



**Een conceptueel model voor  
slibdynamiek in de Waddenzee**

KRW slib

7 november 2019

Nederlandstalige powerpoint met samenvatting van het conceptueel modelrapport, inclusief annotaties

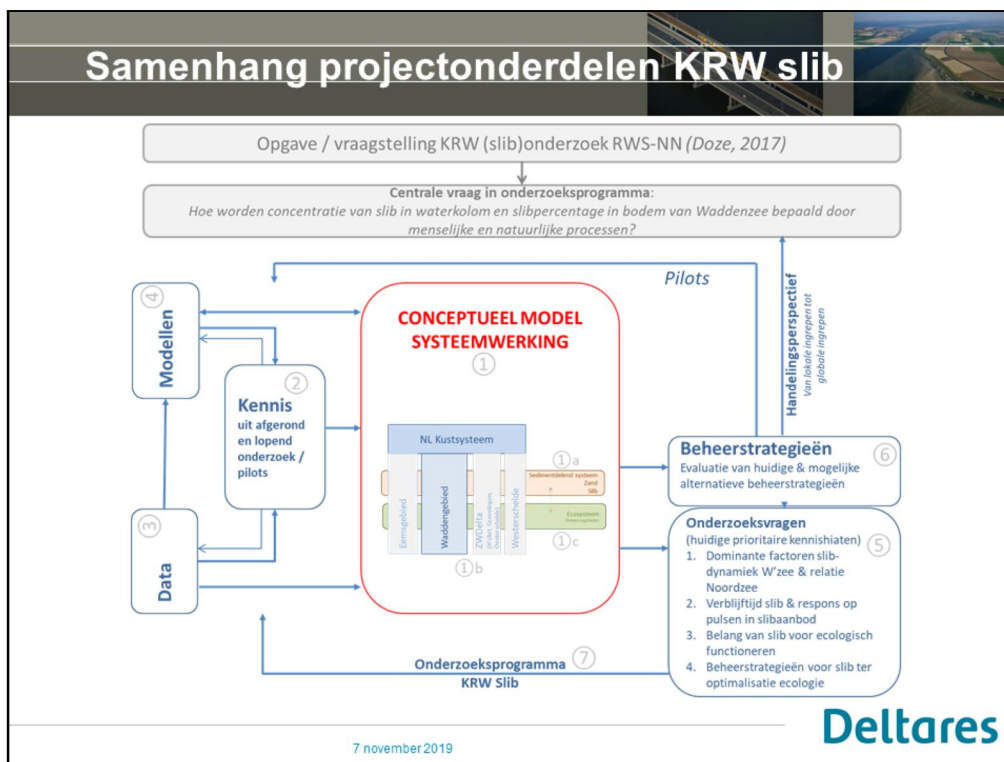
## Aanleiding: KaderRichtlijn Water (KRW)

- KRW: bindende kaders voor bescherming en duurzaam gebruik oppervlaktewater (waterkwaliteit en ecologische toestand)
- Binnen KRW Waddenzee is slibhuishouding één van de onderwerpen, want slib speelt een belangrijke rol in morfologisch en ecologisch systeem
- Sleutelfactoren: waterbeweging, sedimenttransport, troebelheid en nutriëntenconcentraties
- Deltares, RHDHV & Arcadis werken gezamenlijk aan slib in de Waddenzee in relatie tot de KRW
- Openstaande vragen:
  - Hoe groot is rol slib in morfologie en ecologie in de Waddenzee?
  - Welke processen zorgen voor fluctuaties slib op korte en lange termijn?
  - Is er een probleem met slib in de Waddenzee?

**Deltares**

7 november 2019

Petra: Slib speelt een belangrijke rol in het morfologisch en ecologisch systeem, maar het is onduidelijk hoe groot die rol is. Daarnaast begrijpen we niet goed welke processen zorgen voor de fluctuaties van slib in het water op korte en lange termijn. In het belang van de klimaatverandering en bijbehorende versnelde zeespiegelstijging is het belangrijk om goed zicht te hebben op de bijdrage van slib aan het morfologisch systeem. Dit geeft sturingshandvaten voor beheerders. Zelfde kan ook gezegd worden over ecologische kwaliteit.



Samenhang tussen de verschillende onderdelen van het project KRW slib.

1. Conceptueel model over de systeemwerking. Dit staat centraal, waarbij andere onderdelen toeleveren aan het conceptuele model (2, 3 & 4) of volgen uit het conceptuele model (5 & 6).
2. Kennis uit afgerond en lopend onderzoek en/of pilots (geen projectdoel, maar levert toe aan het systeembegrip)
3. Data afkomstig uit in-situ metingen (geen doel op zich, maar ter ondersteuning van het conceptuele model)
4. Modellen (geen doel op zich, maar ter ondersteuning van het conceptuele model)
5. Onderzoeksvragen (huidige prioritaire kennishiaten):
  1. Verspreiding van slib in de Waddenzee
  2. Verblijftijd slib en reactie op pulsen in slibaanbod
  3. Belang van slib voor het ecologisch functioneren
6. Beheerstrategieën: evaluatie van huidige & mogelijke alternatieve beheerstrategieën

**Doelstelling**



Rapport 'Mud dynamics in the Wadden Sea' is 1<sup>e</sup> stap in ontwikkeling van conceptueel model voor slibdynamiek in Waddenzee

Hoofdvraag:  
*"Hoe worden concentratie van slib in waterkolom en slibpercentage in bodem van Waddenzee bepaald door menselijke en natuurlijke processen?"*

Vier subvragen, waarin gekeken wordt naar:

- dominante factoren voor slibdynamiek in Waddenzee en relatie met deze factoren in Noordzee
- verblijftijd van slib in Waddenzee en systeemrespons op pulsen in slibtoevoer
- belang van slib voor ecologische functies van Waddenzee
- aangepaste beheerstrategieën voor slib en kustlijnontwikkeling, die leiden tot optimalisatie van ecologische kwaliteit van systeem

7 november 2019


Dit rapport is een eerste stap in de ontwikkeling van het conceptuele model voor slibdynamiek in de Waddenzee. Het is gebaseerd op analyse van beschikbare gegevens en oudere modelberekeningen. Daarmee wordt een aanzet gegeven voor de verdere ontwikkeling van numerieke modellen, en een basis gecreëerd voor beleidsstrategieën. Dit rapport is een tussenrapportage op weg naar het conceptuele model; verdere ontwikkelingen zullen in de toekomst toegevoegd worden.

Op basis van een beter begrip van de slibdynamiek, te formaliseren in conceptuele en numerieke modellen, kunnen de beleidsdoelstellingen voor de Kaderrichtlijn Water worden vastgesteld, en kan het beheer worden aangepast om deze doelstellingen te bereiken. Bij 'optimalisatie van de ecologische kwaliteit van het systeem' gaat het dan niet alleen om troebelheid of hoeveelheid slib op de platen, maar ook om behoud van arealen.

## Belang slibdynamiek voor beheer Waddenzee

Slib speelt cruciale (maar vaak slecht begrepen) rol in waterbeweging, geomorfologie en ecologie van de Waddenzee:

- Complexe rol, wederzijdse interacties
- Korte en lange termijn processen

**Deltares**

7 november 2019

Dynamiek, tijdschalen en mechanismen en uitwisseling:

Vanuit het beheer van vaarwegen en de zorg voor goede ecologische kwaliteit is het van groot belang een goed inzicht te hebben in de dynamiek van slib, de tijdschalen die hierbij van belang zijn en de belangrijkste mechanismen die het slibgehalte van het sediment in de waterkolom bepalen.

Bovendien kan slib in de Waddenzee niet in isolatie worden beschouwd. Het is bekend dat er grote uitwisselingen zijn van slib met de Noordzee, waardoor ontwikkelingen rond slib in de Waddenzee kunnen worden gekoppeld aan de slibdynamiek in de gehele Nederlandse kustzone.

## Belang slibdynamiek voor beheer Waddenzee

Slib speelt cruciale (maar vaak slecht begrepen) rol in waterbeweging, geomorfologie en ecologie van de Waddenzee:

- Complexe rol, wederzijdse interacties
- Korte en lange termijn processen

**1. Waterbeweging**  
 Afzetting slib langs vastelandskust heeft gevolgen voor komberging en stromingspatronen van kleinere geulen (interactie met geomorfologie). Dit bepaalt vervolgens transportmechanismen en afzettingsmogelijkheden van slib

**Deltares**

7 november 2019

### Ecologie

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

Slibgehalte van de bodem bepaalt het habitat voor het bodemleven, omdat andere dieren voorkomen in slibrijke dan in zandige bodems. Ook dit vertaalt zich door in het voorkomen van vis en vogels. Slib is een essentiële karakteristiek van kwelderbodems, als gevolg van een wederzijdse beïnvloeding van vegetatie en (slib)sedimentatie.

In de Kaderrichtlijn Water, die ook voor overgangswateren als de Waddenzee de goede ecologische kwaliteit moet garanderen, is begrip van de slibdynamiek essentieel. De goede ecologische kwaliteit weerspiegelt immers (aspecten van) het voedselweb en de structuur van aanwezige populaties die in belangrijke mate door slib worden bepaald. Daarom is het van belang te weten welke ontwikkelingen en trends zich rond het slibgehalte in water en bodem voordoen en hoe deze de ecologische ontwikkeling beïnvloeden. Dat laatste aspect is in deze studie niet uitgewerkt.

## Belang slibdynamiek voor beheer Waddenzee

Slib speelt cruciale (maar vaak slecht begrepen) rol in waterbeweging, geomorfologie en ecologie van de Waddenzee:

- Complexe rol, wederzijdse interacties
- Korte en lange termijn processen

**2. Geomorfologische veranderingen**  
 Slib speelt ook grote rol in bodemveranderingen Waddenzee. Netto sedimentafzettingen bevatten (kleine/grote) hoeveelheid slib → bijdrage aan netto sedimentvolume, andere ruimtelijke patronen dan zand (bijv. kwelderbodems)

**Deltares**

7 november 2019

### Geomorfologische veranderingen:

In toenemende mate realiseren we ons dat slib ook een grote rol speelt in de geomorfologische veranderingen in de Waddenzee. Alle sediment dat zich netto in de Waddenzee afzet bevat een kleine of grote hoeveelheid slib. Vooral bij hogere percentages slib in de bodem draagt dat slib netto bij aan het volume sediment dat wordt afgezet. Slib zet zich bovendien stabiel af op andere plaatsen dan zand. Het meest extreme voorbeeld zijn kwelderbodems, die voor een groot deel uit slib bestaan en door vegetatie worden gestabiliseerd.

## Belang slibdynamiek voor beheer Waddenzee

Slib speelt cruciale (maar vaak slecht begrepen) rol in waterbeweging, geomorfologie en ecologie van de Waddenzee:

- Complexe rol, wederzijdse interacties
- Korte en lange termijn processen

**3. Ecologie**  
 Slib vermindert lichtdoordringing in waterkolom. Grote invloed op primaire productie, groei van microscopische algen (basis voedselweb). Slib bepaalt ook voedselkwaliteit van schelpdieren (link tussen algen en vogels) en ontwikkeling habitat voor bodemleven.

**Deltares**

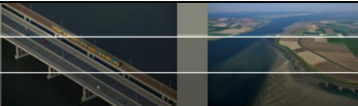
7 november 2019

### Hydrodynamiek:

Via de geomorfologie, en in een duidelijke interactie daarmee, speelt slib ook een rol in de hydrodynamiek van de Waddenzee. Als zich langs de vastelandskust grote volumes slibrijk sediment afzetten, dan heeft dat gevolg voor de komberging van de kleinere geulen en daarmee op de stromingspatronen. Dit op zijn beurt bepaalt de transportmechanismen en de afzettingmogelijkheden van slib.



**Aanpak data analyse (2018)**



Analyse van gegevens die op grote schaal in tijd en ruimte zijn verzameld, op basis waarvan wordt besloten wat dominante mechanismen of openblijvende vragen zijn

Samen met beleids- en beheerscontext vormt dit de basis voor verdere modelontwikkelingen en beleidsanalyses

Analyses:

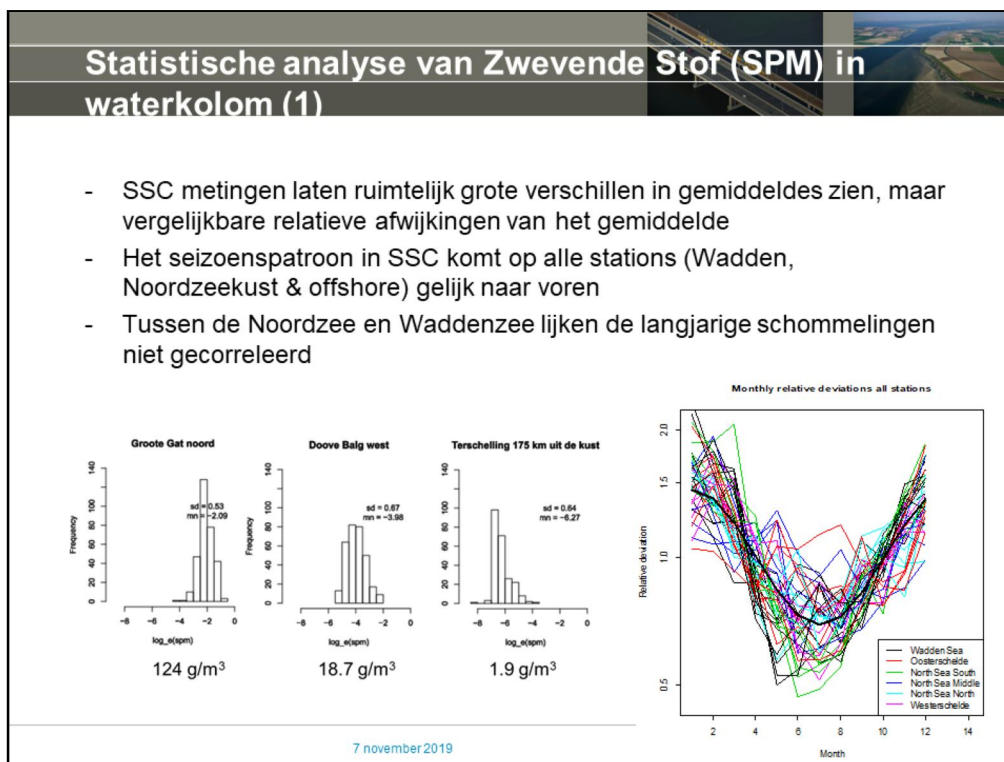
- Statistische analyse van Zwevende Stof (SPM) in de waterkolom
- Statistische analyse van slibgehalte van de (intertidale) sedimenten in de Waddenzee
- Ruimtelijke en temporele verdeling van het microfytobenthos
- Gevolgtrekkingen voor de modellering van slib

7 november 2019


#### Studies uit het verleden:

In het verleden zijn meerdere modelstudies naar slibdynamiek in de Waddenzee uitgevoerd. Deze hebben ons begrip van de slibdynamiek aanzienlijk verbeterd. Zij hebben ook geholpen om de invloed van meerdere menselijke ingrepen (bv. vaargeulonderhoud, visserij, lokale ingrepen, suppleties, zeespiegelstijging) onderling te vergelijken en de belangrijkste termen te selecteren. Toch is het moeilijk om op basis van deze resultaten te schakelen tussen meerdere tijdschalen, vanaf de zeer korte schaal (binnen een getij) waarin de belangrijkste processen van transport, depositie en erosie optreden, tot de langjarige tijdschaal waarop morfologische aanpassingen worden geobserveerd.

In dit rapport wordt daarom een omgekeerde benadering gekozen. Er wordt gebruik gemaakt van gegevens die op grote schaal in tijd en ruimte zijn verzameld, om op basis van een analyse van deze gegevens te besluiten wat de dominante mechanismen of openblijvende vragen zijn. Dit vormt, samen met de beleids- en beheerscontext, de basis voor verdere modelontwikkelingen en beleidsanalyses.

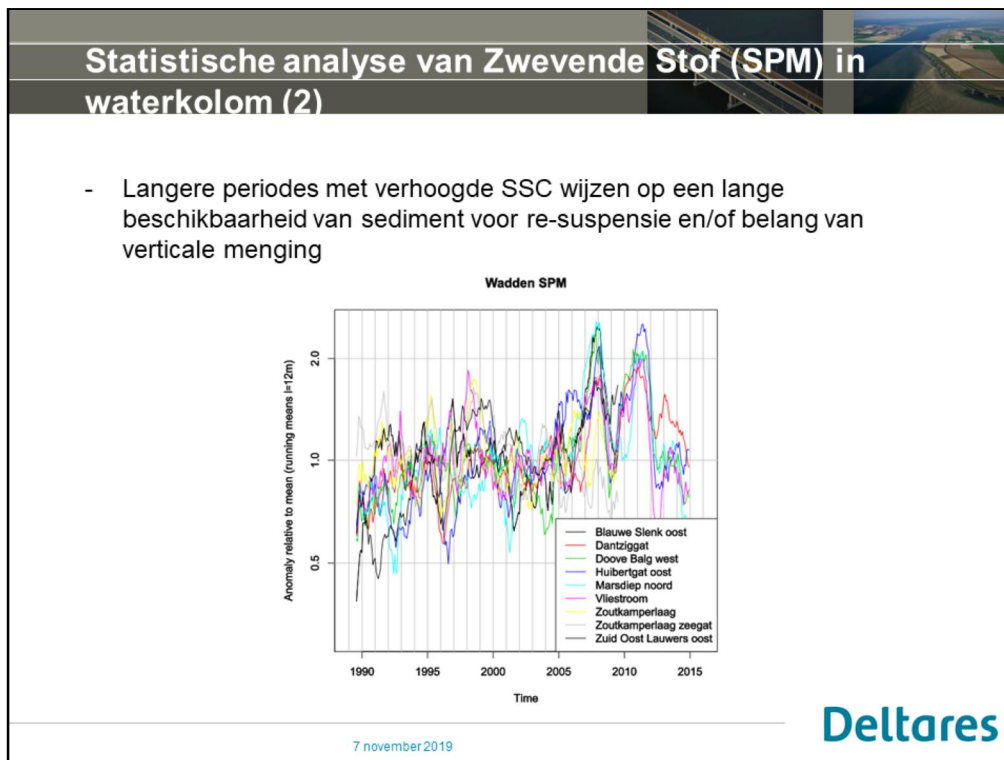


De statistische analyse van de MWTL-meetreeksen van zwevend stof sinds 1989 leverde een aantal opvallende en soms onverwachte karakteristieken op. De waarschijnlijkheidsverdeling in verschillende stations vertonen opvallende gelijkenissen in de (relatieve) mate van variatie en het feit dat de seizoensvariatie (relatief tot het langjarig gemiddelde) op alle plaatsen zeer gelijkaardig is. De statistisch-technische details van al deze patronen worden hier kort samengevat, zie voor een uitvoerige bespreking het rapport.

Uit de statistische verdeling van de waarnemingen van gesuspenseerd materiaal aan de oppervlakte van de waterkolom kan worden afgeleid dat de processen die deze concentratie bepalen vooral *multiplicatief* zijn, d.w.z. hoeveelheden toevoegen of wegnemen die in verhouding staan tot de hoeveelheden die in de waterkolom aanwezig zijn. Dit lijkt voor de hand liggend voor processen als sedimentatie of verticale herverdeling van het gesuspenseerd materiaal, maar het is niet vanzelfsprekend voor resuspensie. Of dat zo is, en zo ja, waarom, is een belangrijk punt om nader uit te zoeken.

Het feit dat de variabiliteit van de statistische verdeling in alle stations ongeveer gelijk is, relatief tot het gemiddelde, is eveneens moeilijk te verklaren. Ondiepere stations hebben een veel grotere dynamiek van sedimentatie en resuspensie hebben dan diepere stations. Het feit dat de variabiliteit ongeveer gelijk is suggereert dat een andere factor, bv. verticale herverdeling of zinksnelheid van de deeltjes, in diepere stations een rol vervullen die toch zorgt voor een gelijkaardige variabiliteit. Ook hiervoor moet nog een afdoende verklaring worden gevonden.

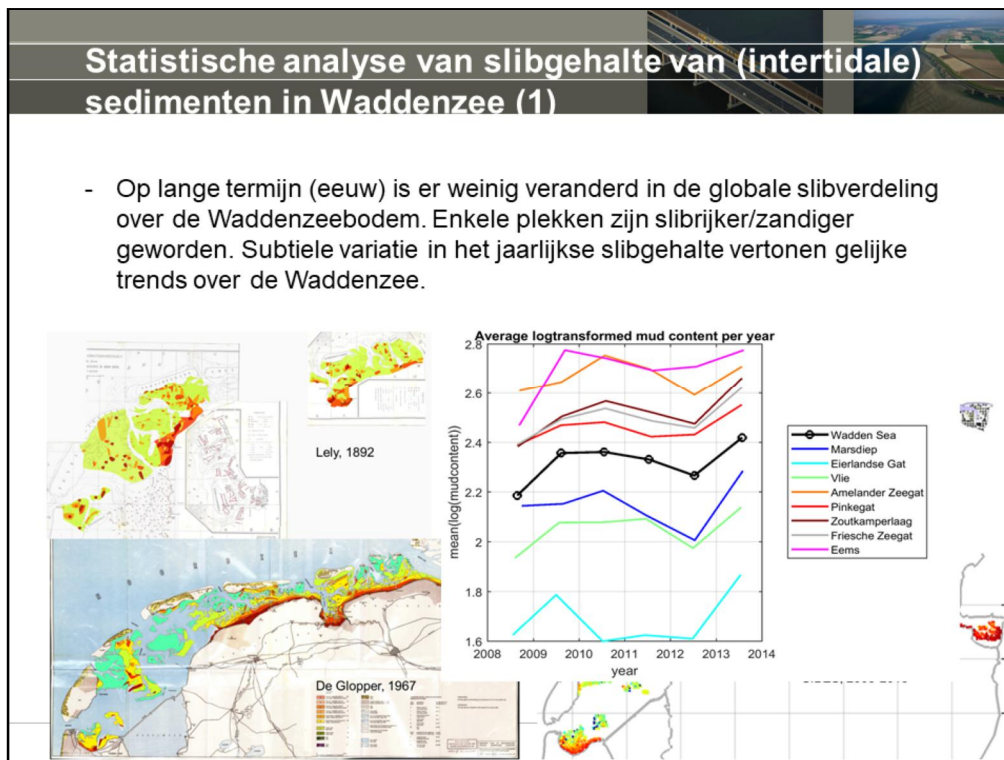
Hetzelfde geldt voor de seizoenscomponent van de tijdseries. Niet alleen is die in alle stations ongeveer even groot (relatief tot het gemiddelde). Ook de fase is gelijk, met maxima in januari en minima in juli. Er is enige variatie in het belang van de seizoenscomponent als fractie van de totale variantie: deze neemt af met de diepte van het station. Toch is de gelijkenis veel belangrijker dan de verschillen. Verticale herverdeling in diepe stations neemt misschien de rol van sedimentatie/resuspensie in ondiepe stations over, en ook hier moet de zinksnelheid van de deeltjes een belangrijke rol spelen.



De meerjarige trend vertoont variaties over de jaren tussen 50 en 200 % van het langjarige gemiddelde. De patronen van meerjarige trend zijn coherent tussen verschillende stations binnen een watersysteem (bv. Waddenzee), maar er is geen duidelijk verband tussen deze trendpatronen in verschillende watersystemen (bv. tussen Waddenzee en noordelijke Noordzee). Zo is het onduidelijk of, en hoe, meerjarige variatie in zwevend stof in de Noordzee doorwerkt in de concentraties zwevend stof van de Waddenzee. Wij hebben geen duidelijke correlaties kunnen ontdekken tussen deze meerjarige patronen in de Noordzee en bekende antropogene verstoringen. De meerjarige patronen kunnen dus niet worden geïnterpreteerd als het gevolg van verstoringen elders die verhoogde (of verlaagde) concentraties wegtransporteren.

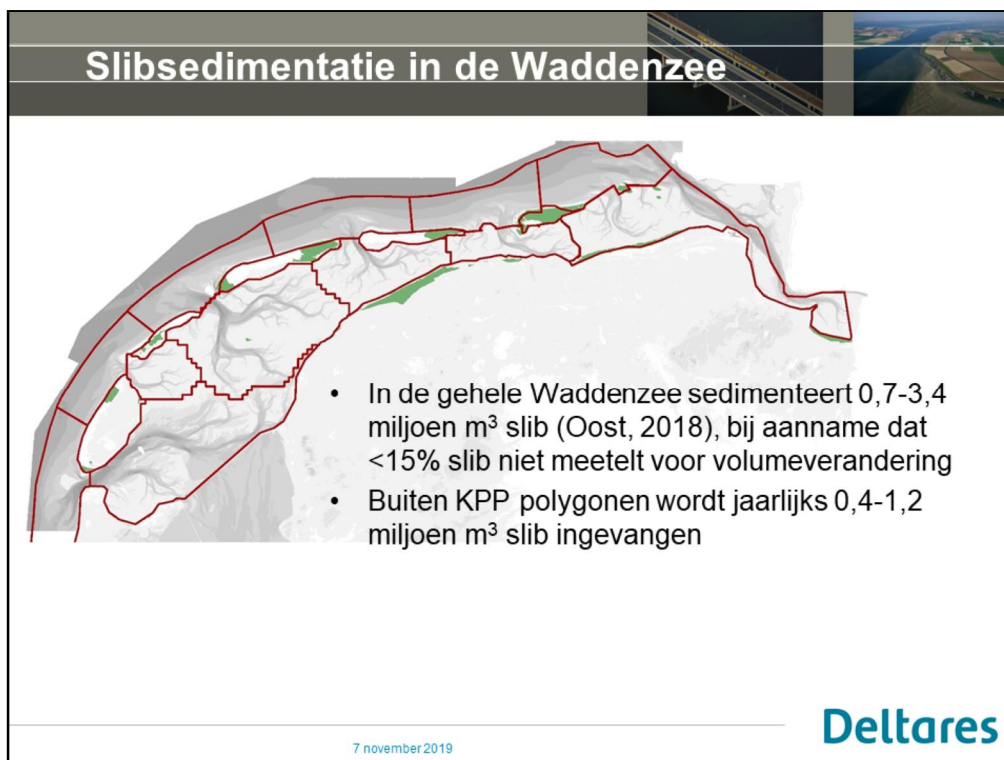
Het feit dat belangrijke meerjarige trends worden gevonden in de tijdseries is consistent met de waarneming dat statistische autocorrelatie in tijdseries groot is (tot langer dan een jaar wordt statistisch significante autocorrelatie gevonden). Dit betekent dat als een waarneming hoger is dan het gemiddelde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

Aangezien de dominante processen van depositie en erosie zich voornamelijk binnen een getij (of een doottij-springtij cyclus) afspelen, en worden bepaald door weerpatronen die ook slechts over korte tijd gecorreleerd zijn, is autocorrelatie van gesuspendeerd materiaal over langere termijn merkwaardig. Het suggereert dat er buffersystemen actief zijn, die ervoor zorgen dat sedimenthoeveelheden die voor resuspensie beschikbaar zijn op een bepaald moment, ook gerelateerd zijn aan de hoeveelheden die voordien in suspensie in de waterkolom aanwezig waren. Deze buffercapaciteit is een eigenschap van de bodem, en zou verband kunnen houden met zowel ecologische als fysische processen in het sediment. Verschillen tussen jaren in weerpatronen of andere factoren zouden de opbouw van deze buffers kunnen beïnvloeden. Dit is bijvoorbeeld eerder aangetoond voor microfytobenthos (zie verder). De belangrijkste conclusie uit deze waarneming is dat er bij de modellering actief moet worden onderzocht welke processen op de mesoschaal (d.i. tussen de springtij-doottij schaal en de seizoenale schaal) voor deze buffering verantwoordelijk kunnen zijn.

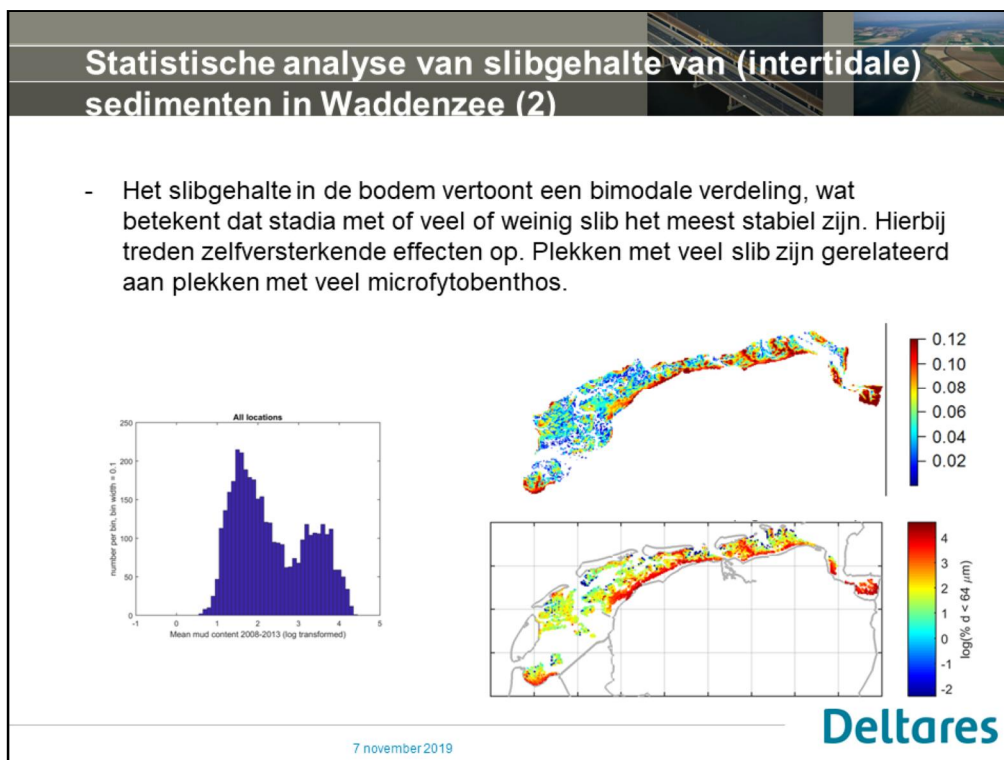


Voor de SIBES dataset, verzameld door NIOZ en beschikbaar gesteld voor dit onderzoek, zijn jaarlijks in de periode 2008-2013 4500 sedimentmonsters genomen in de intertidale zone van de Waddenzee. De horizontale resolutie van de bemonstering is ongeveer 500 m. De dataset laat toe om met hoog oplossend vermogen een analyse uit te voeren van het slibgehalte van het sediment op de wadplaten.

Ruimtelijk patroon van slibverdeling over platen is vergeleken met historische bronnen die een periode van ongeveer 125 jaar beslaan. De oudste bron is de gedeeltelijke kaart van Lely (1892). Achtereenvolgende, ruimtedekkende inventarisaties zijn uitgevoerd door de Glopper (1967, data zijn van de jaren 1950) en Zwarts (2004, data van de jaren 1990). Tussen de verschillende kaarten zijn grote gelijkenissen aangetroffen, maar ook markante verschillen. Deze verschillen hebben te maken met twee factoren. 1<sup>e</sup> en wellicht belangrijkste factor vormen de grootschalige ingrepen in het systeem, zoals de afsluitingen van de Zuiderzee en de Lauwerszee, en de daaropvolgende veranderingen van de wantijen en de getijregimes. In de Westelijke Waddenzee heeft dit geleid tot een tendens van vermindering van het slibgehalte op de platen, en dan vooral op de wantijen. In de Oostelijke Waddenzee zijn er verschuivingen van wantijen, vooral onder Schiermonnikoog. Over het algemeen zijn de wantijen in de Oostelijke Waddenzee bovendien slibbiger geworden. 2<sup>e</sup> factor heeft te maken met de ontwikkelingen langs de vastelandskust van de Waddenzee. De Friese kust rond Harlingen blijkt altijd al slibbige sedimenten te hebben gehad, maar die waren in de 19<sup>e</sup> eeuw subtidaal en zijn sindsdien gedeeltelijk intertidaal geworden. Elders hebben de kwelderwerken veel invloed gehad. De gordel van kwelders langs de vastelandskust is in breedte toegenomen, en ten noorden van deze zone heeft zich een slibbiger zone ontwikkeld. De ontwikkeling van de kwelders als gevolg van de kwelderwerken heeft invloed gehad op de komberging van de kleinere zuidelijke geulen. Door de afname van die komberging is wellicht verdere opslibbing bevorderd. Mogelijk verklaart dit ook het slibbiger worden van de wantijen in de Oostelijke Waddenzee.



- De getallen zijn langjarige gemiddelden (tientallen jaren), waarbij geen exact tijdsbestek is opgegeven. Onderkend is dat de sedimentatiesnelheden in de kwelders fluctueren, maar dit is nog niet verdisconteerd in varianties in de tijd.
- De recent opgeleverde balans van Edwin Elias is een zandbalans. De sink van slib in de kwelders is hierbij niet beschouwd. Voor de slibsedimentatie in de Waddenzee zijn percentages van 0% en 20% gehanteerd.
- De grootste sink in de Waddenzee is de omgeving Vlakte van Oosterbierum – Kimstergat, ten noordoosten van Harlingen. In het verleden was ook de omgeving van de Javaruggen (ten noordwesten van de Afsluitdijk) een belangrijke sink voor slib. Ook het gebied voor de Friese vastelandskust van de Zwarte haan tot Holwerd is een grote sink voor slib, waarbij zowel sedimentatie op de hoge wadplaten als in de kwelders plaatsvindt. Dit geldt ook voor de wadplaten ten oosten van de veerдам bij Holwerd, hoewel de omvang van deze sink kleiner is. Andere belangrijke sinks voor slib zijn de eilandkwelders van Terschelling (Boschplaat)

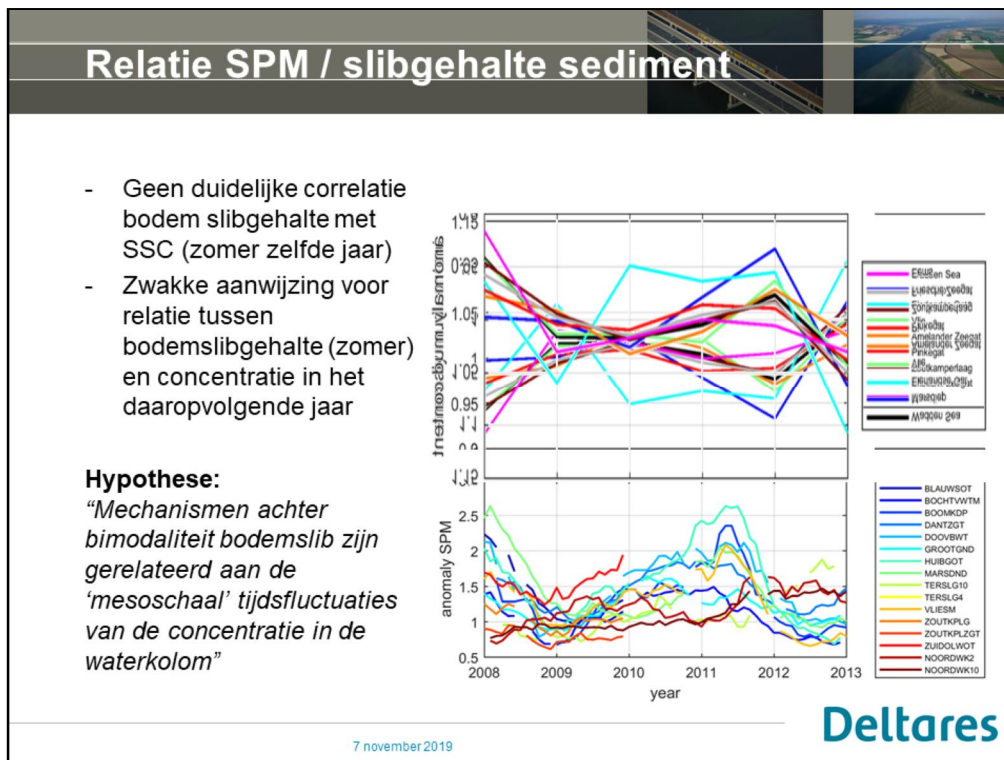


De statistische verdeling van de waarnemingen vertoont een zeer opvallend en relevant kenmerk: een bimodale verdeling. De meeste waarnemingen betreffen ofwel zandige sedimenten met een laag slibgehalte (~5 %) ofwel slibbige sedimenten met een hoog slibgehalte (25-50%), maar er vallen opvallend weinig waarnemingen tussen deze twee modes. Stations die in de hoge of lage mode vallen zijn weinig variabel in de tijd. Stations met intermediaire gemiddelden vertonen de hoogste variabiliteit in de tijd, wat suggereert dat een toestand met intermediair slibgehalte weinig stabiel is, terwijl stations met een hoog of een laag slibgehalte wel stabiel zijn en meestal weinig veranderen.

Zowel ecologische als fysische processen zouden dit kunnen verklaren:

- fysische mechanismen (via bodemruwheid): slibbige bodems zijn gladder, waardoor voor een gelijke stroomsnelheid de bodemschuifspanning afneemt en dus ook de erosie van slib afneemt met toenemend slibgehalte
- Fysisch-ecologische mechanismen (via microfytobenthos, de algen die op het sediment groeien): aanwezigheid MFB wordt bevorderd door slibgehalte, omdat slibbige bodems meer nutriënten bevatten en graas op algen bemoeilijken. Anderzijds verminderen MFB de erodeerbaarheid van slib, waardoor het sediment slibbig zal blijven.

Beide mechanismen sluiten elkaar niet uit, en de huidige gegevens laten ook niet toe om een duidelijke keuze te maken tussen beide verklaringen. Observaties jaarrond zouden beter uitsluitsel kunnen geven, omdat er een duidelijke seizoenscomponent is in de ecologische factor, terwijl dat voor de fysische factor niet het geval is. Helaas beschikken we nu alleen over zomerwaarnemingen.



Er is geen duidelijke correlatie tussen het gemiddelde slibgehalte van het sediment, waargenomen in de zomer, en de concentratie zwevend stof in het betreffende jaar. Er is een zwakke aanwijzing dat een hoog slibgehalte in het sediment tijdens een zomer, correleert met een hoog gehalte zwevende stof in het daaropvolgende jaar, maar de aanwijzingen zijn zwak en laten geen sterke conclusie toe.

Wij stellen als hypothese dat de mechanismen die verantwoordelijk zijn voor de bimodale verdeling van slibgehalte in het sediment, een relatie hebben met de 'mesoschaal' fluctuaties in de tijdseries van het gesuspendeerd materiaal. Deze mechanismen zorgen immers voor het type buffer dat kan verklaren waarom concentraties van gesuspendeerd materiaal zo lang in de tijd kunnen gecorreleerd blijven. We besluiten daaruit dat het van belang is aandacht te besteden aan deze mechanismen, zowel in de data-analyse als in de modellering, omdat hier wellicht een sleutel ligt om de fluctuaties van gesuspendeerd materiaal in de waterkolom beter te begrijpen. In dit document hebben we enige aandacht besteed aan het microfytobenthos, omdat daarvan data voorhanden waren. Het onderzoek van fysische mechanismen kan beter in de context van een model gebeuren.



**Ruimtelijke en temporele verdeling van het microfytobenthos (MFB)**

- Ruimtelijke verdeling microfytobenthos is opvallend sterk gecorreleerd met het slibgehalte van de bodem
- De seizoenale variatie in microfytobenthos en de concentratie zwevende stof zijn (opvallend) omgekeerd gecorreleerd
- Relatie microfytobenthos met meerjarige trend in zwevende stof is onduidelijk
- Meer onderzoek nodig om de hypothese dat bimodaliteit van bodemslibgehaltenes via microfytobenthos zou verlopen verder te toetsen

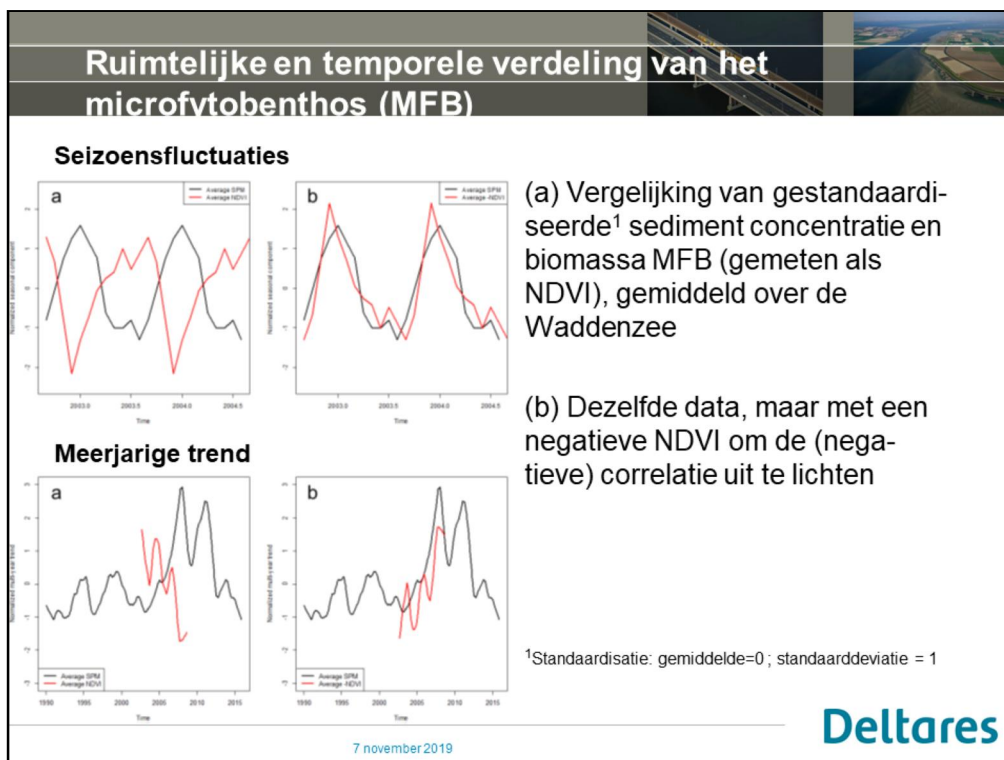
7 november 2019

**Deltares**

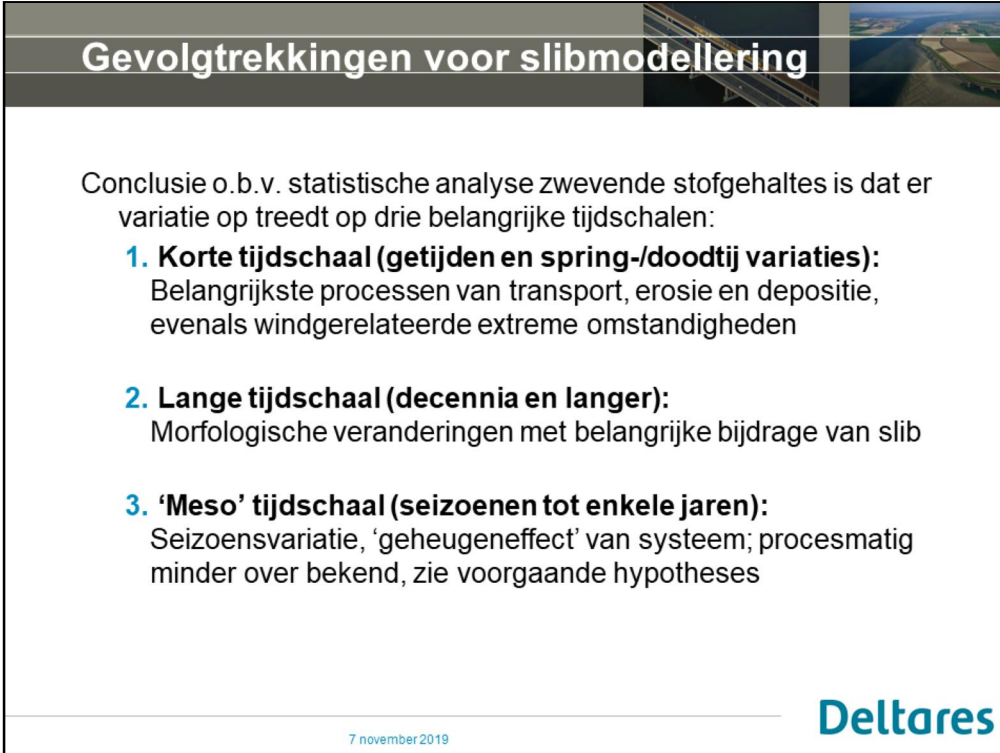
Het microfytobenthos, de algen die op de bodem groeien in de intertidale zone van de Waddenzee, heeft een ruimtelijke verspreiding die opvallend sterk gecorreleerd is met het slibgehalte van het sediment. In de tijd is er een opvallende omgekeerde correlatie tussen microfytobenthos en concentratie zwevende stof, tenminste voor wat betreft de seizoenale variatie. De gegevens over het microfytobenthos laten slecht toe te controleren of er een correlatie is met de meerjarige trend in zwevende stof, al zijn de gegevens ook niet in flagrante tegenspraak met deze hypothese.

De sterke ruimtelijke correlatie tussen slibgehalte van het sediment en biomassa van het microfytobenthos verlenen geloofwaardigheid aan de hypothese dat de bimodaliteit van slibgehaltenes via het microfytobenthos zou kunnen verlopen. Toch zou bijkomend onderzoek nodig zijn om deze hypothese verder te toetsen.





1. Vergelijking van de gestandaardiseerde (gemiddeld = 0; standaarddeviatie = 1) seizoenscomponent van de biomassa microfytobenthos gemeten als NDVI, gemiddeld over de Waddenzee (Van der Wal *et al*, 2010) en de seizoenscomponent van het gemiddelde SPM over de Waddenzee (alle tijdreeksen behalve Vliestroom, Zuidkamperlaag en Zuidkamperlaag Zeegat). In (b) is dezelfde data te zien, maar met een negatieve NDVI om de (negatieve) correlatie uit te lichten.
2. Vergelijking van de gestandaardiseerde trendcomponent van de biomassa microfytobenthos gemeten als NDVI, gemiddeld over de Waddenzee (Van der Wal *et al*, 2010) and de trendcomponent van het gemiddelde SPM over de Waddenzee (alle tijdreeksen behalve Vliestroom, Zuidkamperlaag en Zuidkamperlaag Zeegat). In (b) is dezelfde data te zien, maar met een negatieve NDVI om de (negatieve) correlatie uit te lichten.



## Gevolgtrekkingen voor slibmodellering

Conclusie o.b.v. statistische analyse zwevende stofgehaltenes is dat er variatie op treedt op drie belangrijke tijdschalen:

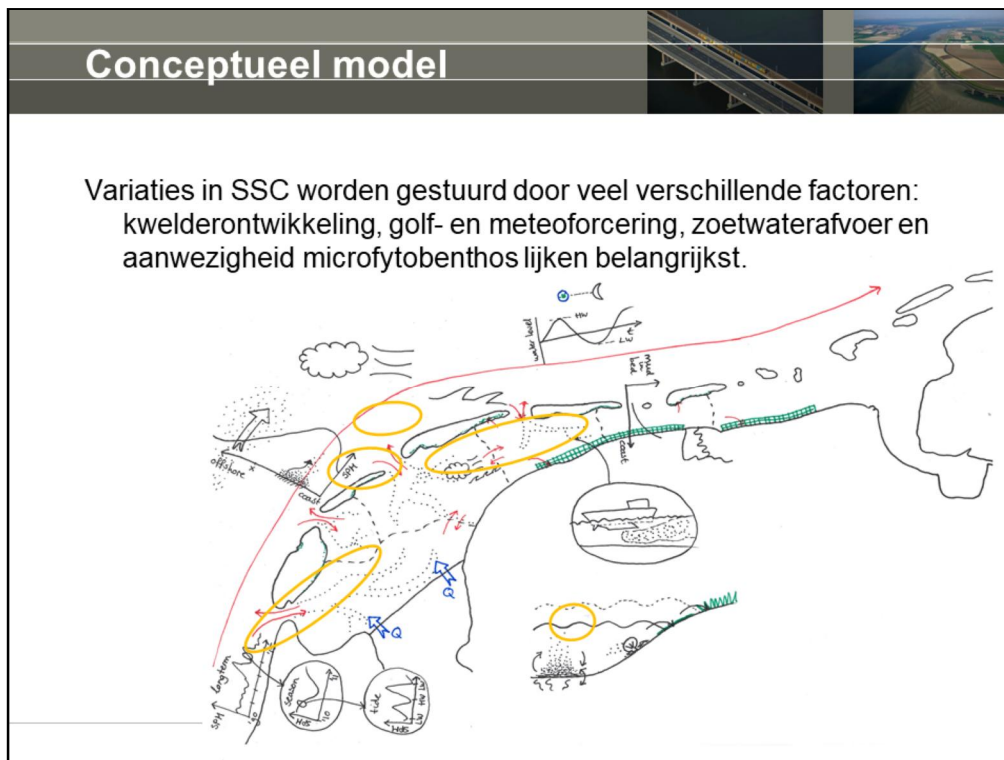
- 1. Korte tijdschaal (getijden en spring-/doodtij variaties):**  
Belangrijkste processen van transport, erosie en depositie, evenals windgerelateerde extreme omstandigheden
- 2. Lange tijdschaal (decennia en langer):**  
Morfologische veranderingen met belangrijke bijdrage van slib
- 3. 'Meso' tijdschaal (seizoenen tot enkele jaren):**  
Seizoensvariatie, 'geheugeneffect' van systeem; procesmatig minder over bekend, zie voorgaande hypothesen

**Deltares**

7 november 2019

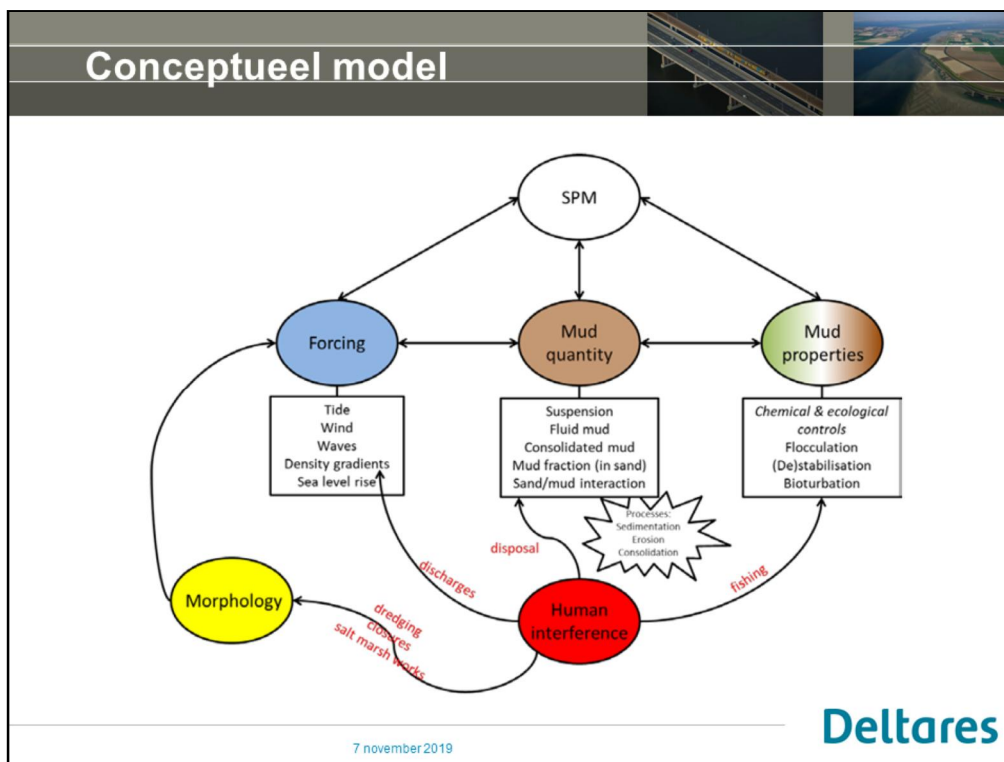
Conclusie uit statistische analyse van zwevende stofgehaltenes in MWTL meetstations: variatie op drie belangrijke tijdschalen. Op korte tijdschaal (getijden en spring/doodtij variaties; weliswaar niet gevangen door de MWTL metingen) vinden de belangrijkste processen van transport, erosie en depositie plaats. Ook windgerelateerde extreme omstandigheden spelen zich af op deze tijdschaal. De lange tijdschaal (decennia en langer), waarin morfologische ontwikkelingen gebeuren waarin slib een significante rol speelt. Tussen beide in speelt echter nog een derde tijdschaal, de mesoschaal, die loopt van seizoensvariatie tot enkele jaren. Wij hebben aangetoond dat er aanzienlijke variatie in de tijdseries van zwevend stof voorkomen op deze schaal. Het is de schaal waarin het 'geheugen' van het systeem resulteert in aanzienlijke (factor 2) variaties van jaar tot jaar en van seizoen tot seizoen. In vergelijking met de korte tijdschaal is het procesmatig inzicht in de belangrijkste processen op deze tijdschaal minder goed ontwikkeld. We stelden de hypothese dat microfytobenthos mogelijk een belangrijke rol speelt in variaties op deze tijdschaal, maar we kunnen niet uitsluiten dat eerder fysische processen zorgen voor een aantal positieve feedbacks waardoor het systeem als geheel tussen meerdere toestanden kan variëren. We relateren de bimodale verdeling van slibgehaltenes in het sediment met variaties en stabiliteit van de dynamiek op deze mesoschaal. Wellicht is er een verband met weerpatronen, maar dit moeten we in een vervolg nader onderzoeken.

Voor de Noordzeestations vonden we ook belangrijke schommelingen in zwevend stof op de mesoschaal. Onduidelijk waarom schommelingen binnen deelsystemen (bv. binnen de Waddenzee) onderling gecorreleerd zijn, maar tussen systemen (bv. Waddenzee - Noordzee) weinig samenhang vertonen. Ook onverklaard waarom seizoenale component in alle tijdseries gelijk is qua fase en amplitude. Nadere studie van verticaal gedrag van zwevend stof in waterkolom zou kunnen bijdragen aan beter begrip.



Onze studie heeft geresulteerd in een conceptueel model (zie figuren op deze en de volgende slide) met drie tijdschalen (kort, middel en lang) en drie invloedsfactoren (hoeveelheid slib, slibeigenschappen en hydrodynamica) voor de slibdynamiek:

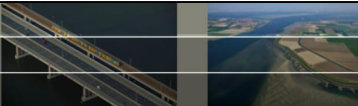
- Op de korte tijdschaal (uren tot dagen) wordt de slibdynamiek gedomineerd door de hydrodynamica gegeven de aanwezige hoeveelheid slib en de eigenschappen hiervan.
- Op de middellange tijdschaal (weken tot enkele jaren) kunnen de hoeveelheid en eigenschappen van slib gaan variëren door fysische en biologische invloeden en hierdoor neemt de complexiteit toe.
- Op de lange tijdschaal (vele jaren) komt hier nog de interactie met morfologische ontwikkeling bij.



Onze studie heeft geresulteerd in een conceptueel model (zie figuren op de vorige en deze slide) met drie tijdschalen (kort, middel en lang) en drie invloedsfactoren (hoeveelheid slib, slibeigenschappen en hydrodynamica) voor de slibdynamiek:


- Op de korte tijdschaal (uren tot dagen) wordt de slibdynamiek gedomineerd door de hydrodynamica gegeven de aanwezige hoeveelheid slib en de eigenschappen hiervan.
- Op de middellange tijdschaal (weken tot enkele jaren) kunnen de hoeveelheid en eigenschappen van slib gaan variëren door fysische en biologische invloeden en hierdoor neemt de complexiteit toe.
- Op de lange tijdschaal (vele jaren) komt hier nog de interactie met morfologische ontwikkeling bij.

**Conclusie (1/3)**



Hoofdvraag:  
*“Hoe worden concentratie van slib in waterkolom en slibpercentage in bodem van Waddenzee bepaald door menselijke en natuurlijke processen?”*

→ Variaties in zwevend stofgehalte in de waterkolom en slibgehalte in de bodem worden gestuurd door interactie tussen veel verschillende factoren, onderscheid in tijdschalen (kort, middel, lang) en invloedsfactoren (hoeveelheid slib, slibeigenschappen en hydrodynamica)


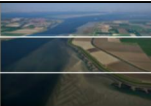


7 november 2019

Terugkomend op de hoofdvraag van deze studie wordt geconcludeerd dat de slibconcentratie in de waterkolom en de slibfractie in de bodem wordt bepaald door de interactie van deze invloedsfactoren op verschillende tijdschalen. De verblijftijd van slib in de Waddenzee bepaalt op welke tijdschaal de hoeveelheid slib wezenlijk varieert en deze verblijftijd is vermoedelijk meerdere jaren. De analyse van de toestand van de Waddenzee m.b.t. slibdynamiek en de implicaties voor KRW-doelen moet tenminste op deze tijdschaal plaatsvinden. Het belang van slib voor ecologische doelen is in dit rapport nog niet verder uitgewerkt, maar lichtklimaat en bodemsamenstelling zijn in ieder geval twee belangrijke koppelingen. Wat betreft beheer-strategieën moeten deze aangrijpen op een of meer van de drie invloedsfactoren. Denk hierbij aan alternatieve spuisceario's, alternatieve stortstrategieën voor baggerspecie of het onttrekken of vastleggen van slib d.m.v. luwtezones en bio-bouwers.


We hebben in deze studie geen aandacht besteed aan effecten van slib, zowel SPM als slibgehalte in het sediment, op ecologische processen. Dat is uiteraard een belangrijk deel van de studie als geheel, maar moet nog nader worden ingevuld.

**Conclusie (2/3)**

Conclusies t.a.v. subvragen:

- De verblijftijd van slib in de Waddenzee bepaalt op welke tijdschaal de hoeveelheid slib wezenlijk varieert en deze verblijftijd is vermoedelijk meerdere jaren. De analyse van de toestand van de Waddenzee m.b.t. slibdynamiek en de implicaties voor KRW-doelen moet tenminste op deze tijdschaal plaatsvinden.
- Het belang van slib voor ecologische doelen is in het rapport nog niet verder uitgewerkt, maar lichtklimaat en bodemsamenstelling zijn in ieder geval twee belangrijke koppelingen.
- Wat betreft beheerstrategieën moeten deze aangrijpen op een of meer van de drie invloedsfactoren. Denk hierbij aan alternatieve spuiscenari'o's, alternatieve stortstrategieën voor baggerspecie of het onttrekken of vastleggen van slib d.m.v. luwtezones en bio-bouwers.
- Geen duidelijk causaal verband tussen trends in zwevend stofgehalte van Noordzee en Waddenzee. Wel samenhang binnen afzonderlijke systemen

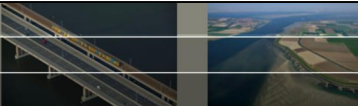
7 november 2019


Vier subvragen, waarin gekeken werd naar:


- dominante factoren voor slibdynamiek in Waddenzee en relatie met deze factoren in Noordzee
- verblijftijd van slib in Waddenzee en systeemrespons op pulsen in slibtoevoer
- belang van ecologische functies van Waddenzee
- aangepaste beheerstrategieën voor slib en kustlijnontwikkeling, die leiden tot optimalisatie van ecologische kwaliteit van system

We hebben geen duidelijk causaal verband kunnen aantonen tussen trends in het SPM van de Noordzee, en trends in de Waddenzee. Binnen beide systemen is er wel samenhang, wat suggereert dat er ruimtelijk grootschalige fenomenen aan ten grondslag liggen, maar tussen beide systemen zijn de fluctuaties verschillend. We vonden ook geen duidelijk verband met gedocumenteerde slibbronnen zoals zandwinning, storten van havenslib en dergelijke. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen of dit binnen het systeem van de Waddenzee ook geldt, maar voorlopig zijn ook hier geen voor de hand liggende aanwijzingen voor directe menselijke invloed gevonden.

**Conclusie (3/3)**



- Slib speelt belangrijke rol in morfologische processen in de Waddenzee op langere termijn
  - Bimodale verdeling slibgehalte in de bodem
  - (Voor hoge slibgehalten) aanzienlijke bijdrage aan totale sedimentvolume
  - Ruimtelijk andere afzettingspatronen dan zand
  - Slibafzettingen bij vastelandskust hebben vanwege reductie komberging effect op aangrenzende zone van Waddenzee en wellicht op wantijen
- Belang van 'meso'-tijdschaal in slibdynamiek
  - 'geheugen' van systeem langer dan verwacht o.b.v. getijdendynamiek
  - bepaald door belangrijke buffers, mogelijk via fysisch-ecologische interactie en beïnvloed door relatief grootschalige processen (bijv. het weer)
  - Beter begrip 'meso'-tijdschaal van belang bij analyseren van meerjarige trendcomponenten

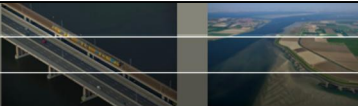


7 november 2019


In meer detail heeft onze studie aangetoond dat slib een belangrijke rol speelt in de morfologische processen op langere termijn in de Waddenzee. In sedimenten met relatief hoog slibgehalte draagt slib aanzienlijk bij tot het totale sedimentvolume. De tweedeling in de sedimenttypes (m.b.t. slibgehalte) suggereert dat hiervoor alleen de tweede, hogere, mode van de distributie echt van belang is. Dat betreft echter tientallen procenten van het totale intertidale areaal van de Waddenzee (waarbij rekening moet gehouden worden met het feit dat kwelders niet zijn bemonsterd in SIBES). Slibsedimenten zetten zich op andere plaatsen af dan zand, en ook om die reden is het meenemen van slib in de morfologische evolutie op langere termijn van groot belang. Onze resultaten suggereren dat slibafzettingen bij de vastelandskust, deels als gevolg van kwelderwerken, ook een uitstralend effect hebben op de aangrenzende zone van de Waddenzee en wellicht op de wantijen, omdat zij komberging reduceren en daardoor via de hydrodynamiek weer de dynamiek van slib verder beïnvloeden.

Ons onderzoek heeft verder het belang aangetoond van de mesoschaal in de slibdynamiek, tussen de tijdschaal van het getij en die van de langjarige morfodynamiek. Het systeem beschikt over aanzienlijk langer geheugen, bv. in de SPM concentraties, dan op basis van getijdendynamiek zou verwacht worden. Wij suggereren dat belangrijke buffers, misschien via fysisch-ecologische interactie en beïnvloed door relatief grootschalige processen als het weer, deze mesoschaal dynamiek bepalen. Het beter begrijpen van deze dynamiek is noodzakelijk als men de meerjarige trendcomponenten beter wil evalueren op hun belang voor het beleid.

Aanbevelingen (1/2)



- Uit te voeren observaties t.b.v. inzicht in slibdynamiek in Noordzee & Waddenzee (*werkzaamheden 2019-2020*):
  - Naast zwevend stof aan oppervlakte ook routinematig verticale profielen in samenhang met CTD opnames maken
  - Een aantal permanente meetstations in Noordzee en Waddenzee installeren die over langere periodes verticale verdeling van zwevend stofgehalte monitoren
  - Analyse gegevens microfytobenthos uitbreiden voor periode 2008-2018
  - Vervolg SIBES programma: slibgehalte bemeten met hogere temporele resolutie (maandelijks) in een aantal stations
- Huidige analyse aanscherpen (*werkzaamheden 2019-2020*):
  - Verdieping van analyse historische kaarten bodemslibgehalte
  - Beter gebruikmaken van permanente meetstations met hoge resolutie t.b.v. inzicht op korte en 'meso' tijdschalen



7 november 2019

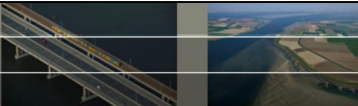
Wij bevelen aan om een aantal observaties uit te voeren die kunnen helpen om een beter inzicht te verwerven in de dynamiek van slib in de Noordzee en Waddenzee:

- routinematig niet alleen zwevend stof meten aan de oppervlakte, maar ook verticale profielen in samenhang met CTD opnames maken. Dit zou een relatief beperkte uitbreiding van MWTL kunnen vormen.
- een aantal permanente meetstations installeren in Noordzee en Waddenzee die over langere periodes de verticale verdeling van zwevende stof monitoren, en in verband brengen met stroomsnelheden en golfactiviteit.
- de beschikbare gegevens over microfytobenthos uitbreiden voor de periode 2008- 2018. Dit kan gebruikmaken van bekende en uitgeteste methodologie.
- In een aantal stations van het SIBES programma met hogere temporele resolutie (maandelijks) het slibgehalte van het sediment opvolgen.


Daarnaast bevelen wij aan de huidige analyse op een aantal kritische punten nader aan te scherpen. De analyse van oude kaarten van slibgehalte van de bodem kan worden geformaliseerd in GIS en in groter detail methodologisch worden gekalibreerd. Beter gebruik maken van permanente meetstations met hoge resolutie, bv. in het kader van SEAWAD, zou het inzicht in processen op relatief korte termijn kunnen bevorderen, maar zou ook kunnen leiden tot inzicht in processen op de mesoschaal. Op de langere termijn bevelen wij aan nader te onderzoeken en te kwantificeren welke invloed de 'kwelderwerken' hebben gehad op morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee.



## Aanbevelingen (2/2)



- Het gebruik van numerieke modellen:
  - Het bestaande modelinstrumentarium kritisch onderzoeken en aanpassen om genoemde statistische patronen in waarnemingen te reproduceren. Hiervoor wordt een nieuw numeriek model opgezet (*werkzaamheden 2019-2020*), bestaande uit:
    - Hydrodynamisch model
    - Geschematiseerd model
    - 3D Slibmodel Waddenzee
  - Een morfologisch model maken voor evolutie op lange termijn (incl. zand-slib interactie) om veranderingen in Waddenzee, vooral langs vastelandskust, te voorspellen. (*werkzaamheden nog niet ingepland*)
  - Daarnaast kan het nieuwe model gebruikt worden om het effect van historische ingrepen te hindcasten (*werkzaamheden nog niet ingepland*)

7 november 2019


Tenslotte bevelen wij aan om het bestaande modelinstrumentarium kritisch te onderzoeken op het vermogen om de gesignaleerde statistische patronen in de waarnemingen te reproduceren, en waar nodig aan te passen. Wij zijn van mening dat modelformuleringen op de mesoschaal noodzakelijk zijn, en dat deze testbaar moeten worden gemaakt in een vereenvoudigde ruimtelijke set-up, zodat de gevoeligheid van het model gemakkelijk kan worden onderzocht zonder beperkende rekestijden. Tenslotte bevelen wij aan een morfologisch model voor evolutie op de lange termijn te maken dat rekening houdt met de zand-slib interactie en daardoor beter in staat is de veranderingen in de Waddenzee, vooral langs de vastelandskust, te voorspellen.