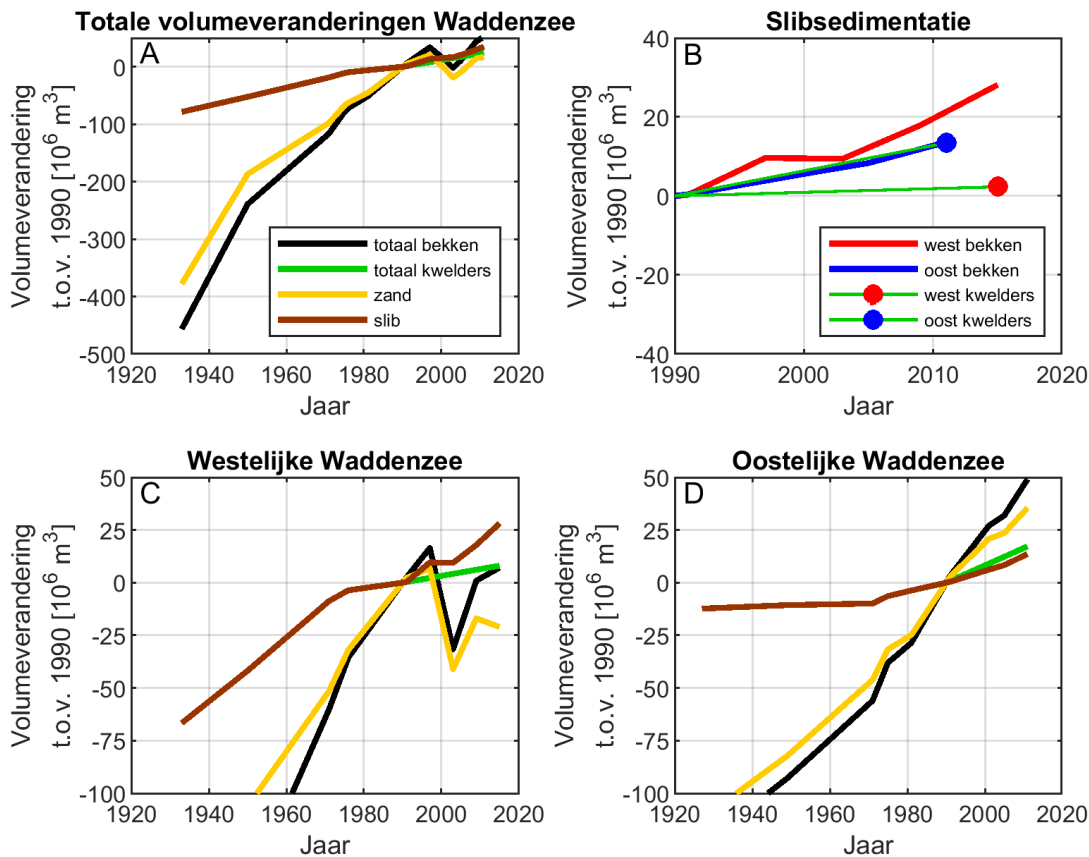
Door de morfologische veranderingen te koppelen aan het bodemslibgehalte, kan een bijdrage van zand en slib aan de netto sedimentatie worden berekend. In de westelijke Waddenzee werd direct na de afsluiting van de Zuiderzee veel zand afgezet, maar dit volume werd geleidelijk kleiner. De slibsedimentatie verloopt sinds de afsluiting echter ongeveer lineair en betreft ca. 1,5 miljoen m<sup>3</sup>/j voor de bekkens van het Marsdiep, Eierlandse Gat en het Vlie samen. Langs de vastelandskust liggen slibrijke wadplaten die flink sedimenteren. Ook in de oude geulen wordt zand en slib afgezet. Omdat er maar weinig kwelders in de westelijke Waddenzee liggen, dragen deze ook maar marginaal bij aan de netto sedimentatie (<0,1 miljoen m<sup>3</sup>/j).

In de oostelijke Waddenzee wordt sinds de jaren '70 meer slib afgezet, waarschijnlijk als gevolg van de afsluiting van de Lauwerszee. Het volume zand dat jaarlijks in de oostelijke Waddenzee wordt afgezet is min of meer constant in de tijd. Ook hier wordt veel slib afgezet langs de vastelandskust. De kwelders dragen in de oostelijke bekkens voor ongeveer 50% bij aan de totale netto slibsedimentatie van ca. 1,2 miljoen m<sup>3</sup>/j. De slibsedimentatie in de westelijke (Marsdiep, Eierlandse Gat, Vlie) en oostelijke (Borndiep, Friesche Zeegat) Waddenzee is ongeveer gelijk, maar aangezien de gebieden een verschillende oppervlakte beslaan, is de slibsedimentatie per eenheid van oppervlakte ongeveer 3x zo hoog in de oostelijke bekkens. De ruimtelijke variatie in slibsedimentatie wordt veroorzaakt door een veelheid aan factoren, die onderling moeilijk te wegen zijn. Belangrijkste factoren zijn waarschijnlijk de grootschalige afsluitingen, de landaanwinningswerken en mogelijk het verspreiden van gebaggerd materiaal.

Een studie in opdracht van de Waddenacademie heeft zich gebogen over de slibbalans voor de volledige internationale Waddenzee<sup>viii</sup>. Voor het Nederlandse deel is die studie grotendeels op de resultaten van KRW-slib gebaseerd. Uit de internationale studie is gebleken dat alle slib dat langs de Nederlandse kust in de slibstroom langs stroomt, ergens in de internationale Waddenzee een stabiele berging vindt. Een gevolg daarvan is dat lokale ingrepen in de Waddenzee, bijvoorbeeld een grootschalige slibvangst voor een wisselpolder of een verandering in baggerstrategie, in principe gevolgen heeft op de grotere schaal van de gehele Waddenzee. Slib dat op één plaats wordt vastgehouden kan immers elders niet meer bezinken, of omgekeerd. Vanwege de grootschalige slibstroom langs de Noordzeekust kunnen zelfs grootschalige slibvangs elders, zoals langs de Belgische kust of in de Westerschelde, impact hebben op de slibstroom in de (internationale) Waddenzee. Een samenhangende blik op het slibbeheer van de (internationale) Waddenzee is nodig.



Gebieden met erosie en sedimentatie, alleen slib en slibbalans voor westelijke en oostelijke bekkens en het Eems estuarium. Grootste slibsedimentatiegebieden zijn met cijfers aangegeven: ① Vlakte van Oosterbierum, ② kwelder Oost-Terschelling, ③ Vastelandskwelders Friese en Groninger kust, ④ Oude geulen nabij de Afsluitdijk. <sup>ix</sup>

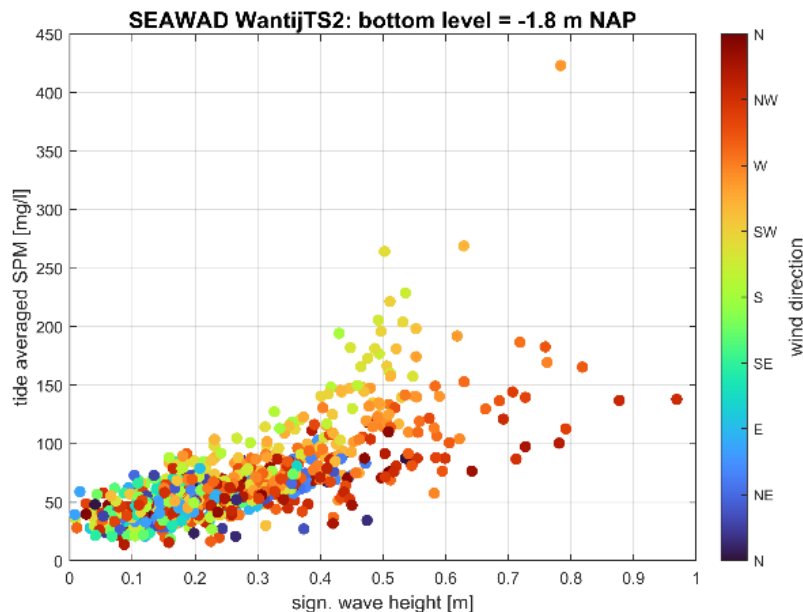


Sedimentatie in de Waddenzee, uitgesplitst naar west en oost, zand en slib en de bijdrage van kwelders. A) Totale netto volumeveranderingen in de Waddenzee in de onbegroeide delen van de bekkens (zwart), op de kwelders (groen), bijdrage van zand excl. kwelders (geel), bijdrage slib excl. kwelders (bruin); B) Slibsedimentatie sinds 1990 in de westelijke en oostelijke Waddenzee, in de onbegroeide delen van de bekkens en in de kwelders; C) Als A, maar dan alleen voor de bekkens van Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie; D) Als A, maar dan alleen voor de bekkens van het Amelandse Zeegat en het Friesche Zeegat. <sup>ix</sup>



## 5.1 Observaties uit de modelberekeningen voor de slibsedimentatie en slibbalans

Tijdens condities met harde wind is niet alleen de windsterkte (en gekoppelde golfhoogte) van belang, maar ook de windrichting in combinatie met de lokale bodemligging. Indien de wind over slibrijk intergetijdengebied strijkt, wordt er veel slib in suspensie gebracht. Als dezelfde of zelfs hardere wind over een slibarm gebied waait, kan ondanks hogere golven het zwevend stofgehalte lager zijn.

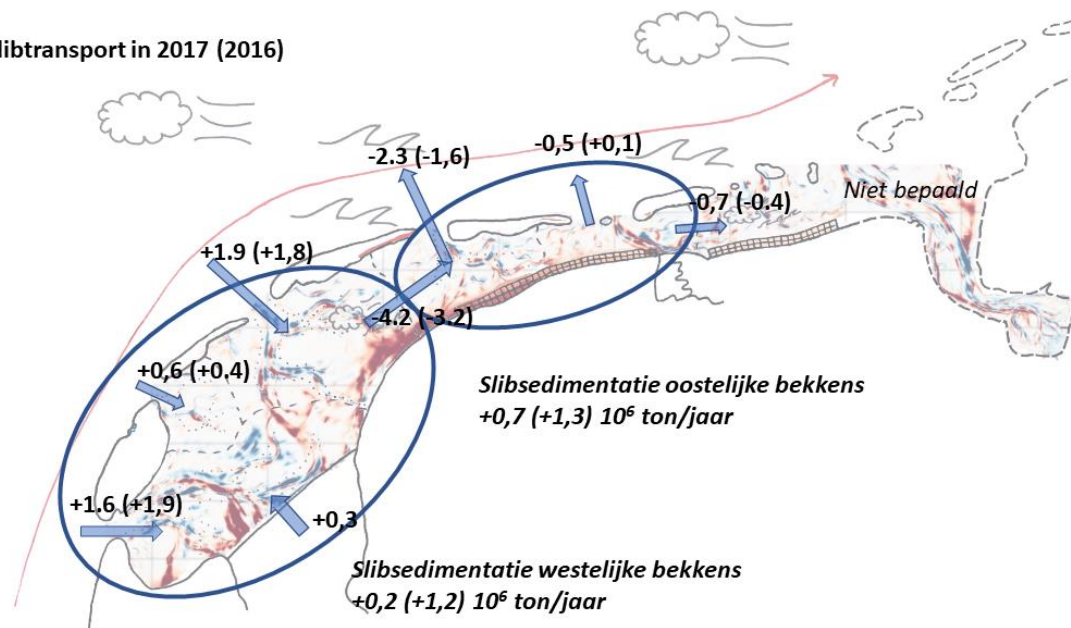


Berekende golfhoogte, golfrichting en zwevend stofgehalte bij een station op het wantij van Terschelling.<sup>vii</sup>

De wind is belangrijk voor het transport van slib tussen de bekkens over de wantijen, en tussen Noordzee en de bekkens door de zeegaten. Het windgedreven transport heeft grote invloed op de netto slibbalans. Dit transport kan, afhankelijk van de windrichting, afwijken van de gemiddelde transporten door het getij. Met het getij gaat water voorspelbaar heen en weer. Dat levert grote bruto transporten op (er gaat per getij met de vloed veel slib naar binnen, en met eb weer naar buiten) maar in vergelijking is de bijdrage aan het netto transport beperkt. Als door windgedreven transport water met slib veel meer in een enkele richting stroomt, en weinig terug, dan levert dat verhoudingsgewijs een groot effect op het netto transport.

Uit twee modelsimulaties die alleen verschillend zijn in meteorologische forcering (windrichting en -sterkte), blijkt een groot verschil in netto sedimentatie in de Waddenzee. Dit zou een verklaring kunnen vormen voor de relatief belangrijke verschillen in concentraties zwevend stof tussen de jaren. Onze hypothese is dat windgedreven transport ertoe kan leiden dat bepaalde dynamische slibbuffers worden opgeladen, en dat dit relatief lang kan aanhouden met langdurig verhoogde slibconcentraties als gevolg. Dit zou bijvoorbeeld het geval hebben kunnen zijn in 2008 en 2011. Het model heeft ook laten zien dat er tijdelijke buffers van slib aanwezig zijn op de grote slibsedimentatiegebieden langs de Afsluitdijk, de Friese kust en het wantij achter Ameland. Het blijft echter moeilijk om deze hypothese aan de hand van metingen te testen. Verder onderzoek met meer hoogfrequente metingen van zwevend stof, en inschatting van dynamische slibbuffers, zal moeten uitwijzen of de pieken in zwevend stof inderdaad via deze opeenvolging van processen kunnen worden verklaard.

### Slibtransport in 2017 (2016)



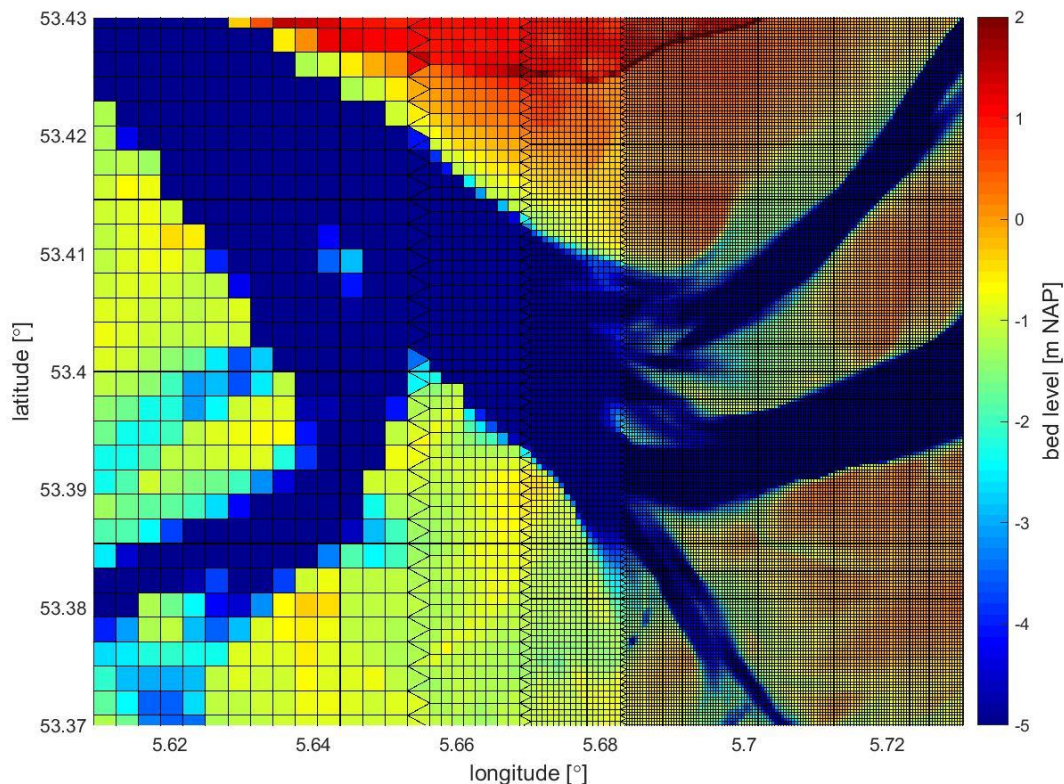
*Slibimport/export en slibsedimentatie in de Waddenzee met een numeriek model berekend voor het jaar 2017 met tussen haakjes het effect van andere windforcering (die van het jaar 2016, alle andere modelinstellingen hetzelfde). De windforcering kan leiden tot een factor 2-3 verschil in netto sedimentatie.<sup>x</sup>*

## 6 Waddenslibmodel: een instrument voor beheer en onderzoek

Metingen van het zwevend stofgehalte in de waterkolom en het slibgehalte in bodem geven inzicht in het resultaat van het samenspel van verschillende processen die de slibdynamiek beïnvloeden. Metingen zijn echter beperkt in de ruimte en in de tijd. In de Waddenzee zijn er momenteel vijf meetstations, die in de zomer om de twee weken en in de winter maandelijks worden bemonsterd. Een numeriek model kan de gaten in ruimte en tijd dichtmaken, en zo een duidelijker beeld schetsen van de fluctuaties in slibgehalte op verschillende tijdschalen en op verschillende plaatsen. Daarnaast kan een numeriek model ook bijdragen aan inzicht in de dynamiek, omdat in het model selectief bepaalde processen, bijvoorbeeld baggeren of windinvloed, kunnen worden uitgezet of aangepast. Metingen daarentegen tonen een eindresultaat en integreren dus het samenspel van alle sturende processen, zoals getij, wind, golven, baggeren en verspreiden, zoetwaterafvoer etc. Met het numerieke model zijn vele factoren individueel onderzocht. De vorige paragrafen beschreven al welke inzichten het numerieke model daardoor in de werking van het systeem heeft opgeleverd.

Het numerieke model kan ook gebruikt worden om een inschatting te maken van het effect van verschillende beheerinterventies (zoals verdiepingen of veranderde baggerspecieverspreiding), beleidsopties (zoals de organisatie van vaarverbindingen of visserijbeleid) of historische en toekomstige autonome ontwikkelingen (zoals het effect van grootschalige bodemveranderingen of zeespiegelstijging) en is daarmee een waardevolle tool om de Waddenzee op een duurzame manier te kunnen beheren.

Het opzetten van een numeriek model voor slibdynamiek is lastig, omdat de slibdynamiek een resultante is van een groot aantal sturende processen die onderling elkaar ook beïnvloeden. Daardoor vraagt het model veel rekenkracht, waardoor scherpe keuzes moeten worden gemaakt in de fijnheid van het rekenrooster van het model. We kunnen niet overal in zoveel ruimtelijk detail rekenen als we zouden willen. In het voor KRW slijb ontwikkelde model hebben we de mogelijkheid om lokaal het rooster te verfijnen, zoals in de figuur hieronder.



Deel van het numerieke modelrooster met de bodemligging en een roosterverfijning in het bekken van Ameland. Links is de resolutie ~200 m x 200 m en in drie stappen neemt die resolutie toe tot ~25 m x ~25 m.<sup>xi</sup>

Het slibmodel wordt vervolgens ingeregeld om het tot dynamisch evenwicht te laten ontwikkelen. Dit betekent dat de slibhoeveelheid in de bodem 'klopt' met de hydrodynamiek, dat de sedimentconcentraties in de waterkolom in overeenstemming zijn met gemeten waarden, en dat de slibimport door de zeegaten in overeenstemming is met inschattingen uit de literatuur. Voor slib is het daarnaast belangrijk om de Waddenzee als een geheel te beschouwen, omdat er veel uitwisseling over de wantijen plaatsvindt. Deze transporten van water en sediment zijn niet in voldoende detail bekend om ze rechtstreeks via modelranden te kunnen opgeven. Als een slibmodel niet goed is ingeregeld of belangrijke sturende processen niet zijn gerepresenteerd, is de voorspellende waarde van het model laag.

**Kenmerken slibmodel Waddenzee:**

- 3D rekenrooster
- Getij
- Wind
- Golven
- Zoetwaterafvoer
- Minimaal 2 slibfracties
- Slib op de randen
- Ingespeelde bodemsamenstelling
- Slibimport naar de Waddenzee
- Realistische slibconcentraties in het water

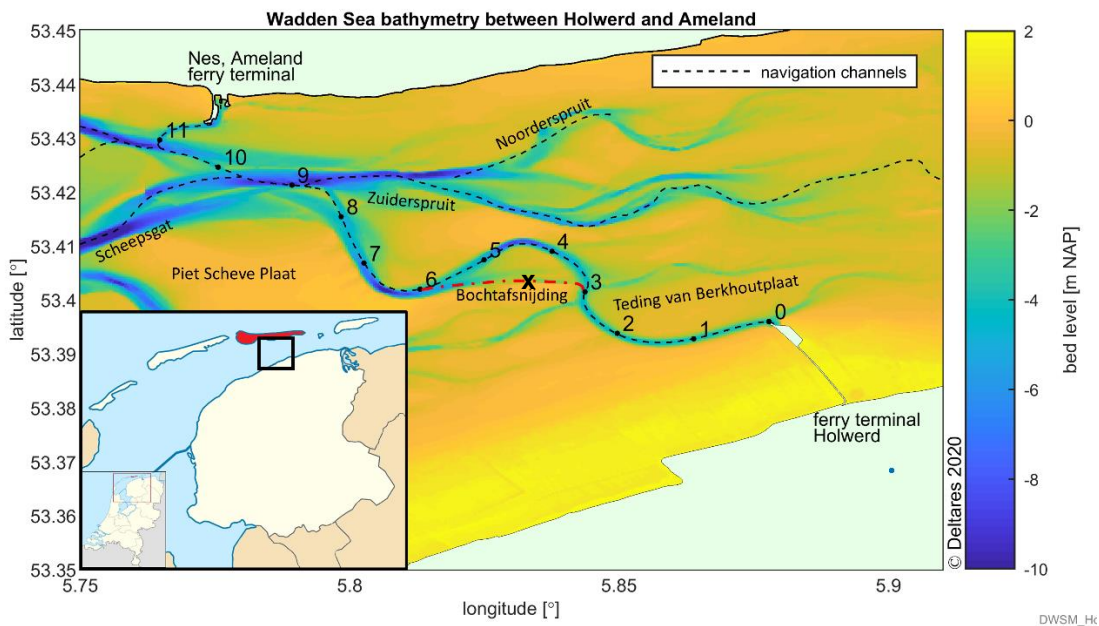
Vanwege de toegevoegde waarde van het model voor beheervraagstukken, zal het model in beheer worden genomen en zal het bij Rijkswaterstaat (Helpdesk water) kunnen worden opgevraagd voor gebruik door derden.

## 7 Toepassing van het model voor beheervraagstukken

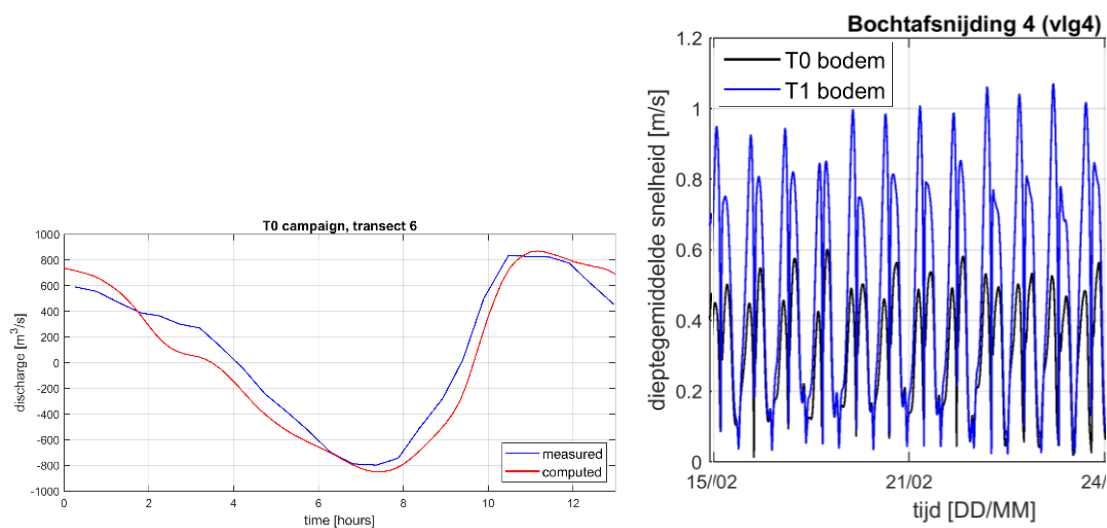
Het afgeregelde slibmodel presteert goed in de voorspelling van concentraties van zwevende stof op verschillende tijdschalen (effect getij, golven, stormen, springtij-doodtij cyclus), van bodemslibgehalte in de verschillende delen van de Waddenzee en van netto transporten door de zeegaten. Daarmee is het klaar om voor verschillende beheervraagstukken te worden ingezet. Hiervan geven we twee voorbeelden: 1) toepassing om het effect van de bochtafsnijding in de Vaargeul tussen Holwerd en Ameland te evalueren en het effect van het verspreiden van baggerspecie op de baggervolumes en zwevende stofgehalte te bepalen en 2) uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse van het creëren van grootschalige slibvanglocaties in de Waddenzee.

### 7.1 Vaargeul Holwerd – Ameland

In het voorjaar van 2019 is een bochtafsnijding in de vaargeul tussen Holwerd en Ameland uitgevoerd om vertragingen op de vaarroute te verminderen. Deze ingreep speelde in op de natuurlijke tendens tot bochtafsnijding via een vloedschaar. Met het model zijn simulaties gedaan voor de situaties vóór en na de bochtafsnijding om het effect op hydrodynamiek en slibdynamiek te bepalen. Uit de berekeningen blijkt dat door aanleg van de bochtafsnijding de snelheden en debieten in de ebgeul afnemen en in de bochtafsnijding toenemen. Ten oosten van de bochtafsnijding leidt de ingreep tot iets hogere pieksnelheden bij eb in de vaargeul bij Holwerd. De verdeling van de debieten en de stroomsnelheden in de vaargeul komt goed overeen met recente metingen. Volgens de berekeningen zorgt de bochtafsnijding voor iets minder netto aanslibbing in de eerste drie kilometer van de vaargeul bij Holwerd.



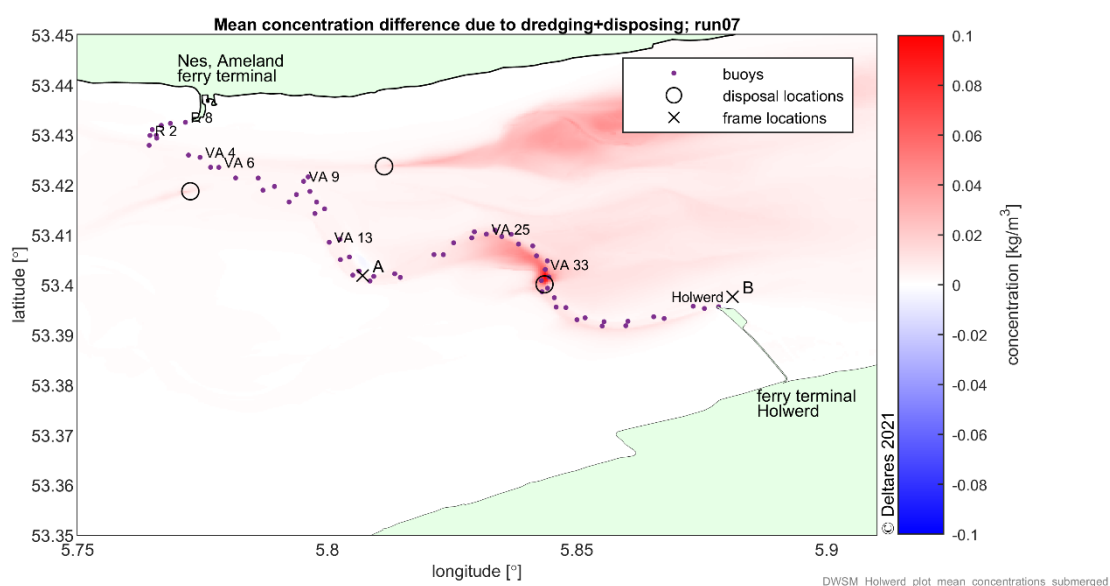
Kaart van de gerealiseerde bochtafsnijding in de vaargeul.<sup>xi</sup>



Links: Reproductie van debiet in de vaargeul ter plaatse van km 6 (zie kaart).<sup>xi</sup> Rechts: effect van de bochtafsnijding op stroomsnelheden in de bochtafsnijding (per plaatse van x op de kaart).<sup>xi</sup>

Na de hydrodynamische validatie van het model met de metingen die zijn verzameld voor de bochtafsnijding, is het model toegepast om de invloed van de bagger- en verspreidingsstrategie op de zwevende stofgehalten en de baggervolumes in te schatten.

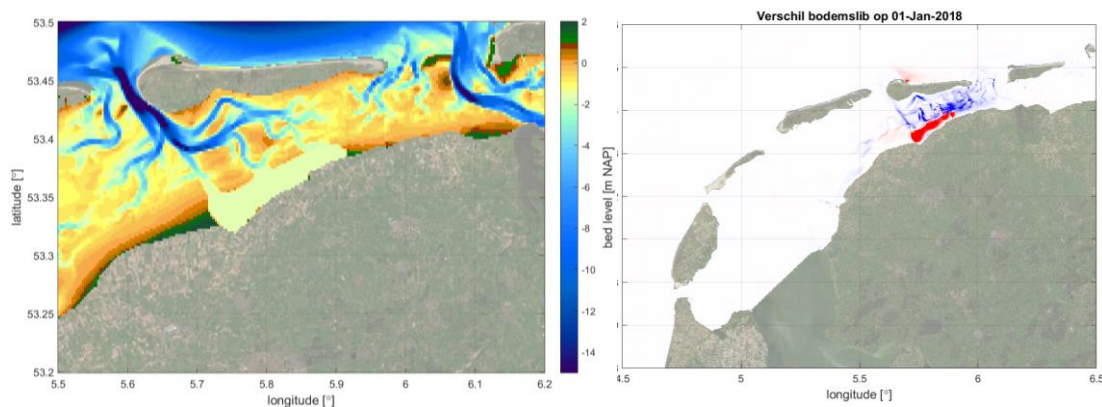
Uit de modelsimulaties blijkt dat het verspreiden leidt tot hogere vertroebeling in het bekken, en dat de retourstroom ca. 10-30% bedraagt. Dus vanaf de verspreidingslocatie stroomt ca. 10-30% van de baggerspecie weer terug en wordt opnieuw gebaggerd. Dit betekent dat het waardevol is om te zoeken naar aanpassingen en alternatieven in de bagger- en verspreidingsstrategie met als doel het verlagen van de baggervolumes. Indien alle baggerspecie op het verder weg gelegen Scheepsgat wordt verspreid, nemen de baggervolumes in het model met 10% af. Alles verspreiden op de Zuiderspruit geeft een afname van ongeveer 15%. Deze modelvoorspellingen over de retourstroom vallen lager uit dan eerdere inschattingen op basis van metingen. Praktijktesten zijn aangewezen om de geldigheid van deze voorspelling nader te toetsen.



Modelresultaat van het effect van het verspreiden van baggerspecie bij Holwerd en ten zuiden van Ameland op de zwevende stofgehalten nabij de bodem.<sup>xii</sup>

## 7.2 Slibvanglocaties

In het model zijn verschillende slibvanglocaties met een grote omvang (ca. 25 km<sup>2</sup>) toegevoegd, zowel binnendijs als buitendijs en in verschillende bekkens om een eerste verkenning uit te voeren van de effecten van dergelijke grootschalige slibvang. Slibvang zou een plaats kunnen hebben in de verdediging van laaggelegen kustzones tegen zeespiegelstijging, bijvoorbeeld in wisselpolders of tussen dubbele dijken. De grote slibvanglocaties hebben een groot effect op de slibverdeling in de bodem en in het water. Door de toegekomen komberging neemt het debiet door de geulen in het bekken toe, met hier erosie van slib tot gevolg. Doordat in de slibvang veel slib wordt afgezet, neemt het bodemslibgehalte en het zwevend stofgehalte op veel plaatsen in de Waddenzee af. Het sterkst is die trend in het bekken waarin de ingreep ligt, maar de invang van slib heeft ook een effect op het bodemslibgehalte en zwevend stofgehalte in naastgelegen bekkens. Er is dus ook een effect op de transporten door de zeegaten en over de wantijen. Bij vergelijking van de verschillende slibvanglocaties treden er verschillen op in de reikwijdte van het effect over de Waddenzee, die niet gemakkelijk verklaard kunnen worden. Dit betekent dat bij dergelijke ingrepen de specifieke lokale morfologische omstandigheden goed in ogenschouw moeten worden genomen.



*Bodemligging van de slibvang in het bekken van Ameland (links) en effect van de slibvang op het bodemslibgehalte na 1 jaar simuleren (rechts). Blauw is erosie t.o.v. de referentiesituatie en rood sedimentatie. Patronen van het zwevend stofgehalte zijn vergelijkbaar.<sup>vii</sup>*

## 8 Belangrijkste conclusies voor beheerders

Het onderzoeksproject KRW slib heeft een aantal belangrijke en bruikbare inzichten opgeleverd in de slibdynamiek. Die kunnen, hetzij lokaal hetzij op de schaal van de hele Waddenzee, gebruikt worden bij beleid en beheer.

Op de grote schaal is gebleken dat de fluctuaties in het zwevend stofgehalte in de Waddenzee groot zijn en binnen de gehele Waddenzee synchroon optreden. Dit betekent dat de Waddenzee reageert als één systeem, ook al zijn er grote verschillen in gemiddelde concentratie zwevende stof tussen de meetstations. De fluctuaties in zwevende stof in de Noordzee hebben een andere fasering. Er zijn geen aanwijzingen dat fluctuaties in de Noordzee zich verderzetten in de Waddenzee. De meerjarige fluctuaties zijn fors, met jaargemiddelde concentraties die tot een factor 2 hoger of lager zijn dan het langjarig gemiddelde. Het betreft echter fluctuaties, want op de lange termijn (periode van de afgelopen 30 jaar) is geen trend waarneembaar. De Waddenzee is in die periode dus niet troebeler geworden. Ook betekent dit dat een verhoging van het gehalte aan zwevende stof door de tijd tot nu toe altijd tijdelijk is geweest en na een aantal jaar werd gevolgd door een verlaging in het zwevend stof gehalte.

Ook binnen een jaar zijn er fluctuaties in het zwevend stof gehalte, met een factor 2 hogere zwevend stofgehaltes in de winter en een factor 2 lagere gehalten in de zomer, vergeleken met

het jaargemiddelde. Ondanks grote verschillen in de jaargemiddelde concentratie zwevend stof, en verschillen in systeemkenmerken zoals diepte of sedimentsamenstelling, zijn de seizoenale fluctuaties in Waddenzee, Noordzee en estuaria allemaal vrijwel gelijk wanneer ze relatief tot het langjarig gemiddelde worden uitgedrukt. Deze fluctuaties worden voor een belangrijk deel veroorzaakt door resuspensie door gemiddeld hogere golven in de winter. Dit is buiten het effect van stormen gerekend, die in de Waddenzee leiden tot een tijdelijke verhoging van het zwevend stofgehalte.

De vorming van microfytobenthos in het voorjaar leidt tot het vasthouden van slib op de intergetijdengebieden, waardoor de seizoensdynamiek wordt versterkt. Microfytobenthos heeft geen aandeel in de meerjarige fluctuaties in zwevende stof. Ook vlokvorming door algen draagt mogelijk bij aan seizoensfluctuaties in zwevende stof, maar de mate waarin beide ecologische processen bijdragen ten opzichte van de meteorologie is nog niet vastgesteld.

Berekeningen met het numerieke model tonen aan dat grootschalige meteorologische processen, in het bijzonder de windforcering, grote impact hebben op de netto slibtransporten naar en binnen de Waddenzee. Van het ene jaar op het andere kan, afhankelijk van de windforcering, het verschil in netto sedimentatie een factor 3 bedragen. Bij de modelmatige analyse van beheeringrepen moet hiermee rekening worden gehouden. De keuze van de modelperiode kan grote invloed hebben op de balansen. Beheeralternatieven kunnen maar onderling vergeleken worden als ze over dezelfde periode worden toegepast. Kritische processen moeten over verschillende periodes worden beschouwd.

De grote meerjarige fluctuaties in zwevende stof en jaarlijkse netto slibsedimentatie in de Waddenzee zijn het gevolg van een lang 'geheugen' van het systeem. We brengen de hypothese naar voren dat de opeenvolging van verschillende meteorologische forcering kan leiden tot het 'opladen' of leeglopen van tijdelijke slibbuffers in het systeem, met een verhoging in het zwevende stof gehalte over langere periodes tot gevolg.

Op basis van de morfologische veranderingen en de veranderingen in bodemslibgehalte kunnen we afleiden dat de slibimport in de westelijke Waddenzee lineair verloopt, terwijl de import van hier zand afvlakt. Slib wordt vooral afgezet in de oude geulen die afgesneden zijn door de Afsluitdijk, de Vlakte van Oosterbierum en langs de Friese en Groninger kust. Op enkele plaatsen is het slibrijker geworden.

In de oostelijke Waddenzee wordt nog steeds zand en slib geïmporteerd en is de slibimport toegenomen sinds de jaren '70, waarschijnlijk als gevolg van de afsluiting van de Lauwerszee. Ook vindt in dit deel van de Waddenzee – in tegenstelling tot de westelijke Waddenzee – ongeveer de helft van de slibsedimentatie plaats in de kwelders.

Het gestaag ophogen van de landwaartse zijde van de Waddenzee bekkens met slibrijk sediment heeft gevolgen voor de bereikbaarheid van de havens en de eilanden. Op veel locaties neemt het baggerbezwaar toe (Holwerd, Boontjes), en deze trend is gekoppeld aan de grootschalige sedimentatie die in alle bekkens (ook in Duitsland) plaatsvindt. Het duurt naar verwachting nog decennia totdat zeespiegelstijging dit beeld zal kantelen.

Uit ander onderzoek is gebleken dat de grootschalige slibstroom langs de Nederlandse kust afneemt in kustlangse richting langs de internationale Waddenbekkens, als gevolg van slibsedimentatie in de bekkens. Lokale ingrepen hebben daardoor ook een uitstralend effect op de rest van de Waddenzee. De uitdaging voor de toekomst ligt in het optimaliseren van het lokale beheer (bijvoorbeeld de baggerinspanning) op een manier die zo min mogelijk verstoring van het natuurlijk systeem en de natuurlijke dynamiek veroorzaakt. Op de lange termijn dient onderzocht te worden in welke mate slib kan bijdragen aan het meegroeien met

zeespiegelstijging en hoe het beheer in de nabije toekomst daar al aan kan bijdragen, in een context van de internationale Waddenzee.

## 9 Toekomstige inspanningen voor systeembegrip ten dienste van beheer

Het complexe en dynamische karakter van het slib in de Waddenzee en het belang van slib voor natuur, toegankelijkheid en veiligheid vraagt om een goede opvolging van de slibdynamiek middels monitoring en numerieke en conceptuele (denk)modellen.

Voor toekomstige inspanningen is het van belang te kunnen beschikken over meetgegevens die het spectrum van tijd- en ruimteschalen beter kunnen bestrijken. Wij pleiten voor het volhouden van de huidige monitoringspanningen voor de lange termijn, en deze aan te vullen met hoogfrequente metingen op enkele locaties in de Waddenzee, zoals bij het Dantziggat en Doove Balg<sup>xiii</sup>. Met hoogfrequente metingen kan meer inzicht worden verkregen in de getij-asymmetrie en het effect van stormen. Ook kunnen nieuwe metingen gebruikt worden voor 'ground truth' van satellietbeelden voor zwevend stof en ter kalibratie en validatie van modellen. Het mobiliseren van satellietbeelden kan de ruimtelijke resolutie van onze data-gebaseerde inzichten sterk verbeteren.

Eenvoudige maar hoogfrequente metingen van saliniteit, verspreid op een aantal locaties in de Waddenzee, zou veel inzicht kunnen verschaffen in de fluctuaties in netto transporten over de Waddenzee. Dit kan bijdragen aan een betere inschatting van de netto slibbalansen. Zoutgehalte staat in direct verband met de gravitatiecirculatie, een belangrijke component van het slibtransport in de Waddenzee. Daarnaast is zoutgehalte een uitstekende proxy voor transport over de wantijen.

De betere inschatting van netto transporttermen kan helpen bij het verklaren van de langjarige fluctuaties in het gehalte zwevende stof. De hypothese dat deze verlopen via het opladen van tijdelijke slibbuffers kan worden getest door nauwkeuriger en op basis van hoogfrequente metingen vast te stellen of, en hoe, meteorologische fenomenen bijdragen aan het mobiliseren van slib. Daarnaast zijn deze metingen belangrijk om vast te stellen of slib, eens gemobiliseerd, inderdaad lang in suspensie blijft en welke dynamiek dit slib op korte termijn vertoont. Tenslotte kan met het model onderzocht worden of en hoe tijdelijke buffers kunnen worden waargenomen in het veld.

Verdere modelontwikkeling kan zich het beste richten op het verbeteren van de basisprocesformuleringen voor slibdynamiek. Wij onderscheiden twee terreinen waar verdere verbetering mogelijk is. Het samenbrengen van zand- en slibmodellen en de interactie van zand en slib is het eerste onderwerp. Voor veel beheervraagstukken, en voor een goed begrip van de morfologie van de Waddenzee, is zowel het gedrag van zand als van slib van belang. Met één model die ook de interactie tussen beide sedimenttypen meeneemt, wordt naar verwachting ook de slibsedimentatie op het intergetijdengebied beter voorspeld. Er worden al stappen gezet om naar een zand-slibmodel voor het Waddengebied te komen. Het tweede onderwerp richt zich op het beter modelleren van de slibeigenschappen en hun verandering over de tijd. Processen als de opbouw van sterkte van slib na afzetting op de bodem, of vlokvorming in de waterkolom, kunnen waarschijnlijk beter worden voorgesteld en geparаметeriseerd dan in het huidige model is gedaan. Daarmee kunnen essentiële vraagstukken, bijvoorbeeld met betrekking tot baggeren en verspreiden, naar verwachting nauwkeuriger worden gesimuleerd.

Alle slib dat langs de Franse, Belgische en Nederlandse kust in de slibstroom langs stroomt, vindt langs deze kusten een stabiele berging. Het deel van deze slibstroom die bij Den Helder wordt aangeboden, wordt afgezet in de internationale Waddenzee. Een gevolg daarvan is dat



lokale ingrepen en vooral een opschaling van ingrepen zoals nieuwe waterkerende landschappen, brede groene dijken, grootschalige kleirijperijen, wisselpolders, in principe gevolgen hebben op grote schaal. Slib dat op één plaats wordt vastgehouden kan immers elders niet meer bezinken, of omgekeerd. Een samenhangende blik op het slibbeheer van de (internationale) Waddenzee, de gehele Nederlandse en zelfs de Belgische en Franse kust is nodig.

## 10 Producten uit KRW slib

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 rapport 083755930 0.1

Cleveringa, J. & Dankers, P. (2019). [Slib in de Waddenzee - KRW, PAGW en modelstudies](#). Arcadis memo 084043130 0.1.

Colina Alonso, A. (2020). [Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee. Data analyse](#). Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0003.

Dankers, P. de Vries, B. & Cleveringa, J. (2019). [Voorstel nieuwe metingen slibhuishouding Waddenzee](#). RoyalHaskoningDHV memo: BG2802-RHD-ZZ-XX-NT-Z-0001

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

Herman, P. (2021). [Analyse van relatie tussen microfytobenthos en gesuspendeerd slib](#). Deltares memo 11206799-004-ZKS-0001. Versie 0.3.

Herman, P., Vroom, J., Smits, B., Van Weerdenburg, R. & Van Kessel, T. (2020). [Slibdynamiek in de Waddenzee. Update conceptueel model 2020](#). Deltares rapport 11205229-002-ZKS-0001.

Smits, B., Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Cleveringa, J. & Dankers, P. (2020). [Analyse fysische processen Waddenzee Inzet numeriek model voor analyse systeemwerking en gevoeligheidsscenario's](#). Deltares-Arcadis-RoyalHaskoningDHV rapport 1205229-002-ZKS-0003.

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](#). RoyalHaskoningDHV rapport BG2802WATRP1812170918

Vroom, J., van Weerdenburg, R., Smits, B. & Herman, P. (2020). [Modelleringslibdynamiek voor de Waddenzee. Kalibratie voor KRW slib](#). Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0001

## 11 Colofon

Deze brochure is opgesteld door Deltares en Rijkswaterstaat en bevat de belangrijkste uitkomsten van het project KRW-slib onder KPP Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden of MorfWad (2018-2020).

Deze brochure is geschreven door Julia Vroom, Peter Herman en Thijs van Kessel en bevat informatie en figuren uit vele andere projecten. Onderstaande zijn expliciet vermeld in de tekst.

---

<sup>i</sup> Van Kessel, T. (2015). Opzet en toepassing slibmodel Waddenzee. Eindrapportage. Deltares rapport 1220102-000-ZKS-0010.

<sup>ii</sup> Dalrymple, R.W. & Choi, K. (1978). Sediment transport by tides. In: Sedimentology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/3-540-31079-7\\_181](https://doi.org/10.1007/3-540-31079-7_181). Ontleend aan Van Straaten & Kuenen, 1957.

<sup>iii</sup> Databron: AHN

<sup>iv</sup> Bron: RWS Brochure morfologische veranderingen

<sup>v</sup> Colina Alonso, A. (2020).

- 
- <sup>vi</sup> Herman et al. (2018).
- <sup>vii</sup> Smits et al. (2020).
- <sup>viii</sup> Oost, A., Colina Alonso, A., Esselink, P., Wang, Z.B., van Kessel, T. & van Maren, B. (2020). [Where mud matters. Towards a Mud Balance for the Trilateral Wadden Sea Area: Mud supply, transport and deposition](#). ISBN 978-94-90289-57-7.
- <sup>ix</sup> Gebaseerd op data van Colina Alonso, A. (2020) en Cleveringa, J. (2018).
- <sup>x</sup> Aangepast van Smits et al. (2020).
- <sup>xi</sup> Grasmeijer, B. & van Weerdenburg, R. (2020). [Evaluatie Bochtafsnijding Vaarweg Ameland](#). Deltares rapport 11205229-006-ZKS-0002. Versie 1.1.
- <sup>xii</sup> Grasmeijer, B., van Weerdenburg, R. & van Kessel, T. (2021). [Invloed baggerstrategie op slibconcentraties en baggervolumes vaarweg Holwerd-Ameland](#). Deltares rapport 11206799-006-ZKS-0001. Versie 0.7.
- <sup>xiii</sup> Dankers et al. (2019).