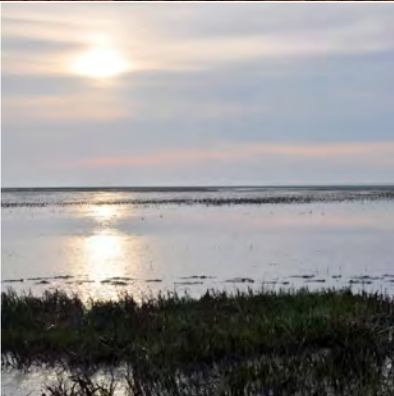


Slib en primaire productie in het Eems-estuarium

*Een samenvatting van vier jaar
meten, modelleren, kennis bundelen
en verwerven*





COLOFON

Dit rapport is een gezamenlijk product van Deltares, Imares en Rijkswaterstaat

Auteurs:

Taal, M.D.; Schmidt, C.A.; Brinkman, A.G.; Stolte, W.; Van Maren, D.S.

Met dank aan:

de Jonge, V.N.; Mulder, H.P.J.; Bot, P; Baptist, M.; Los, F.J.; Schuttelaars, H.M.;
Grasmeijer, B.; As, D; Hoijtink, R.;

Foto's:

beeldbank.rws.nl; blz. 2, 4 en 20
M. Taal; omslag, blz.4, 6, 10, 12, 30, 31 en 32
L. van Duren; blz. 16, 25, 26 en 41
B. Brinkman; blz.15, 35 en 42

Vormgeving:

W. Jilderda, Deltares

December, 2015

Slib en primaire productie in het Eems-estuarium

Een samenvatting van vier jaar meten, modelleren, kennis bundelen en verwerven

Inhoud

Voorwoord	5
1 Inleiding	6
2 Waargenomen veranderingen in de troebelheid	12
3 De gevolgen van troebelheid voor de primaire productie	16
4 Invloed van getij en stromingen op troebelheid	26
5 Invloed van slibaanbod op de troebelheid	32
6 Conclusies en perspectieven	36



Voorwoord

In het grensoverschrijdende Eems-estuarium moeten veel belangen worden verenigd. Economische belangen, waaronder de bereikbaarheid van de Eemshaven en de havens van Delfzijl, Emden en Papenburg, en het achterland moeten samen gaan met ecologische waarden. Deze ecologische waarden worden onder andere beschermd via Natura 2000, Unesco Werelderfgoed en Kaderrichtlijn Water (KRW). Nederland en Duitsland willen een ecologische en een economische impuls geven aan de hele Eems-regio. Hiervoor worden samen plannen gemaakt in het Integraal Managementplan Eems (IMP). In Nederland wordt hieraan gewerkt via de Samenwerkingsovereenkomst Ecologie en Economie in Balans in de Eemsdelta (E&E). De bescherming via de Europese Kaderrichtlijn Water verplicht Nederland ertoe ervoor zorg te dragen dat de chemische en ecologische waterkwaliteit uiterlijk in 2027 goed moet zijn. Om dit te bereiken heeft het ministerie van Infrastructuur en Milieu een maatregelenprogramma opgesteld.

Vertroebeling vormt waarschijnlijk een belangrijke belemmering voor hogere natuurwaarden in en voor de draagkracht van het estuarium. Om die redenen heeft Rijkswaterstaat in 2010 opdracht gegeven aan Deltares en Imares om een verkennend onderzoek te doen naar de slibhuishouding in het Eems-estuarium, waarbij de relatie van slib met de primaire voedselproductie (primaire productie door algen in de waterkolom en op de droogvallende platen) wordt aangegeven. Rijkswaterstaat, als beheerder van het Nederlandse deel van het estuarium, wil zo meer inzicht verkrijgen in de dynamiek van water en slib en wat dit betekent voor de troebelheid en vervolgens voor de algenproductie. Vanuit dat inzicht wil Rijkswaterstaat effectieve oplossingsrichtingen kunnen formuleren. Het voorliggende verkennende onderzoek is daarom opgebouwd uit een bundeling van literatuur, veldmetingen aan slib en algenproductie, en uit een uitgebreide modelstudie om historische en nieuwe metingen beter te kunnen interpreteren in tijd en ruimte en om kwantitatieve uitspraken te kunnen doen. Het geheel is vervolgens ingebed in wat er over het systeem al bekend is (kennisbundeling). Het onderzoek is begeleid door een expertteam en besproken met een breed samengestelde klankbordgroep.

De samenvatting die voor u ligt, geeft de belangrijkste resultaten van dit verkennende onderzoek weer en geeft inzicht in de werking van het estuarium, met de nadruk op het Nederlandse deel. Zo is vastgesteld dat de troebelheid inderdaad is toegenomen, in de Dollard veel meer dan bij Borkum, en dat er verschillende ingrepen en processen zijn die hieraan hebben bijgedragen. Nieuw is het inzicht dat de eeuwenlange sedimentatie die op de platen en kwelders plaatsvond sterk is afgenomen. Ook kunnen we concluderen dat met bepaalde maatregelen de troebelheid gereduceerd kan worden. Het effect van de vertroebeling op de voedselproductie voor dieren, zoals wormen, schelpdieren, vissen, vogels en zeezoogdieren, is echter nog niet vastgesteld, daarvoor is ander onderzoek nodig. In 2016 start de tweede ronde KRW-maatregelen. Rijkswaterstaat wil daarin verder inzetten op het functioneren van het estuarium, met verdiepend onderzoek naar de slibhuishouding, en onderzoek naar structurele maatregelen in het gebied waarmee het slibgehalte kan worden gereduceerd.

Ik ben verheugd u deze rapportage te kunnen voorleggen, zodat iedereen die belangstelling heeft voor het prachtige en unieke Eems-estuarium meegenomen wordt in de kennisontwikkeling, geïnitieerd door Rijkswaterstaat, ten behoeve van een goede ecologische en economische status van dit gebied.

*Sieben Poel
HID Rijkswaterstaat Noord-Nederland
December 2015*

01. Inleiding



De opgave in het Eems-estuarium

Het Eems-estuarium (Figuur 1) bestaat uit de getijdenrivier de Eems, verlengd met het Vaarwater naar Emden (Emder Fahrwasser), de Dollard en het mondingsgebied. De vorm van het estuarium is klassiek trechtervormig en is gelegen tussen de eilanden Rottumeroog en Borkum en een eeuwenoud inbraakgebied (Dollard). In de Eemsrivier bevindt zich bij Herbrum op ongeveer 100 km vanaf de zee een stuw die het getij stopt. Het estuarium is een complex systeem, onder andere vanwege de Dollard die met zoetwater wordt gevoed vanuit de Westerwoldsche Aa. De Dollard ontstond tussen de dertiende en de zestiende eeuw ten gevolge van een reeks stormvloed. Door inpolderingen resteert hiervan nog ongeveer 100 km². Het gehele estuarium wordt onderverdeeld in Buitengebied, Middengebied, Dollard en getijdenrivier.

De ecologische kwaliteit van het estuarium staat al heel lang onder druk. Nederland en Duitsland staan voor de opgave om samen de ecologie en economie in en rond het hele Eems-estuarium te verbeteren. Het gebied dient te voldoen aan de normen en doelstellingen die zijn vastgelegd in diverse EU-

richtlijnen (Natura2000 en de Kaderrichtlijn Water). Hier bovenop zijn er verdergaande regionale ambities, zoals in het traject 'Ecologie en Economie in Balans; naar een vitale Eemsdelta'.

De ecologische waarde van het gebied wordt gekenmerkt door de dichtheid en de diversiteit van de voorkomende organismen, waaronder algen, zoöplankton, wormen, schelpdieren, vissen, vogels en zeezoogdieren. Al die verschillende organismen functioneren samenhangend in een complex voedselweb. Het basisvoedsel wordt geproduceerd door de algen die leven op en in de sedimenten van de drogvallende platen (microfyto-benthos) en in de waterkolom (fytoplankton). Deze organismen zijn daarmee cruciaal voor de voedsel-piramide. De productie van het basisvoedsel is vooral afhankelijk van de beschikbaarheid van licht en van de stoffen fosfaat, silicaat en stikstof. Hoeveel organismen een gebied kan herbergen wordt samengevat onder het begrip draagkracht. Om de draagkracht te kunnen verbeteren, is inzicht nodig in de samenhang tussen lichtbeschikbaarheid in de waterkolom, nutriënten en algenproductie. In het Eems-estuarium worden de lichtcondities sterk beïnvloed door de slibconcentraties in het water. Deze variëren sterk in de tijd en in de ruimte.

De ecologische kwaliteit van het estuarium staat al lang onder druk. Nederland en Duitsland staan voor de opgave om samen de ecologie en economie in en rond het hele Eems-estuarium te verbeteren. De groei van de algen (het basisvoedsel) is vooral afhankelijk van de beschikbaarheid van licht en nutriënten. De lichtcondities worden sterk beïnvloed door de slibconcentraties in het water.



Figuur 1: Het Eems estuarium. Het 'Buitengebied', vanaf ongeveer Eemshaven zeewaarts, kent diepe getijdengeulen en vanwege de omvang van het gebied ook uitgestrekte droogvallende zand- en sliplaten. Het 'Middengebied' wordt gekarakteriseerd door een grote slibbige zandplaat (Hond-Paap), zeer slijkrijke plaatranden langs de kusten en de geulen Oostfriesche Gaatje en Bocht van Watum. Dan is er de 'Dollard' een oud inbraakgebied met uitgestrekte slikken, en een grote slibbige zandplaat (Heringsplaat) in het noordelijk deel en brede kwelders langs de zuidelijke en oostelijke randen. Meer dan 80% van de Dollard valt bij laagwater droog. Het gebied wordt doorsneden door ondiepe geulen. Aan de noordzijde van de Dollard ligt, achter een geleidedam (Geise Leitdamm), het Vaarwater naar Emden (Emder Fahrwasser) dat aansluit op de getijdenrivier van de Eems. De rivier de Eems en het Vaarwater naar Emden worden in dit document besproken voor zover het relevant is voor de slibhuishouding van het estuarium.





Ingrepen in het estuarium hebben meestal invloed op waterstromingen en daarmee op opwerveling en transport van slib, en beïnvloeden zo de slibconcentraties in de waterkolom. Via het effect op de lichtcondities, de primaire productie heeft dit invloed op de draagkracht en de ecologische kwaliteit van het gebied.

Rijkswaterstaat heeft daarom, voortbouwend op het onderzoek dat in het verleden is uitgevoerd, de afgelopen 4 jaar verkennend onderzoek laten uitvoeren, gericht op de volgende vragen:

- 1 Is de vertroebeling in het Eems-estuarium in de afgelopen decennia toegenomen?
- 2 Indien ja: waar komt dit door?
- 3 Wat betekent die vertroebeling in potentie voor de natuurwaarden en de algenproductie?
- 4 En, wat zouden we er aan kunnen doen?

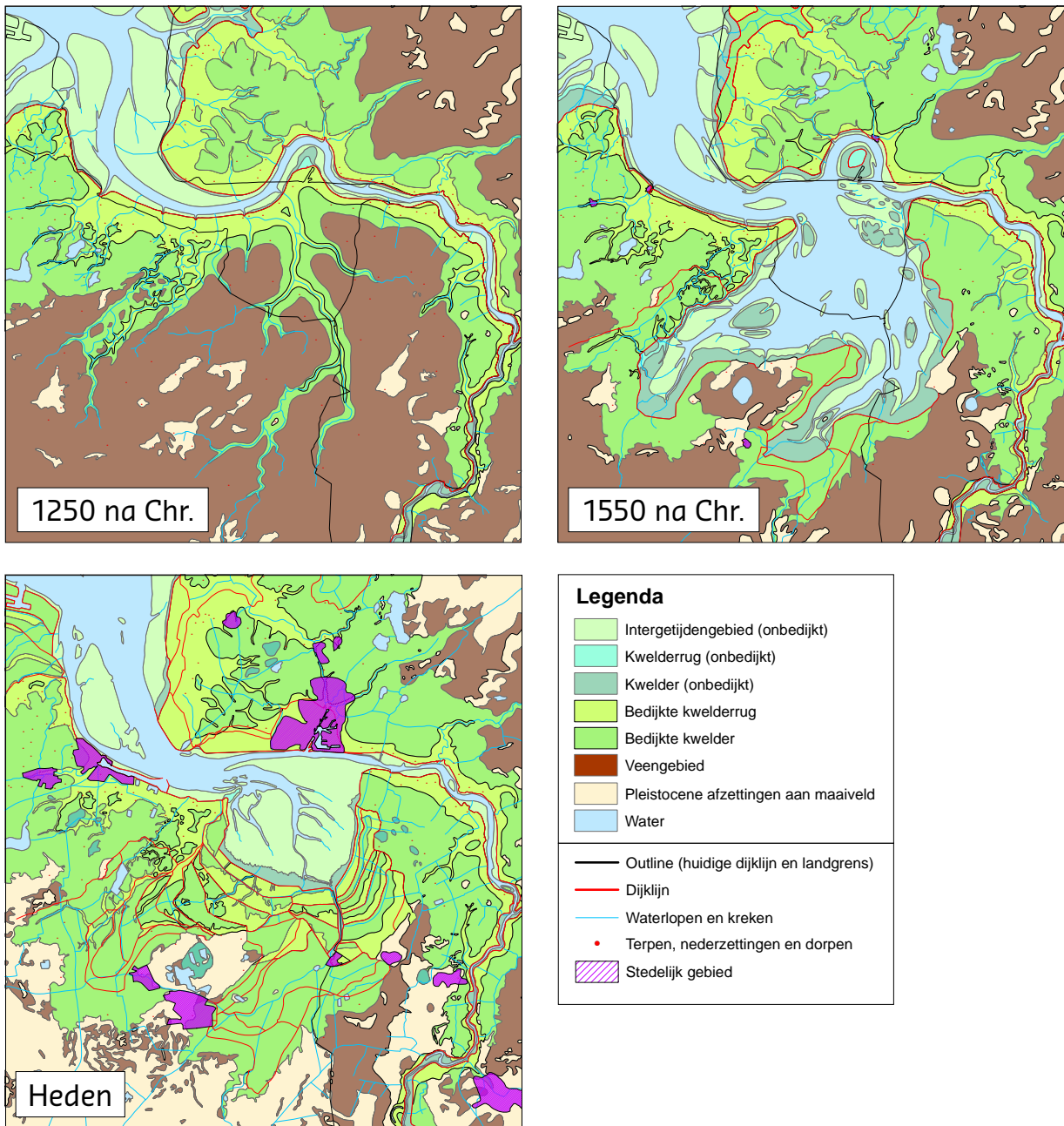
Mogelijke oorzaken van de eventuele toegenomen vertroebeling zijn:

- De inpoldering van delen van het estuarium inclusief de Dollard verkleinden de ruimte voor het bezinken van slib (Stratingh & Venema, 1855; Herrling & Niemeyer, 2008).
- De verandering van het tweegeulensysteem naar een enkelvoudig geulsysteem in de laatste eeuw; (onder meer van Veen, 1950).
- Vaarwegverruiming in het estuarium en in de rivier de Eems veroorzaakten andere klein- en grootschalige waterstromingen, veranderingen in de erosie en sedimentatie van slib in het systeem en daarmee een verhoging van de slibconcentraties (de Jonge, 1983, 2000; Schuttelaars et al., 2013, de Jonge et al., 2014, van Maren et al., 2015A,B).
- De aanleg en het onderhoud van havens en het verspreiden van baggerspecie veranderden de slibconcentratie indirect via een buiten het systeem veranderd aanbod (de Jonge et al., 2014) of direct door lokale stortingen (van Maren et al., 2015A).

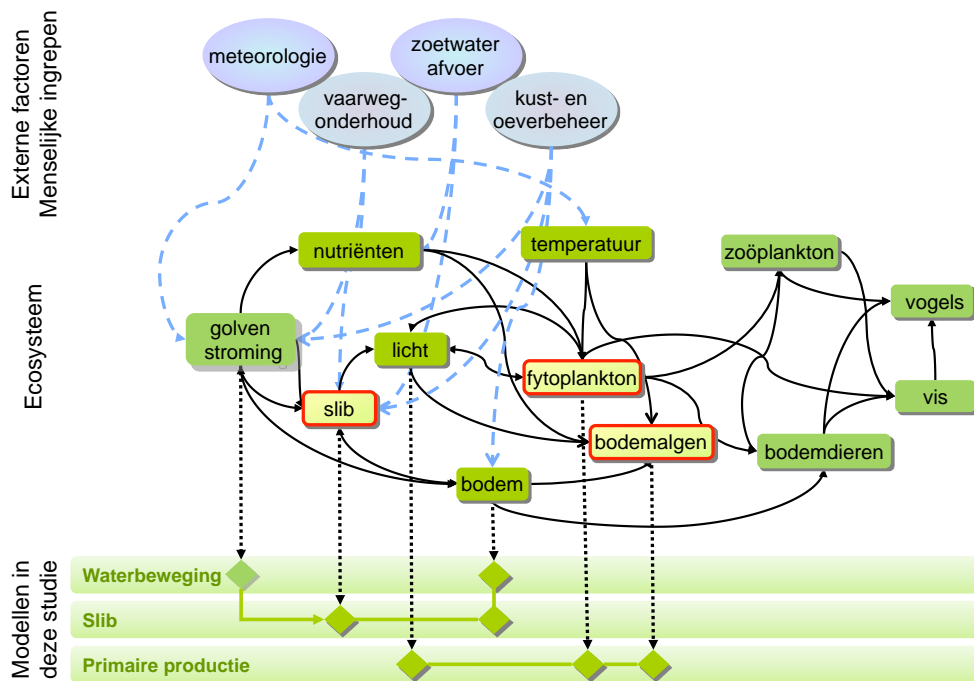
- De concentraties (en slibtransporten) in de Waddenzee en/of de Noordzee zijn mogelijk veranderd, waardoor die in het estuarium ook veranderden (de Jonge et al., 2014, van Maren et al., 2015A).

Historisch perspectief

Voor begrip van de slibhuishouding is de langjarige evolutie van het Eems-estuarium belangrijk. Het Eems-estuarium is in de vier eeuwen na 1250 (Figuur 2), door de vele doorbraken ten gevolge van veenwinning voor zout en brandstof en slecht dijkonderhoud, sterk veranderd. Vanaf 1650 zijn grote delen van het gebied weer teruggewonnen en is de wateroppervlakte steeds verder ingeperkt. Een reconstructie van een deel van het Eems-estuarium in de 16e eeuw (Figuur 2) toont een uitgestrekt laaggelegen gebied. Tijdens elke vloed werden toen, en in de eeuwen erna, grote gebieden overstroomd met slibrijk zeewater. Veel van dat fijne materiaal kon bezinken. De meest landwaarts gelegen delen slibden het hoogst op en werden dus ook als eerste ingepolderd om weer te kunnen worden gebruikt als landbouwgebied. Aan Nederlandse zijde werd in 1924 de laatste polder gerealiseerd. Daarmee kreeg de Dollard de vorm die het nog steeds heeft. In al die eeuwen leidden de grote hoeveelheden slib die bezonken zeer waarschijnlijk tot lagere slibconcentraties in het estuarium dan tegenwoordig. Hoe de slibconcentraties waren rond het huidige Dollardgebied en het gebied rond Emden vóór de grote overstromingen tussen 1350 en 1650 is niet te achterhalen. Door de vele ingrepen langs de Nederlandse kust, zoals de afsluiting van de Zuiderzee in 1932, de Lauwerszee in 1969 en in het zuidwesten van het land de Delta-werken, zijn inmiddels vele bezinkplaatsen langs de gehele kustlijn verdwenen.



Figuur 2: Een deel van het Eems-estuarium, zoals dat was omstreeks 1250, 1550 en nu (P. Vos, 2013)

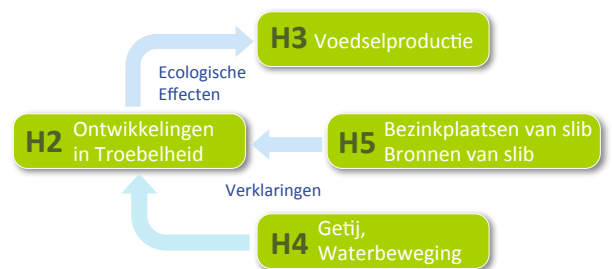


Figuur 3: De inhoudelijke relaties tussen waterbeweging, slib, licht, algen (primaire productie) en andere trofische niveaus.

De aanpak en leeswijzer

Het onderzoek bestond uit een analyse van bestaande literatuur, bestaande meetgegevens, nieuwe veldmetingen en het opzetten van een modelketen waarin de belangrijkste processen kunnen worden nagebootst. Deze modelketen berekent de beweging van het water, het gedrag van het slib en de gevolgen ervan voor de primaire voedselproductie (Figuur 3). Zo zijn, binnen de mogelijkheden die deze modellen bieden, de omvang, mogelijke oorzaken en effecten van vertroebeling in het estuarium bestudeerd en zijn enkele maatregelen om de slibconcentratie te beïnvloeden verkend.

Voorliggend document is een samenvatting van het gehele onderzoek. Figuur 4 geeft de samenhang tussen de hoofdstukken weer.



H6 Conclusies, perspectieven

Figuur 4: Relaties tussen bodem, water, slib en ecologie, met hoofdstukindeling

Hoofdstuk 2 bespreekt de vraag 'Is de troebelheid in het Eems-estuarium in de afgelopen decennia toegenomen?'. Hoofdstuk 3 behandelt de vervolgvraag 'Wat betekent een toename van troebelheid voor de voedselproductie'. De twee daarop-



volgende hoofdstukken geven een meer gedetailleerde beschrijving van de waterbeweging en de slibdynamiek in het estuarium. Hierbij worden nieuwe inzichten in een samenhangend verhaal geplaatst. Hoofdstuk 4 behandelt de waterbeweging, inclusief de invloed ervan op het transport van slib. Hoofdstuk 5 beschrijft de belangrijkste oorzaken van de waargenomen veranderingen in troebelheid. In hoofdstuk 6 worden conclusies getrokken en worden antwoorden gegeven op de vragen Wat veroorzaakte de veranderingen in de vertroebeling? en Wat zouden we er aan kunnen doen? Een antwoord op de vraag “Is het noodzakelijk maatregelen te nemen?” is een maatschappelijke kwestie, waarvoor dit rapport inhoudelijke bouwstenen aanreikt.

Belangrijk deel van het onderzoek was een uitgebreide meetcampagne. Foto's: André Meijboom, IMARES



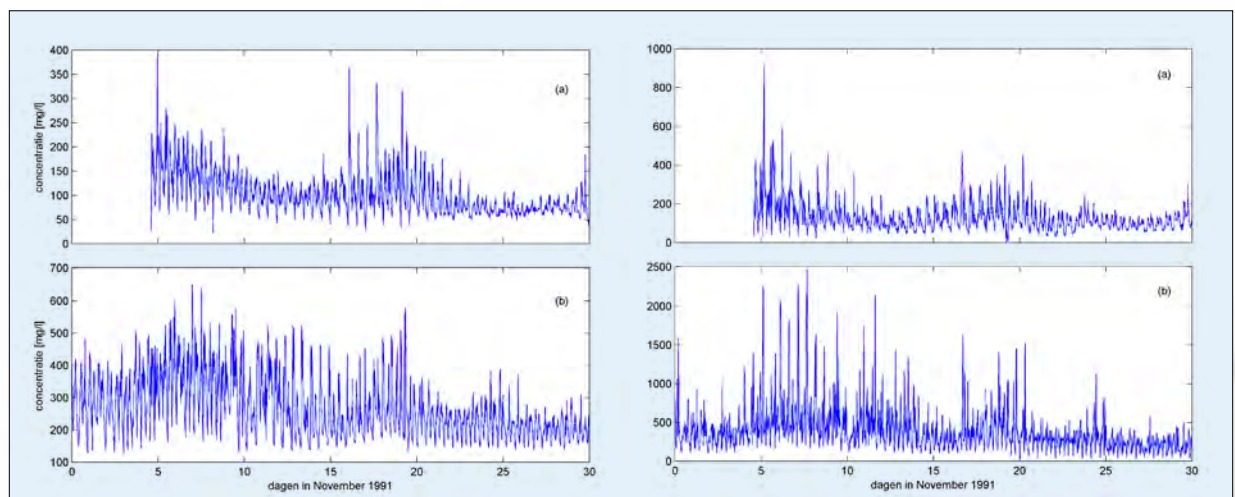
02. Waargenomen veranderingen in de troebelheid



Of de troebelheid in het Eems-estuarium in de afgelopen decennia is toegenomen, wordt primair gebaseerd op metingen van slibconcentraties.

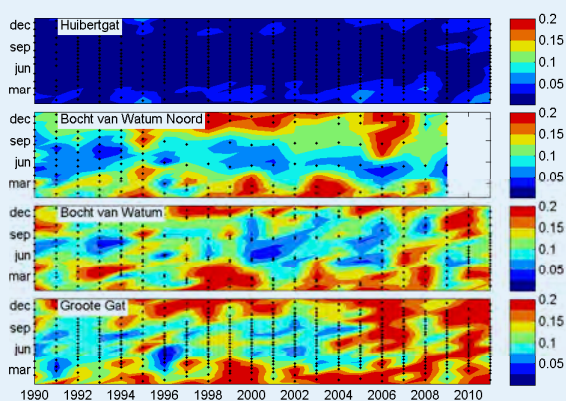
Binnen het estuarium bestaan binnen een enkel getij grote verschillen in slibconcentraties. Deze worden veroorzaakt door de continu veranderende stroomsnelheden. De grote variatie in de slibconcentraties in de tijd en in de ruimte wordt zichtbaar

met continu metingen, niet met tweewekelijkse of maandelijkse metingen. In november 1991 zijn in het Oost Friesche Gaatje en in de Dollard continu-metingen uitgevoerd op twee dieptes waaruit de zeer sterke variatie in de slibconcentraties in tijd en in ruimte blijkt (van de Kreeke, 1997) (Figuur 5). De slibconcentraties worden ook sterk beïnvloed door de wind en door de waterafvoer van de rivieren.

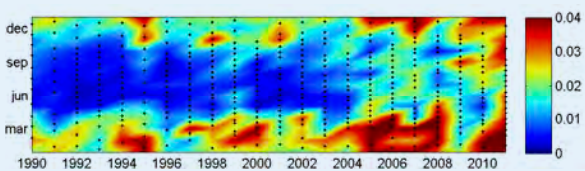


Figuur 5: gemeten tijdseries in November 1991 in het Friesche Gaatje (a) en de Dollard (b). Links zijn de concentraties gemeten enkele meters boven de bodem, rechts zijn de metingen nabij de bodem weergegeven (van de Kreeke, 1997).

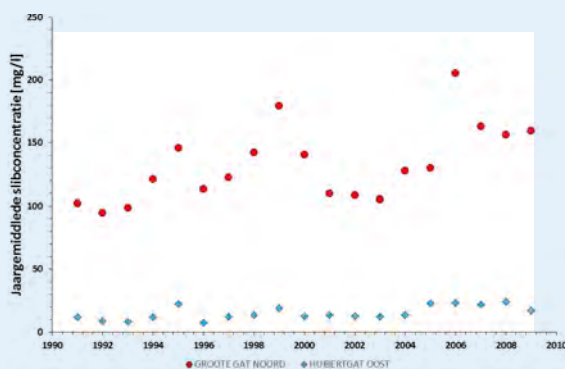
In het estuarium zijn voortdurend grote verschillen in slibconcentraties. Uit de metingen is toch vast te stellen dat sinds 1990 de troebelheid jaarlijks gemiddeld 0,5 tot 3 % toeneemt. In de Eems-rivier is de troebelheid nog veel sterker toegenomen.



Figuur 6a: Slibconcentraties (mg slib per liter) van 1990 tot en met 2011 op de vier meetpunten van Rijkswaterstaat: Huibertgat, Bocht van Watum Noord, Bocht van Watum en Groote Gat noord (van Maren et al., 2015A).



Figuur 6b: Slibconcentraties (mg slib per liter) van 1990 tot en met 2011 op het meetpunt Huibertgat (van Maren et al., 2015A) uitgezet met een fijnere schaal.



Figuur 7: jaargemiddelde slibconcentratie in mg /liter bij in het buitengebied bij Huibertgat oost en in de Dollard bij Groote Gat noord

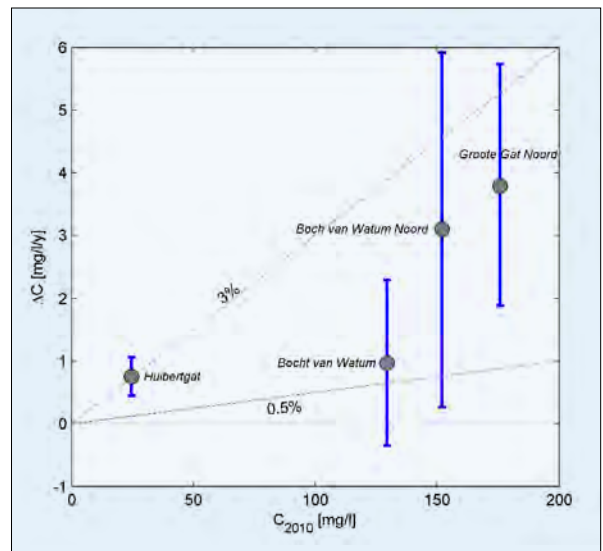


Rijkswaterstaat monitort in het MWTL-programma de slibconcentraties op vier monsterpunten door één keer per maand een steekmonster te nemen. Figuur 6a toont de slibconcentraties op de 4 monitoringslocaties van RWS in de periode 1990 t/m 2011, van buiten naar binnen. Hoe meer gele en rode kleuren hoe troebeler het water is. Duidelijk is te zien dat de slibconcentraties in de tijd toenemen. Ook is te zien dat in het Buitengebied (bij Huibertgat) de troebelheid veel lager is dan op de meetpunten verder het estuarium in. In Figuur 6b zijn de meetresultaten bij Huibertgat uitgezet met een fijnere schaal, waardoor beter zichtbaar wordt dat net als op de andere locaties de slibconcentraties hier in de tijd toenemen.

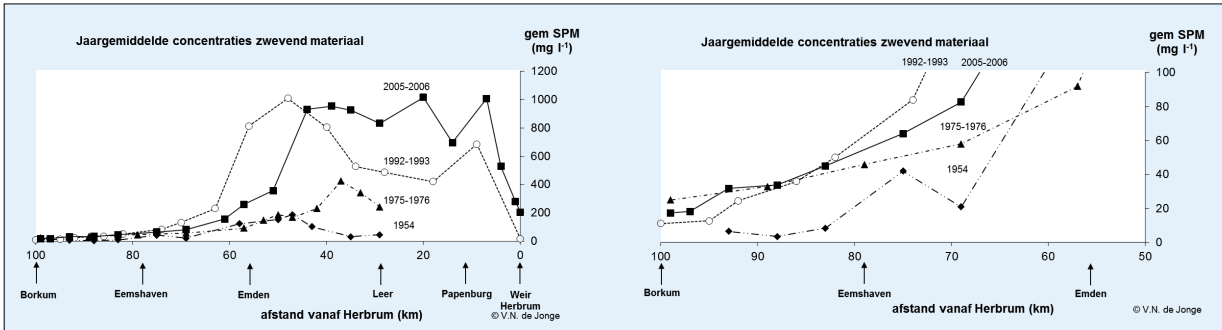
In Figuur 7 zijn de jaargemiddelde, in de periode 1990 t/m 2009 gemeten, slibconcentraties weergegeven voor het buitengebied bij Huibertgat oost en voor de Dollard bij Grootte Gat noord. Duidelijk zichtbaar is het verschil in de concentratieniveaus tussen beide gebieden, de variatie tussen de jaargemiddelde waarden, maar ook een toename van de concentraties in de tijd.

Figuur 8 laat de statistische significantie zien van de toename van de troebelheid over de periode 1990 t/m 2011. De toename is weergegeven in absolute waarden (mg/l/jaar, op de y-as), maar ook als de procentuele toename door de lijnen die 0,5% per jaar en 3% per jaar voorstellen. Op het meetpunt in de Dollard (Grootte Gat Noord) ligt de jaarlijkse toename met 95% zekerheid tussen 2 en 6 milligram per jaar en ligt de procentuele toename tussen de 1 en 3% per jaar. Bij Huibertgat ligt de jaarlijkse toename met 95% zekerheid tussen 0,3 en 1 milligram per jaar en ligt de procentuele toename tussen de 2 en 5% per jaar.

Het is niet goed vast te stellen hoe de troebelheid zich in de Eems-Dollard heeft ontwikkeld voor 1990. Dit komt door de kleine dataset, waarin grote fluctuaties van de slibconcentraties binnen een getij en binnen een jaar zitten en door veranderingen van bemonsterings- en analysemethoden. De beschikbare wetenschappelijke publicaties (onder meer over de periode 1954 – 2006 door V.N. de Jonge) suggereren wel een toename (zie Figuur 9).



Figuur 8: Gemiddelde jaarlijkse verandering in slibconcentratie voor de vier meetpunten van Rijkswaterstaat. De blauwe lijnen laten het 95% betrouwbaarheidsinterval zien. De stippellijnen tonen wat de relatieve jaarlijkse toename is, afgezet tegen de slibconcentratie in 2010



Figuur 9: Jaargemiddelde slibconcentraties tussen 1954 en 2006. Vanwege de hoge concentraties slib in de getijdenrivier is in de rechterfiguur ingezoomd op het estuarium.



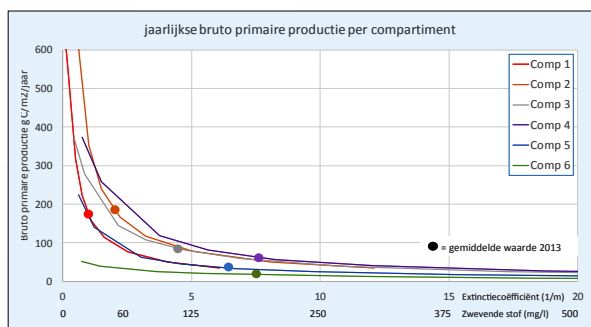
03.

De gevolgen van troebelheid voor de primaire productie




Estuaria zijn van nature productieve gebieden. Deze productie vormt de basis van het totale voedselweb dat bestaat uit talloze soorten, variërend van bacteriën tot vogels en zeezoogdieren. In het Eems-estuarium wordt de primaire productie verzorgd door de micro-algen (fytoplankton) in het water en de micro-algen (microfytobenthos) op de sedimenten van de droogvallende platen. Zeegrassen zijn als voedselproducent in het gebied op het ogenblik verwaarloosbaar. De primaire productie wordt uitgedrukt als Bruto Primaire Productie (BPP, zie ook kader, pagina 18,19). De BPP wordt bepaald door lichtbeschikbaarheid en de voedingsstoffen fosfaat, stikstof en silicaat. Hoe troebeler het water hoe lager de primaire productie (BPP) door fytoplankton.

Figuur 10 geeft de relatie (lijn) weer tussen de slibconcentratie, de lichtuitdoving en de Bruto Primaire Productie door fytoplankton, op basis van de in dit onderzoek uitgevoerde metingen in de verschillende compartimenten in het Eems-estuarium, zoals zijn aangegeven in figuur 12. Deze relaties zijn bepaald zonder nutriëntbeperking. Omdat in het buitengebied (compartimenten 1 en 2) wel enige nutriëntbeperking optreedt, is de BPP door fytoplankton bij een lage troebelheid in het buitengebied wat overschat. In de figuur zijn de gemiddelde zwevende stof-concentraties in de verschillende compartimenten in 2013 als punten opgenomen, waarmee duidelijk wordt dat in een groot deel van het gebied de bruto primaire productie sterk wordt gelimiteerd door de slibconcentratie.



Figuur 10: Relatie tussen de zwevende stof concentratie, de lichtuitdoving (extinctiecoëfficiënt) en de BPP door fytoplankton voor de verschillende compartimenten (zoals aangegeven in figuur 12) in het Eems-estuarium.



De algengroei in de Dollard en het Middengebied wordt gelimiteerd door de slibconcentraties. In het buitengebied zijn zowel de slibconcentratie als de nutriënten limiterend. Metingen laten zien dat de bruto productie van algen in 2012 en 2013 duidelijk lager was dan in 1979 en 1980. Een lagere troebelheid geeft een hogere voedselproductie in het grootste deel van het estuarium. Verwacht wordt dat het hele voedselweb daarvan zal kunnen profiteren.

Belangrijker dan de Bruto Primaire Productie (BPP) voor het voedselweb, is de Netto Primaire Productie (NPP). Dit is de hoeveelheid biomassa die beschikbaar komt als voedsel voor alle andere organismen. Deze NPP kan niet gemeten worden, maar kan wel op allerlei manieren worden berekend. In deze studie is hiervoor een computermodel ingezet.

Als de primaire productie door fytoplankton laag is wordt in het water weinig voedsel geproduceerd. De enige primaire voedselproductie is dan op de droogvallende platen. Meer voedselproductie betekent een grotere draagkracht van het gebied. Secundaire producenten als macrofauna, mosselen en ook vis en vogels, die deel uitmaken van de KRW- en Natura2000-doelen zullen hier zeer waarschijnlijk van produceren.

De KRW heeft strikte chlorofyl- en N-normen gesteld om algenbloeien te voorkomen, omdat een combinatie van voldoende licht en een overmaat aan voedingsstoffen kan leiden tot ongewenste bloei van toxische algen. Dit risico is in het Eems-estuarium zeer klein omdat licht vrijwel altijd limiterend is.

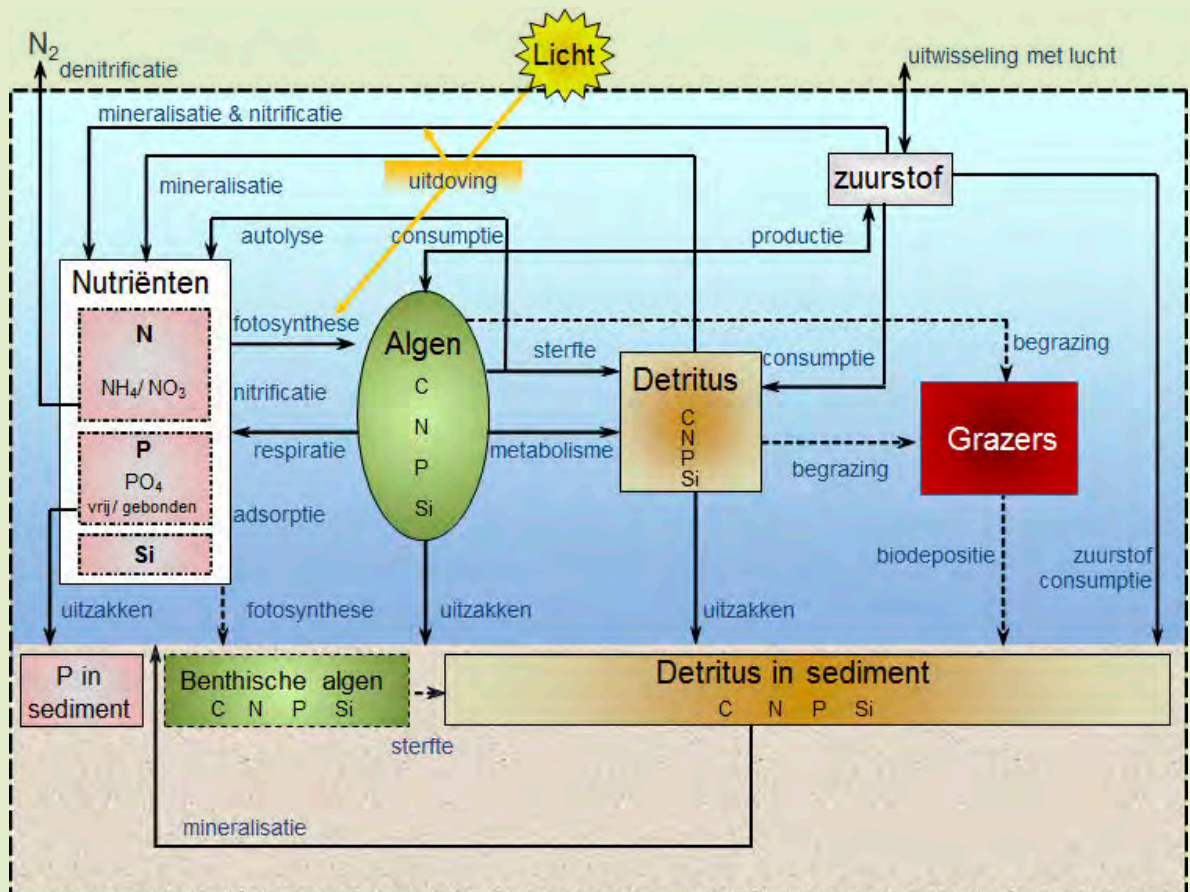
Het ecologische belang van vers geproduceerde algen en dood organisch materiaal wordt met behulp van Figuur 11 in het kader op de volgende pagina toegelicht.





De basis van de voedselketen

De basis van de voedselketen wordt gevormd door verteerbaar organisch materiaal. Dat materiaal bestaat uit een mengsel van dood afbreekbaar organisch materiaal of detritus en levende algen. In de Nederlandse estuaria bestaan de algen vooral uit de micro-algen die in het water zweven (fytoplankton), de micro-algen die leven op de bij laagwater droogvallende platen (microfytobenthos) en uit een fractie microfytobenthos die door windgolven gesuspenderd raakt en dan meedoet aan de fytoplankton productie (tychoplankton). Daarnaast is ook de aanvoer van verteerbaar organisch materiaal (detritus in Figuur 9) van buiten het systeem van belang. Zeegrassen kunnen ook van belang zijn, maar op dit ogenblik zijn deze in het Eems-estuarium vrijwel verdwenen.



Figuur 11: De voedselketen, geïllustreerd via de processen die in het ecologische deel van het in deze studie gebruikte modelinstrumentarium zitten. Detritus is dood organisch materiaal. Grazers zijn onder meer schelpdieren, sommige wormen, garnalen en zoöplankton, die allemaal weer door vissen worden gegeten.



Minder productie van algen werkt door in het functioneren van het grootste deel van het ecosysteem en daarmee op de draagkracht. De omvang van de voedselproductie door algen hangt van verschillende factoren af. Licht en nutriënten zijn voor het fytoplankton de belangrijkste factoren. In estuaria en gebieden als de Waddenzee is, wanneer er voldoende licht is in het voorjaar, de beschikbaarheid van fosfaat en silicaat vaak voor een korte periode een groeibeperkende factor, later in het seizoen soms gevolgd door nitraatbeperking (zie ook Figuur 17).

De algengroei kan op allerlei manieren worden gemeten. In deze studie is dat gedaan door het meten van de aanmaak van organische stof (primaire productie genoemd). De getalswaarde die wordt verkregen heet Bruto Primaire Productie (BPP) en wordt meestal uitgedrukt in een hoeveelheid koolstof per eenheid van tijd en per eenheid van oppervlak ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{uur}$ of $\text{gC}/\text{m}^2/\text{dag}$ of $\text{gC}/\text{m}^2/\text{jaar}$). Om de hoeveelheid koolstof te krijgen die als voedsel beschikbaar is voor andere organismen, de Netto Primaire Productie (NPP), dient de BPP te worden verminderd met wat door de algen zelf wordt gebruikt voor de eigen levensverrichtingen ('respiratie').

Bruto primaire productie vindt alleen plaats als er licht is, verbruik vindt ook in het donker plaats. Is er erg weinig licht, dan kan de respiratie groter zijn dan de bruto productie, en is de som (de netto productie) negatief. Dit speelt vooral bij diep water. Ondiepe en overstroombare gebieden met relatief helder water zijn de belangrijke productiegebieden.

Ook het (micro)fytobenthos kan alleen groeien als er voldoende licht is. Aangezien deze groep leeft op de bij laagwater droogvallende zand- en slikplaten en daarmee vooral fotosynthetisch actief is tijdens laagwater, ondervindt het microfytobenthos relatief weinig hinder van troebel water. De aanwezigheid van enig slib in het sediment is voor het microfytobenthos meestal zelfs gunstig, omdat slib beter water vasthoudt dan zand, waardoor de algen aan het oppervlak kunnen blijven. De ondiepe overstroombare gebieden zijn hiermee voor beide typen algen een belangrijke productiezone. De beschikbaarheid van voedingsstoffen in het sediment is zelden een beperkende factor voor het microphytobenthos.

Bodemalgen kunnen als tychoplankton gesuspenseerd raken door golven. De getijstroom verzorgen het transport daarvan tussen platen en geulen, evenals voor de verdere verdeling van de algen over het estuarium (de Jonge, 1992). Tijdens hoogwater boven de platen kan ook netto depositie plaatsvinden van tychoplankton, net als dat gebeurt met slib.

Algen worden gegeten door andere organismen, die op hun beurt ook weer voedsel zijn voor de vleeseters. Al die relaties binnen een ecosysteem grijpen op een complexe manier op elkaar in, waarbij ze ook nog in ruimte en tijd variëren. Vanwege die complexiteit worden modellen ingezet om het effect van bepaalde randvoorwaarden als temperatuur, licht en nutriënten op de levensverrichtingen van organismen te helpen verklaren of om de effecten van potentiële ingrepen enigszins in te schatten.



Waar, hoe en wanneer vindt primaire productie in het estuarium plaats?

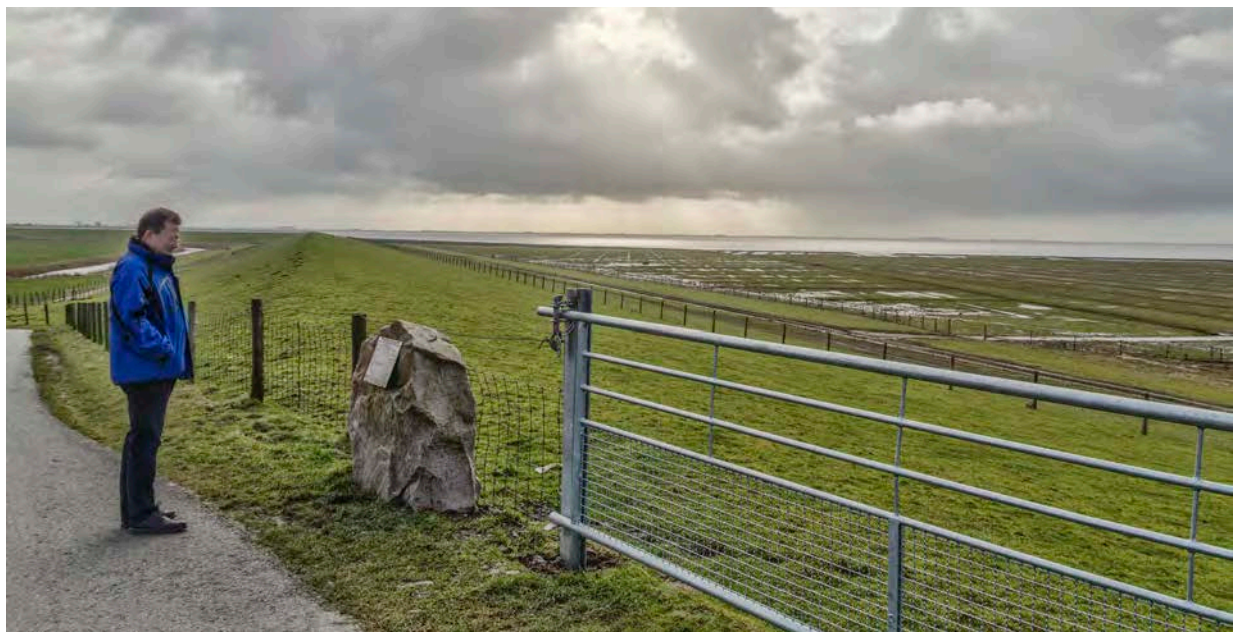
Verschillen tussen gebieden

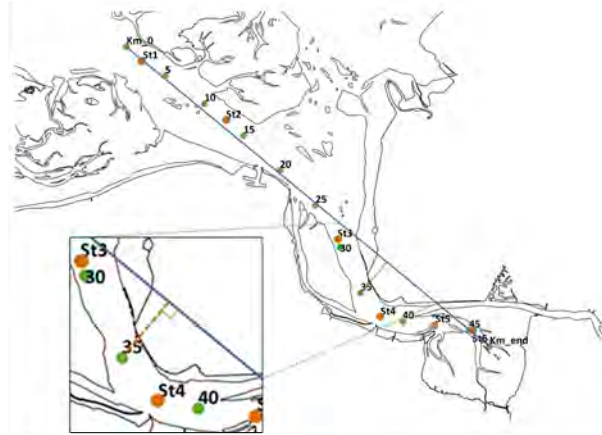
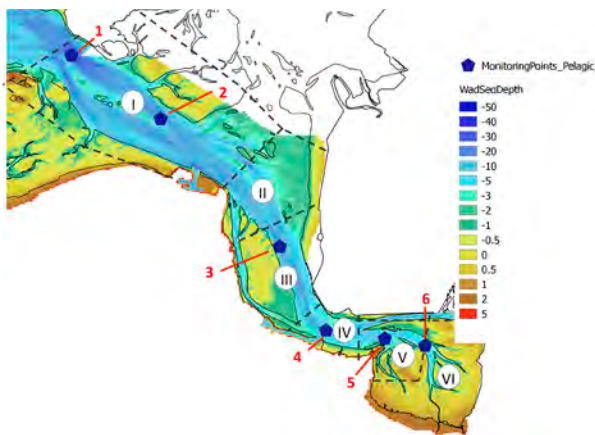
In het estuarium, met gemiddeld ~50% droogvallende platen, zorgen bodemalgen voor een belangrijk deel van de voedselproductie. In Tabel 1 staan de cijfers van de algenproductie, zoals berekend voor het jaar 1977 door De Jonge (1995). Microfytobenthos, inclusief het tychoplankton, neemt 43% van de algenproductie voor zijn rekening in het gehele estuarium. Het grote

aandeel van de primaire productie door het fytoplankton in het Buitengebied (~80%), komt omdat enerzijds dit deelgebied erg groot is, anderzijds omdat de BPP in de andere gebieden sterk lichtgelimiteerd is. Van de ongeveer 40% die microfytobenthos van de totale primaire productie verzorgde is iets minder dan de helft (15% van het totaal) via tychoplankton.

Bruto Primaire Productie 1977	Mondingsgebied	Middendeel, ca. Delfzijl-Eemshaven	Dollard	Totaal
Echte fytoplankton	50 %	8 %	0,2 %	Ongeveer 60%
Geresuspendeerd microfytobenthos (tychoplankton)	13 %	2 %	2 %	Ongeveer 15%
Microfytobenthos	17 %	3 %	6 %	Ongeveer 25%
TOTAAL	~ 80 %	~ 13 %	~ 8 %	~100 %

Tabel 1: Het relatieve belang van de verschillende groepen algen en gebieden voor de bruto primaire productie in 1977 (de Jonge, 1995). De verhoudingen variëren van jaar tot jaar.





Figuur 12: Indeling van het estuarium in zes gebieden (links), zoals gebruikt in deze studie. Deelgebied I is onderdeel van het Buitengebied. De deelgebieden II, III en IV vormen hier het Middengebied, terwijl de deelgebieden V en VI de Dollard vormen. In andere studies ligt de helft van deelgebied II in het Buitengebied en lopen de grenzen van het Buitengebied over de wantijen. Het rechter paneel geeft de meetlocaties waarover wordt gerapporteerd in Figuur 14. De bruine punten geven de zes stations aan waar de metingen aan de primaire productie in de waterkolom zijn uitgevoerd. De groene punten zijn kilometeraanduidingen vanaf de monding

Wat is wanneer en waar limiterend?

In het tekstkader op de bladzijden 18 en 19 is uitgelegd dat in het estuarium de pelagische bruto primaire productie het grootste deel van de tijd gereguleerd wordt door de beschikbaarheid van licht en dat in de zomer onder helderwatercondities de beschikbaarheid van nutriënten ook bepalend kan zijn (zie ook Figuur 17). In de richting van de Dollard neemt de troebelheid toe en daarmee de mate van lichtlimitatie.

De nutriënten worden in het buitengebied geleverd door lokale mineralisatie van nieuw algenmateriaal en door de mineralisatie van detritus afkomstig uit de Noordzee en door de nutriëntenaanvoer vanuit de Eems en de Westerwoldsche Aa. De nutriënten in de rivieren, de Waddenzee en de Noordzee zijn deels afkomstig van natuurlijke bronnen en deels afkomstig van menselijke bronnen (uitspoeling gronden en waterzuiveringsinstallaties). Het kustwater van de Noordzee staat onder invloed van Rijn en Maas. De Waddenzee staat onder invloed van een combinatie van kustwater en wateruitslag vanuit het IJsselmeer, het Lauwersmeer en polderwater. De nutriënten die via de kustroute

de Waddenzee bereiken doen dat vooral via zwevende deeltjes. Dat materiaal zal eerst moeten worden afgebroken (gemineraliseerd), voordat de nutriënten beschikbaar zijn voor de algen.

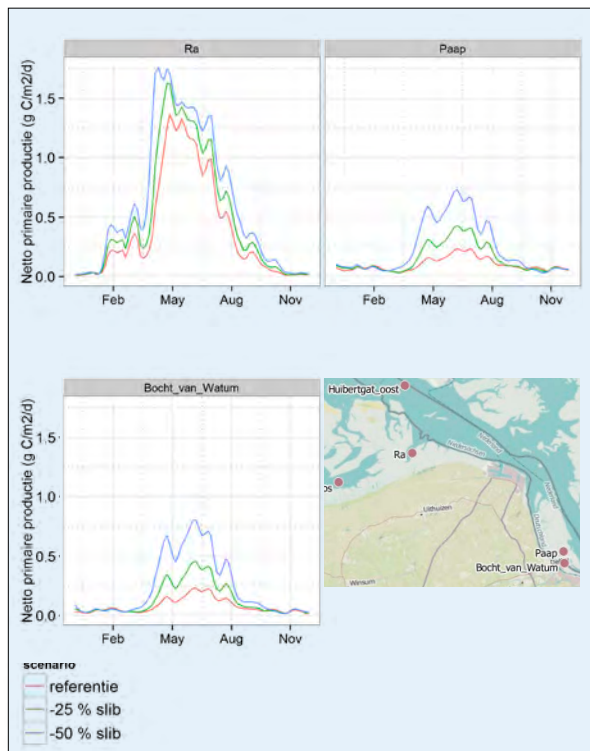
Om de invloed van de slibconcentratie, via de lichtcondities, op de primaire productie zichtbaar te maken, is in Figuur 13 weergegeven hoeveel de Netto Primaire Productie per m² oppervlak per dag op 3 locaties gedurende het modeljaar in het estuarium verhoogt als de slibconcentratie wordt verlaagd met respectievelijk 25% en 50%. De rode lijn is de huidige situatie en de groene en blauwe lijn zijn scenario's waarbij slibconcentratie is verminderd (25 en 50%). Duidelijk is de toename van de netto primaire productie te zien. Gedurende het hele groeiseizoen is de NPP hoger als de slibconcentratie lager is. In het buitengebied (Ra) is de toename in het voorjaar relatief het hoogst. In het middengebied is door de hoge troebelheid het groeiseizoen veel korter dan in het buitengebied. Het effect van een vermindering van de troebelheid op de netto primaire productie is daar wel relatief het grootst.



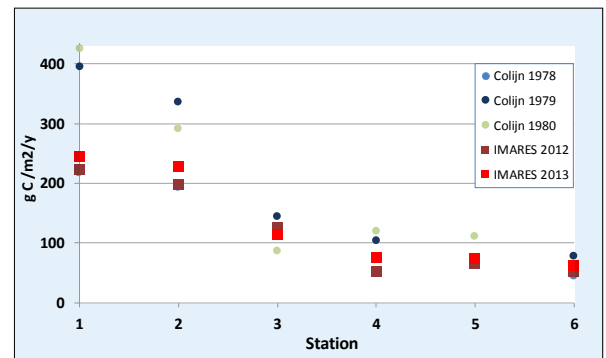
Is de primaire productie veranderd?

De metingen van de bruto primaire productie uit 2012 en 2013 zijn vergeleken met metingen gedaan in 1978, 1979 en 1980 (Figuur 14). De meetresultaten van het BPP in 2012 en 2013 zijn bijna de helft lager dan die voor de jaren 1979 en 1980 en min of meer gelijk aan 1978. De bruto primaire productie in deelgebied IV is voor alle jaren afgenomen. Aangenomen wordt dat de primaire productie door het microfytobenthos door het hoge nutriëntenaanbod in sediment niet is veranderd.

In de Dollard (deelgebieden V en VI) is de BPP per vierkante meter waterkolom nauwelijks veranderd (Figuur 14). De benthische primaire productie (Tabel 1) in dit deelgebied is op dit moment nog steeds veruit het belangrijkste, vanwege de slechte lichtcondities in de waterkolom. De relatieve bijdrage van de BPP in de waterkolom aan de totale productie was en is gering (Tabel 1).



Figuur 13: Gemodelleerde Netto Primaire Productie in de waterfase per vierkante meter waterkolom op drie locaties, indien de slibconcentratie (in het hele studiegebied) wordt verlaagd.



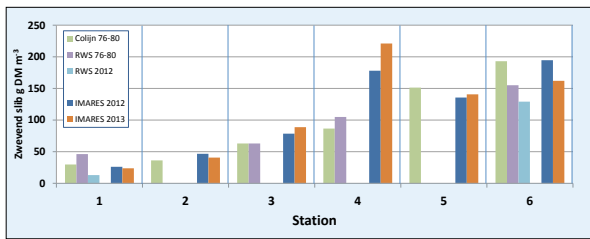
Figuur 14: Bruto Primaire Productie van de waterfase in periode 1978 - 1980, vergeleken met 2012 en 2013. Zie voor de ligging van de meetstations Figuur 12.

Wat veroorzaakte de veranderingen in primaire productie

Twee mogelijke oorzaken zijn bekeken, te weten de veranderingen in lichtcondities als gevolg van de slibconcentraties en de veranderingen in nutriëntenconcentraties.

Slibconcentraties

In aanvulling op hoofdstuk 2 geeft Figuur 15 de in dit onderzoek in de verschillende deelgebieden gemeten slibconcentraties in vergelijking met die gemeten door Colijn et al in de periode 1978-1980. De slibconcentraties zijn vooral in deelgebied 4 sterk toegenomen. In deelgebied 2 en 3 is de



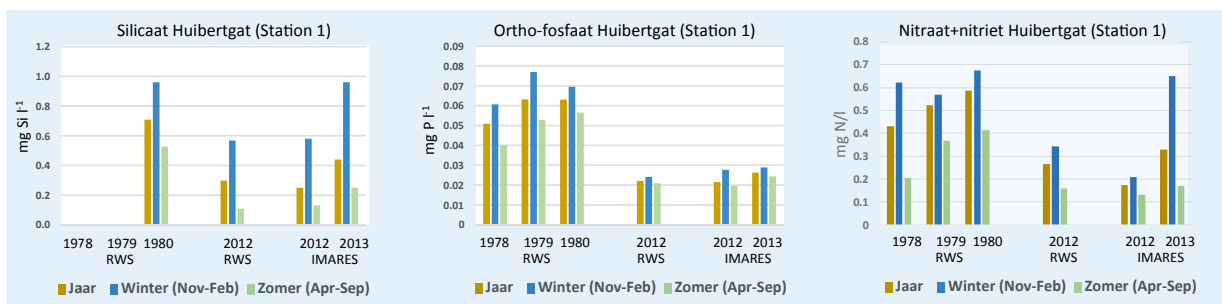
Figuur 15: Vergelijking van slibmetingen uit verschillende perioden met de waarden uit het KRW-onderzoek. Zie voor de verschillende locaties Figuur 12.

toename (veel) minder, maar wel aanwezig. De toegenomen troebelheid vormt in deze deelgebieden de beste verklaring voor de afname van de BPP. In de

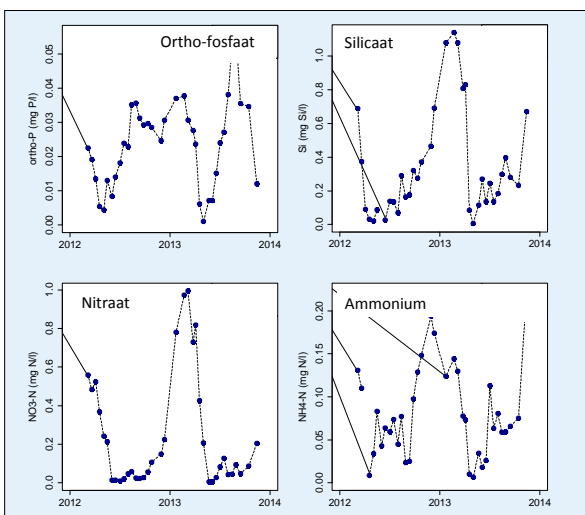
andere deelgebieden is geen duidelijke toename van de slibconcentraties in deze figuur te zien.

Nutriëntconcentraties

Figuur 16 laat zien dat in 2012 en 2013 in het Buitengebied de concentraties van fosfaat, silicaat en stikstof gemiddeld lager waren dan gedurende de tweede helft van de zeventiger jaren. Vooral de fosfaatconcentraties zijn sterk gedaald, maar ook nitraat en nitriet daalden gedurende de zomer. De afname van de BPP in het buitengebied I en II kan ook een gevolg zijn van de afname van de nutriëntconcentraties. Dat kan alleen als gedurende het groeiseizoen nutriëntlimitatie optreedt.



Figuur 16: Gemeten concentraties fosfaat, silicaat en stikstof eind jaren zeventig en 2012/3. Het aanbod van deze nutriënten is ongeveer gehalveerd tijdens de zomerperiode.



Figuur 17: Verloop van de belangrijkste nutriëntconcentraties nabij Borkum in 2012-2013 (Brinkman et al, 2014).

Figuur 17 laat het precieze concentratieverloop van de meest relevante nutriënten gemeten bij Borkum zien. Op het moment dat de nutriëntconcentratie nul is, is het desbetreffende nutriënt limiterend voor de algengroei. In de figuur is te zien dat vanaf de start van het groeiseizoen er voor alle nutriënten gedurende een korte of iets langere periode limitatie optreedt, eerst silicaat en ammonium, dan nitraat en vervolgens fosfaat. Stikstof blijft het langst limiterend.



Uit het modelonderzoek en de data-analyse blijkt dat de nutriënten die worden aangevoerd door de Eems voornamelijk gebruikt worden door algen die stroomopwaarts van Eemshaven leven. De hoeveelheid nutriënten die daar momenteel beschikbaar is, is gedurende het hele jaar genoeg voor de algengroei onder de daar heersende lichtcondities. Als de troebelheid in het Middengebied en de Dollard afneemt dan kan de primaire productie toenemen. Uit de modelberekening volgt dat als de aanvoer van nutriënten uit de Eems en de Leda via de getijdenrivier modelmatig met 40% wordt verminderd de primaire productie in het Middengebied maar weinig afneemt.

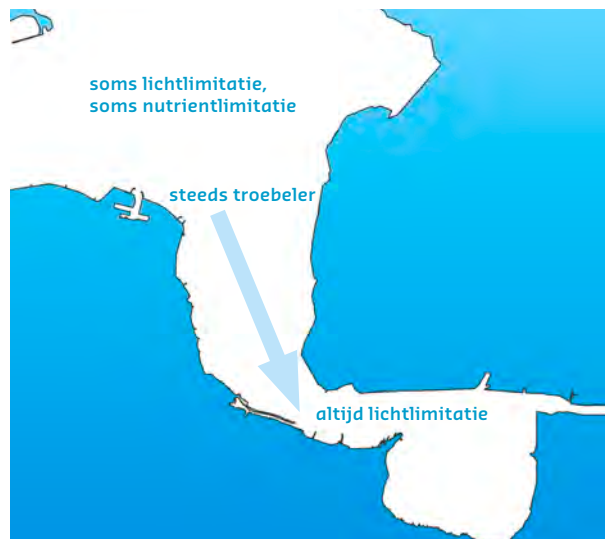
Wat betekenen veranderingen in primaire productie voor ecologische waarden?

Waargenomen veranderingen in ecologische waarden van het estuarium kunnen nog niet aan veranderingen in de primaire productie gekoppeld worden. Om uitspraken te kunnen doen over het effect van een veranderende primaire productie op het gehele voedselweb zou een volledige ecosystemeanalyse moeten worden uitgevoerd. Zoiets is op dit moment niet beschikbaar. Wat de bestaande beschikbare kennis en waarnemingen ons leren volgt hieronder per deelgebied. In de Dollard zijn in de afgelopen decennia weinig veranderingen in de totale primaire productie opgetreden, mede omdat vooral de bodemalgen voor de primaire productie zorgen. De beperkte productie door het fytoplankton is door de toename van de troebelheid wel iets afgenomen. In het Middengebied zijn bepaalde ecologische waarden afgenomen door het recent verdwijnen van het veld Groot zeegras op de Paap (Jager & Kolbe, 2013) en de mosselbanken daar. De oorzaken daarvan zijn nog niet duidelijk.

Met 11 soorten onderzochte vogels gaat het goed in het estuarium maar met de Wilde Eend, Rosse Grutto, Zwarte ruiter, Tureluur en Zilvermeeuw niet (Prop et al, 2012).

Synthese en aanbevelingen

De algengroei in de Dollard, het Middengebied en het Buitengebied wordt gelimiteerd door de slibconcentraties (Figuur 18). In het Buitengebied zijn er daarnaast duidelijke aanwijzingen dat nutriënten de groei mede beperken. De kans op overmatige algengroei is overal vrijwel afwezig. De KRW-doelen voor algenbloeien worden overal gehaald. Ook bij toenemende helderheid van het water zullen deze KRW-doelen gehaald blijven worden, omdat er a) succesvol beleid is gevoerd op nutriëntenreductie en b) het voedselweb bij toenemende helderheid beter zal gaan functioneren dan nu het geval is.



Figuur 18: Verloop van nutriëntlimitatie naar lichtlimitatie doorheen het estuarium.



De KRW-doelen reflecteren nu onvoldoende een gezond ecologisch functioneren. Sterk wordt aanbevolen de KRW-doelen in de toekomst meer te richten op de ecologische (structuur en functioneren) kwaliteit van het gehele ecosysteem, waar naast de primaire productie ook de secundaire productie en de biodiversiteit worden benoemd.

Op dit ogenblik worden in de Dollard en het Middengebied de beschikbare nutriënten niet optimaal benut voor de voedselproductie, omdat het systeem te troebel is. Als de troebelheid in het Middengebied en de Dollard zou verminderen, zal dit gedurende het gehele groeiseizoen tot een hogere productie kunnen leiden. Dit hoeft niet te betekenen dat door opname van nutriënten de primaire productie in het Buitengebied evenredig zal gaan afnemen, omdat het Middengebied relatief klein is (~90 km²) ten opzichte van het Buitengebied (~275 km²) en de invloed daardoor gering.

Bovenstaande effecten gelden alleen voor de primaire productie door het fytoplankton en tychoplankton, die samen zorgen voor ongeveer 75% van de totale productie in het Eems-estuarium. Door de lage slibconcentraties in het Buitengebied zal alleen daar de productie door de bodemalgen positief kunnen reageren op een vermindering van de troebelheid. Door het enorme plaatoppervlak in het Buitengebied zal dit hier wel van betekenis zijn. Kennisvermeerdering over de primaire productie door het microfytobenthos op de platen kon in het onderzoek niet worden gerealiseerd, maar is vanwege de grote bijdrage aan de totale productie wel nodig.

Het antwoord op de vraag of het nodig is de troebelheid te verminderen is vanuit ecologisch perspectief evident. Een verlaagde troebelheid zal overal tot een hogere productie van het fytoplankton leiden en tot een verlenging van

het groeiseizoen. De doorwerking van een hogere productie op het functioneren van het gehele voedselweb dient nader te worden onderzocht. Verwacht wordt dat het hele voedselweb zal kunnen profiteren van een verhoging van de netto primaire productie. Hierdoor zal de rijkdom van het voedselweb kunnen toenemen. Dit zal tevens positief doorwerken op de draagkracht van het gehele ecosysteem.



04. Invloed van getij en stromingen op troebelheid



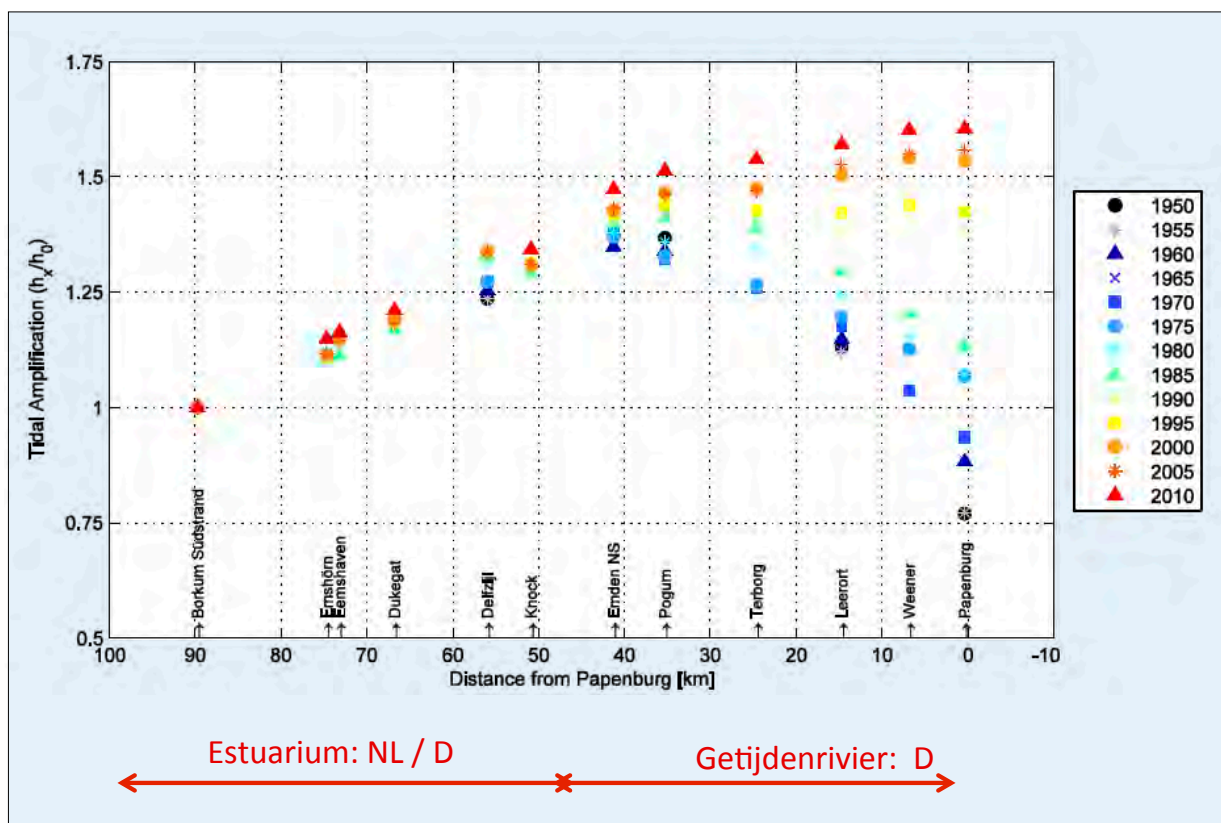
Waterstanden en getijslag

Voor het verklaren van de ontwikkeling van de troebelheid is kennis nodig van de waterbeweging omdat veranderingen daarin leiden tot een andere verspreiding van het slib. In estuaria wordt de waterbeweging in hoge mate bepaald door het getij en hoever dit doordringt. Een manier om dit uit te drukken is het verschil tussen hoog- en laagwater op een bepaalde plaats: de getijslag. Onder onverstoorde omstandigheden is er eerst een toename van de getijslag in stroomopwaartse richting, verderop gevolgd door een afname. Eerst overheerst het effect van het nauwer worden; daarna overheersen de effecten van de bodemweerstand en de overstroombare gebieden (zandplaten, slikken, kwelders etc.). Diepere en rechtgetrokken geulen, maar ook het verdwijnen van overstroombare gebieden, versterken de getijslag, omdat het water dan gemakkelijker kan worden aan- en afgevoerd. Rond 1950 voldeed het Eems-estuarium aan het beeld van de onverstoorde omstandigheden (Figuur 19). Daarna veranderde de getijslag drastisch, vooral stroomopwaarts van Emden (km 40).

Het hoogwaterniveau steeg op de getijdenrivier in die tijd bij Herbrum in totaal ~30 cm terwijl het laagwaterniveau daalde met ~150 cm. De grootste veranderingen vonden plaats na 1980 en worden in verband gebracht met de grote rivierverdiepingen vanaf 1984 ten behoeve van de 'Meyer Werft' in Papenburg. Deze verdiepingen hebben de waterbeweging van de getijdenrivier zodanig veranderd dat slib zich kon ophopen in de waterkolom en in het sediment van de bodem. De veranderingen in de getijrivier hebben geen effect gehad op de getijslag benedenstrooms ervan.

Voor het estuarium (km 50 tot km 100 in Figuur 19) zijn de veranderingen in de getijslag gedurende de laatste halve eeuw relatief beperkt als ze worden vergeleken met die op de getijdenrivier. Dit betekent niet dat het slibtransport er niet veranderd is onder invloed van de getijdenrivier. Omdat de getijdenrivier fysisch anders functioneert dan de rest van het systeem is de bepaling van die invloed zeer lastig. Er zal verder onderzoek naar de effecten van de veranderingen in beide delen van het systeem nodig zijn om hier antwoorden op te geven.

Rond 1950 functioneerde het Eems-estuarium nog grotendeels natuurlijk. Daarna veranderde de getijslag drastisch in de Eems-rivier stroomopwaarts van Emden (km 40). De veranderingen in de slibconcentraties in Dollard, Middengebied en Buitengebied zijn voor een klein deel veroorzaakt door de veranderingen in de getijslag en de veranderingen in het tweegeulensysteem.



Figuur 19: Verandering van de getijslag in het hele Eems-estuarium. De Noordzee ligt links, de Eems-rivier rechts. De getijslag is uitgezet als relatieve maat t.o.v. de getijslag bij Borkum.





Het voor het Eems-estuarium ontwikkelde numerieke slibmodel

Goed modelleren van slib is niet eenvoudig. Slibconcentraties hangen af van de waterbeweging en de hoeveelheid slib die in het estuarium aanwezig is. Die beschikbaarheid is het resultaat van de stromingen, nu en in het verleden, maar ook van slibeigenschappen als 'hoe makkelijk erodeert het' en 'hoe makkelijk bezinkt het', eigenschappen die ook nog eens in ruimte en tijd variëren. Gemiddeld in de tijd bevindt zich 400.000 ton slib in de Eems-Dollard.

Klassieke slibmodellen worden gekalibreerd voor vraagstukken op de korte termijn. Het nadeel daarvan is dat op de lange termijn de hoeveelheid slib in de bodem dan niet altijd meer klopt, vooral als veel slib wordt opgenomen in de waterkolom. Dan geldt de kalibratie niet meer. Voor de Eems-Dollard, met belangrijke vraagstukken op de lange termijn, is meer nodig, want korte- en langetermijneffecten kunnen tegengesteld zijn. Zo zou bijvoorbeeld een geulverdieping op korte termijn, lokaal, tot een lagere slibconcentratie kunnen leiden (want het water stroomt ter plekke minder hard). Het kan tegelijkertijd ook een vergroting van de slibimport betekenen (door optredende veranderingen tussen de eb- en vloedstroom), waardoor er netto juist meer slib in het estuarium komt. Dit leidt op lange termijn juist tot gemiddeld hogere slibconcentraties. Het ontwikkelde slibmodel rekent het slib in de bodem uit als integraal onderdeel en is daarmee in staat zowel korte-als langetermijneffecten te voorspellen.

Het deel van het slib dat in havens bezinkt en vervolgens wordt teruggestort is aanzienlijk (Tabel 2). Omdat havenaanslibbing en verspreiding in het model is ingebouwd kunnen ook de langetermijneffecten van baggeren en storten worden geanalyseerd.

De kwaliteit/waarde van modellen hangt ook altijd af van de kwaliteit van de data waarop ze gekalibreerd zijn. Veel metingen van slibconcentraties in de Eems-Dollard hebben helaas een lage frequentie, terwijl er zeer sterke natuurlijke variabiliteit is. De hoogfrequente metingen (van nabij de Eemshaven) die wel beschikbaar waren zijn toegepast. Ze bleken echter wel af te wijken van de laagfrequente RWS-metingen (die daarom niet zijn gebruikt). Het model geeft het gedrag van slib in de Eems-Dollard goed weer, zowel op korte als lange termijn, voor het doel: de grootschalige en lange-termijnslibdynamiek van het estuarium zo goed mogelijk beschrijven. De historische baggerhoeveelheden zijn gebruikt om het model te toetsen. Hierdoor weten we dat het model goed werkt voor de Eems-Dollard, maar niet goed voor het Vaarwater naar Emden. Dit laatste is niet verwonderlijk, omdat het slib zich daar, door de hoge concentraties, anders begint te gedragen. Dit vraagt om een heel andere aanpak. Voor de Eems-rivier alleen is wel met die andere, veel complexere, modelaanpak gewerkt (voor de hele Eems-Dollard was dit door de omvang niet mogelijk). Dit leverde bevredigende resultaten op, maar gelet op het doel en de insteek van dit document gaan we niet verder in op die modelresultaten.

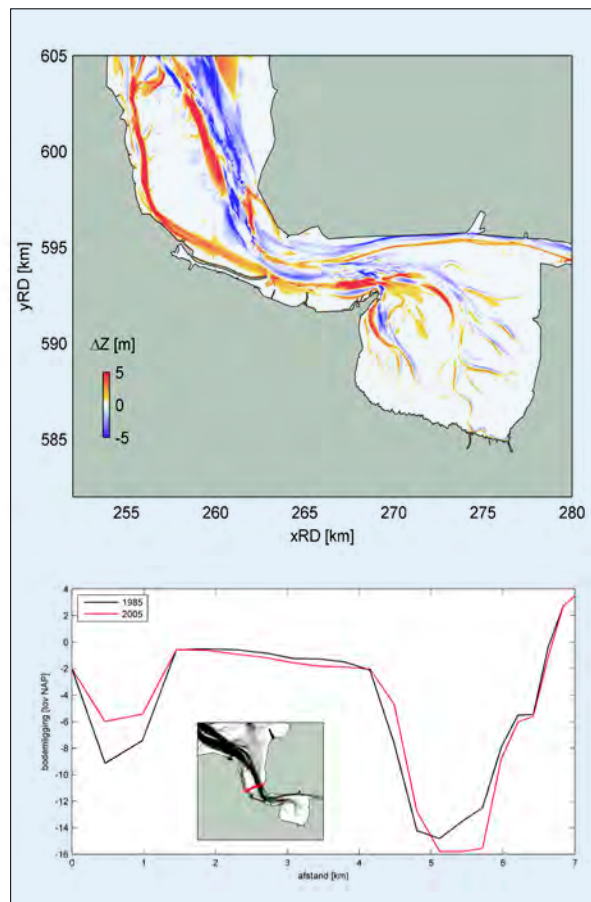


Slibtransport door verschillen tussen de eb- en vloedstroom

Asymmetrische verschillen tussen de vloedstroom en de ebstroom en lokale omstandigheden, zoals bijvoorbeeld geleidelijk veranderende diepten, zorgen ervoor dat bij elk getij netto slibtransport is. Deze getij-asymmetrie is te zien in snelheden, tijdsduur, menging van het slib, peksnelheden en de duur van de kentering (de periode tussen het bereiken van hoogwater of laagwater en de omkering van de waterstroom). De kentering is een belangrijke periode voor het bezinken van het slib omdat er dan een lage stroomsnelheid is. De verschillende vormen van getij-asymmetrie zorgen in kustwateren voor een ruimtelijke gradiënt in slibconcentratie. Deze wordt in estuaria op de overgang tussen brak en zoet water verder versterkt tot een situatie die een estuarien troebelingsmaximum (ETM) genoemd wordt.

De relatieve grootte van de zand- en slikplaten, de hoeveelheid beschikbaar slib op die platen, de zoetwaterafvoer, de getijrange, de viscositeit van het water, de bodemweerstand en de getijdispersie die optreedt bij het mengproces tussen rivierwater en zeewater, spelen een belangrijke rol bij de totstandkoming van de uiteindelijke slibconcentraties.

Een mogelijke oorzaak van veranderde slibconcentraties zijn de morfologische veranderingen, waaronder de vaarwegverdiepingen in het estuarium. In Figuur 20 zijn de veranderingen in de bodemligging te zien en is te zien dat de Bocht van Watum tussen 1985 en 2005 ondieper is geworden en het Oostfriesche Gaatje dieper.



Figuur 20; *Boven*: Verschilkaart tussen bodemligging 2005 en 1985 en *beneden*: dwarsdoorsnede van het estuarium ter hoogte van de Paap-plaat, zoals gebruikt in het numerieke model voor 1985 en 2005. Te zien is dat de nevengeul (Bocht van Watum) op die plaats is verondiept en de hoofdgeul (Oost Friesche Gaatje) ter plekke is verdiept.



Veranderingen in het tweegeulen-systeem

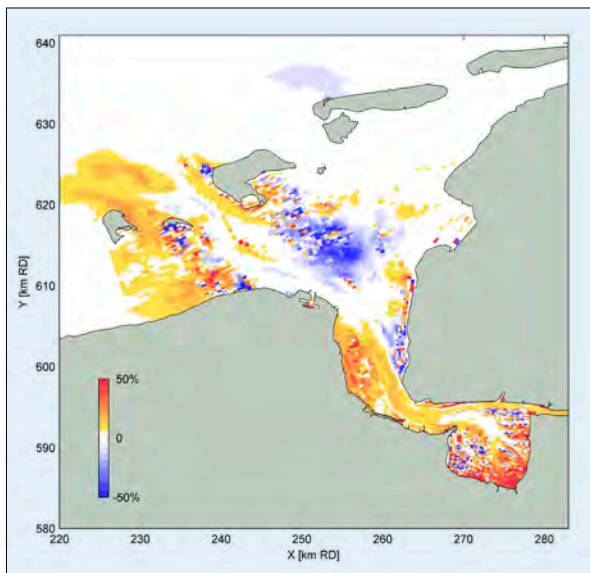
In 1950 is de verondieping van de Bocht van Watum al beschreven als doorgaande ontwikkeling die al lang plaatsvond en ook door zou gaan (van Veen, 1950). Door die verondieping werd de Bocht van Watum geleidelijk aan steeds minder van betekenis voor de ebstroom. Naast dit min of meer natuurlijke proces, werd er vanaf het begin van de 20ste eeuw (gedocumenteerd vanaf 1925) vanuit Duitsland (onder-

houds)baggerwerk uitgevoerd voor vaargeulen, waaronder die in het Oostfriesche Gaatje (de Jonge, 1983). Hierbij werden, afhankelijk van de eisen voor diepgang vanuit de scheepvaart, alle ondiepten verwijderd. Dit leidde tussen 1958 en 1972 tot een zeer geleidelijke toename van de geuldiepte voor de zeeschepen met uitzondering van de periode 1965 – 1968 toen de minimale geuldiepte in korte tijd met meer dan 4 meter toenam. Na 1968 namen de geuldiepten weer meer geleidelijk toe.





Met het Delft3D model is onderzocht wat het effect is van de bodemveranderingen tussen 1985 en 2005 op de slibconcentraties. In Figuur 21 is weergegeven wat de verhoging is van de slibconcentraties door de verandering in de bodemligging tussen 1985 en 2005. Vooral rondom de Hond-Paap en in de Dollard lijken de bodemveranderingen van de laatste decennia tot hogere slibconcentraties te leiden. In 2005 wordt slib sneller richting Dollard en getijdenrivier getransporteerd dan in 1985.



Figuur 21: Verschil in slibconcentratie nabij de bodem tussen de situatie van 1985 en die uit 2005. Een blauwe kleur betekent dat de bodem van 2005 daar tot een lagere slibconcentratie leidt. Een rode kleur wijst op een hogere slibconcentratie t.o.v. 1985.



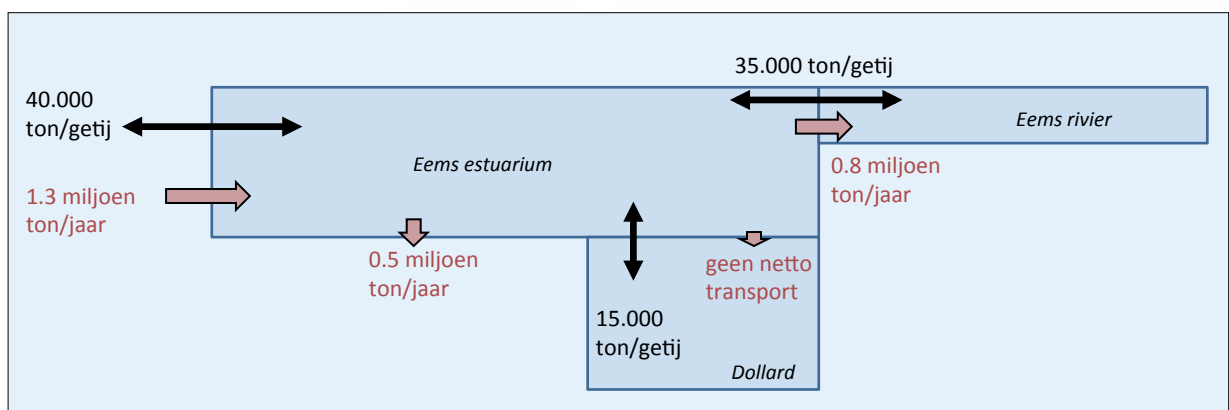
05. Invloed van slibaanbod op de troebelheid




Werkingsprincipe

Het slib dat beschikbaar is voor opwerveling wordt bepaald door de aanvoer vanuit aangrenzende wateren of de bodem (bronnen) en de sedimentatie (bezinkplaatsen) van slib. Veranderingen van bronnen en bezinkplaatsen kunnen zo de lange-termijnontwikkeling van slibconcentraties in

een estuarium beïnvloeden (zie ook het kader in hoofdstuk 4). Figuur 22 geeft de hoeveelheid slib die elk getij in het systeem heen en weer gaat (zwarte pijlen), maar geeft ook de netto hoeveelheid (rode pijlen) die jaarlijks wordt geïmporteerd, sedimenteert in de Bocht van Watum en wordt onttrokken uit de Eems-rivier. In de Dollard sedimenteert nagenoeg geen slib.



Figuur 22: Slibbalans gebaseerd op bronnen en bezinkplaatsen van slib. De netto jaarlijkse transporten (in rood) zijn gebaseerd op van Maren et al (2016). De zwarte getallen volgden uit de ontwikkelde modellen. De hoeveelheid slib die op enig moment in het Ems-estuarium aanwezig is, is volgens dezelfde modellen 0.3 miljoen ton. De bagger- en terugstortactiviteiten gebeuren als geheel binnen het deel 'Ems-estuarium' en verschijnen niet in deze balans.



Veranderingen in de bezinkplaatsen hebben de lange-termijnontwikkeling van slibconcentraties in Dollard, Middengebied en Buitengebied sterk beïnvloed. Het stelselmatig niet terugstorten van flinke hoeveelheden baggerslib heeft er tot in de jaren negentig voor gezorgd dat de slibconcentraties niet te sterk stegen, hoewel de bezinkmogelijkheden van slib op kwelders en platen veel minder waren dan in de voorgaande eeuwen.

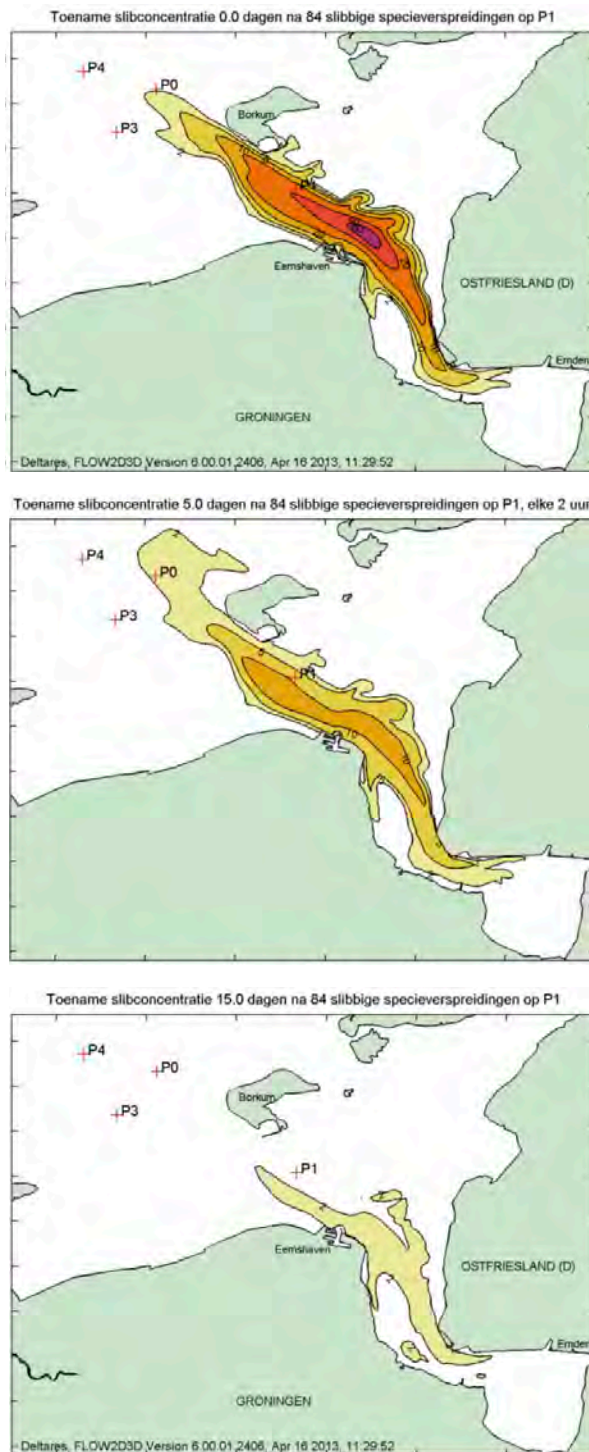
De bruto transporten van slib zijn zeer groot. De belangrijkste bruto slibbron is de Noordzee. Daarnaast is er een geringe slibaanvoer via de rivieren de Eems en de Westerwoldsche Aa en wellicht is er ook slibtransport mogelijk vanuit de oostelijke Waddenzee over het wantij naar het Buitengebied van het Eems-estuarium. De grootte van de laatste is echter onbekend.

Het samenspel van de beweging van het water en de bodemligging van platen en geulen bepaalt waar het slib tot rust kan komen en de tijd krijgt om tot op de bodem uit te zakken. Dat gebeurt bijvoorbeeld in de Dollard, op de smalle droogvallende platen langs de kusten van de Bocht van Watum en het Oost Friesche Gaatje en ook in een langzaam dichtslibbende geul zoals de Bocht van Watum en het Kerkeriet in de Dollard. Ook

een havenbekken of een opengemaakte polder zijn voorbeelden van bezinkplaatsen voor slib. Het slib kan ook weer verspreid worden, bijvoorbeeld door windgolven met een sterker eroderende werking op het plaatoppervlak of wanneer een haven voor onderhoud wordt uitgebaggerd.

Het terugstorten van gebaggerd slib uit geulen en havens is ook een bron. De totale hoeveelheid slib die gemiddeld per dag wordt opgebaggerd en gestort is substantieel, nl ca 8% van de totale hoeveelheid slib dat aanwezig is in de waterkolom van het estuarium. Figuur 23 illustreert hoe snel baggerslib dat wordt teruggestort voor de Eemshaven, zich door het getij verspreidt over het estuarium. Het meeste baggerslib blijft in het estuarium.





Figuur 23: Illustratie van de verspreiding van teruggestort baggerslib bij Eemshaven. De toename is tot 100 mg/l gedurende het terugstorten, 10-20 mg/l na 5 dagen en minder dan 5 mg/l na 15 dagen (Arcadis, 2013).

Een eerste schatting van het effect van het toevoegen of verwijderen van bezinkplaatsen is dat het effect van het onttrekken van 1 miljoen ton slib per jaar uit het Eems-estuarium een gemiddelde verandering in de slibconcentratie geeft van 10 tot 15 mg per liter. Door de snelle verspreiding maakt het nauwelijks uit waar het slib wordt onttrokken. De effecten op de slibconcentratie zijn echter niet overal gelijk, vanwege de slibgradiënt in het estuarium (zie ook hoofdstuk 6). In het minder troebele Buitengebied zal de reductie relatief het grootst zijn. Conform Figuur 10 zal een vermindering van de slibconcentratie in het Buitengebied een relatief grote stijging van de primaire productie in de waterkolom van het Buitengebied tot gevolg hebben.

Baggerhoeveelheden

Momenteel wordt jaarlijks tegen 4 miljoen ton (bijna 8 miljoen m³) slib (droge stof) verspreid in het Eems-estuarium (zie Tabel 2). Dit materiaal is afkomstig uit de haven van Delfzijl en uit de Eemshaven (respectievelijk ca. 0,9 en 0,7 miljoen ton), uit de vaargeul tussen Emden en de Noordzee inclusief het Vaarwater naar Emden (samen tussen de 2 en 2,5 miljoen ton). Modelberekeningen geven aan dat dit tijdens de stortperiode en de eerste weken erna tot een aanzienlijke lokale verhoging van de slibconcentraties nabij de stortlocaties leidt (zie Figuur 23).

Recente veranderingen in bezinkmogelijkheden voor slib

In de jaren '60 kwam er een belangrijke bezinkplaats voor slib bij. Door de economische groei werd onderhoud van havens en vaarwegen steeds belangrijker. In Duitsland koos men er al in 1952 voor om een deel van het bij Emden en in de Vaarweg naar Emden opgebaggerde materiaal niet terug te storten, maar te gebruiken voor



Baggerlocatie	Hoeveelheid slib in miljoen ton ds per jaar (gemiddeld over laatste jaren)
Eemshaven	0,7
Delfzijl	0,9 (grotendeels agitatie)
Vaarweg Emden	2,0 – 2,5
haven van Emden	0
Getijdenrivier Pogum – Stuw Herbrum	0,8 (aan land gebracht)

Tabel 2: Overzicht van huidige hoeveelheden gebaggerd slib in het Eems-estuarium (de gebaggerde hoeveelheid in de haven van Emden bedroeg vroeger ~ 0,8 miljoen ton slib per jaar).

grondverbetering van binnendijkse veenweidegebieden. Vanaf 1992 werden de contracten met de landbouwers in dat gebied geleidelijk afgebouwd totdat in 1997 deze praktijk tot het verleden behoorde. In de periode 1952 – 1997 werd tussen de 1,5 en 2,5 miljoen ton slib per jaar uit het estuarium verwijderd, waardoor de troebelheid van het water waarschijnlijk relatief laag is gebleven. In de periode 1992 - 1997 stopte niet alleen het slib onttrekken ten behoeve van grondverbetering, maar werd tegelijkertijd in het havenbekken van Emden niet meer gebaggerd. Het slib in de haven (een dok) wordt sindsdien 'dun gehouden' door het op te pompen en te beluchten. Het baggeren van het Vaarwater naar Emden ging gewoon door, waarbij de bagger wordt teruggestort in het systeem.

Het geleidelijk aan geheel stoppen met de omvangrijke onttrekkingen van slib kan goed hebben geleid tot een geleidelijke verhoging van de slibconcentraties.

De invloed van de getijdenrivier op het estuarium

Een andere belangrijke verandering in de jaren negentig was de sterke toename van de troebelheid in de Eems-rivier. De Duitse beheerder zag, vanwege de kosten, geen andere mogelijkheid dan de 0,8 miljoen ton slib die daar nu jaarlijks gebaggerd moest worden aan land te brengen.

Wat het netto effect van die verandering in de Eems-rivier op het Eems-estuarium is, is nog niet duidelijk. Een troebeler Eems-rivier zal door dispersie verhoogde troebelheid in de Eems-Dollard kunnen veroorzaken. Anderzijds wordt door de onttrekking netto 0,8 miljoen ton per jaar uit het estuarium naar de Eems-rivier getransporteerd. Dit slib is via het Eems-estuarium aangevoerd vanuit de Wadden- en Noordzee.



06. Conclusies en perspectieven



Samenvattend: wat bepaalt de slibconcentraties in de het Eems-estuarium?

Samenvattend is het zeer aannemelijk dat een niet-veranderd slibaanbod samen met de combinatie van 1) de afname van het oppervlak aan bezinkplaatsen sinds 1650 en 2) het starten (in 1952) en later weer stoppen (over de periode 1992-1997) met onttrekkingen van slib via haven- en vaargeulonderhoud door de Duitse

beheerder, een grote rol hebben gespeeld in de slibconcentraties van het Eems-estuarium gedurende de laatste halve eeuw. In Tabel 3 zijn de ontwikkelingen in bezinkplaatsen en onttrekkingen in de laatste eeuwen opgenomen (Van Maren et al., 2016). Daarnaast is het aannemelijk dat 3) vaarwegverruiming en -onderhoud verantwoordelijk is voor ordegruote 10% van de troebelheidstoename. Het effect is afhankelijk van de grootte van de ingrepen en daarmee in de tijd variërend.

Sediment bezinkplaats	1550-1820	1820-1920	1920-1960	1960-1994	1994-nu
Dollard	1,4 - 4,4	0,8 - 2,7	0,2 - 0,9	0	0
Bocht van Watum	-	0,2 - 0,4	0,2 - 0,4	0,2 - 0,4	0,4 - 0,6
Onttrekkingen	0	0,1	1,0	1,8	0
Totaal Eems-Dollard	1,4 - 4,4	1,1 - 3,2	1,4 - 2,3	2,0 - 2,2	0,4 - 0,6

Tabel 3: Verloop van de jaarlijkse sedimentatiehoeveelheden en onttrekkingen sinds 1550 in Mton ds/jaar

Als we het bovenstaande zetten tegenover de vijf in de inleiding aangehaalde mogelijke verklaringen voor eventueel toegenomen troebelheid kunnen conclusies worden gepresenteerd en moet een extra verklaring (stoppen met onttrekkingen) worden toegevoegd.

Met een aangepast sedimentbeheer kunnen de slibconcentraties positief worden beïnvloed. Om de kosten daarvan beheersbaar te maken is het nodig dat nuttige toepassingen van het zoute baggerslib gevonden worden.

Mogelijke verklaringen voor toegenomen vertroebeling	Conclusie t.a.v. invloed op troebelheid
Verkleining van het Eems estuarium en daardoor afnemende ruimte voor het bezinken van slib	Dit heeft in de afgelopen eeuwen na 1650 wel een belangrijke rol gespeeld, maar in de afgelopen 30 jaar niet meer. Zie hoofdstuk 5.
Bodemveranderingen tussen Eemshaven en Delfzijl, van een tweegeulensysteem naar een enkelvoudig geulsysteem	De vaarwegverdiepingen in het estuarium en in de getijdenrivier hebben de natuurlijke bodemverandering sinds het begin van de 20ste eeuw waarschijnlijk versneld. Daarnaast is het opwaartse slibtransport toegenomen. De bijdrage daarvan aan de toegenomen troebelheid is belangrijker in stroomopwaartse richting. In de Dollard is dit (kijkend naar Figuur 21) minimaal 10%. Zie hoofdstuk 4.
Vaarwegverruiming (verbreden en verdiepen) en meanders verminderen	Dit speelt in de Eems-rivier en de Vaarweg naar Emden een zeer grote rol. In de Eems-Dollard is dit een van de bodemveranderingen die bijdragen aan het toegenomen opwaarts transport (die als geheel tot 10% van de troebelheidstoename veroorzaakt). Zie vorig punt / hoofdstuk 4.
Aanleg en onderhoud van havens en verspreiden van baggerspecie	De aanwezigheid van de havens zorgt niet voor een verhoging van de troebelheid. Het storten van havenspecie in de hoofdgeulen heeft een tijdelijk en lokaal effect. Zie hoofdstuk 5.
Het stoppen met onttrekkingen van slib door gebaggerd materiaal niet langer op land te brengen	Dit is de belangrijkste oorzaak van de toename in troebelheid, ca 90 %. Via onttrekken van opgebaggerd materiaal uit de havens kan de troebelheid worden verminderd.
Veranderingen in concentraties in de Waddenzee en/of de Noordzee	Het is onzeker of er veranderingen in het slibaanbod zijn opgetreden via de oostelijke Nederlandse Waddenzee en/of de Noordzee en welke invloed deze hebben. De eerste signalen zijn dat die veranderingen er niet zijn.

Tabel 4: Mogelijke oorzaken van troebelheid en conclusies hierover





Per deelgebied:

In het Buitengebied van het Eems estuarium zijn het starten en later weer stoppen van de onttrekkingen van slib in het estuarium, samen met de slibconcentraties in de aangrenzende Noordzee en wellicht ook in de oostelijke Waddenzee via het wantij, de meest bepalende factoren voor de slibconcentraties. In de Waddenzee wordt, ondanks de historische afname van de bezinkplaatsen, nog steeds veel slib opgeslagen op het wad en op de kwelders. Het is niet waarschijnlijk dat de toename van het getij op de Eems-rivier van invloed is op de slibconcentraties in het Buitengebied.

Verder stroomopwaarts naar het Middengebied en de Dollard blijven dezelfde factoren (verkleining van het bezinkingsareaal, starten en later weer stoppen met onttrekkingen van slib) van belang. Van alle onttrekkingen is het stoppen met de onttrekkingen uit de haven van Emden van grotere invloed in het Middengebied en de Dollard dan in het Buitengebied. De modelstudies geven aan dat door verdieping van de vaarweg naar Emden de stromingen zodanig zijn veranderd dat de slibconcentratie in en nabij de Dollard ook daardoor zijn verhoogd. Het beschikbare slib wordt door de verdieping van de vaarweg effectiever in de richting van de Eems-rivier en de Dollard getransporteerd.

Voor het gehele Eems-estuarium geldt dat niet duidelijk is of de trend van toenemende troebelheid doorgaat bij ongewijzigd beleid. De aanpassing van het systeem aan de veranderde omstandigheden kan nog bezig zijn. Daarnaast wordt verwacht dat in de komende decennia de belangrijkste overgebleven bezinkplaats (de Bocht van Watum) opgevuld zal raken, waardoor de slibconcentratie kan toenemen. Volgens de bodemhoogtemetingen bezinkt er nu jaarlijks ca. 0,6 miljoen ton slib in de bocht van Watum.

De invloed van de troebelheid in de Eems-rivier op het estuarium is lastig te bepalen. In het *Vaarwater naar Emden en in de Eems-rivier* zijn de laatste twintig jaar grote toenames in de getijslag en de slibconcentraties geweest. De afnemende ruwheid door de hoge slibconcentraties heeft een versterkend effect gehad op de getijstromingen. Dat er jaarlijks ca. 0,8 miljoen ton uit de Eems-rivier wordt gebaggerd en aan land wordt gebracht (zie Tabel 2), beperkt wellicht de troebelheid van de Eems-Dollard, maar dat is op dit moment niet voldoende bekend.

Effect van maatregelen op de primaire productie

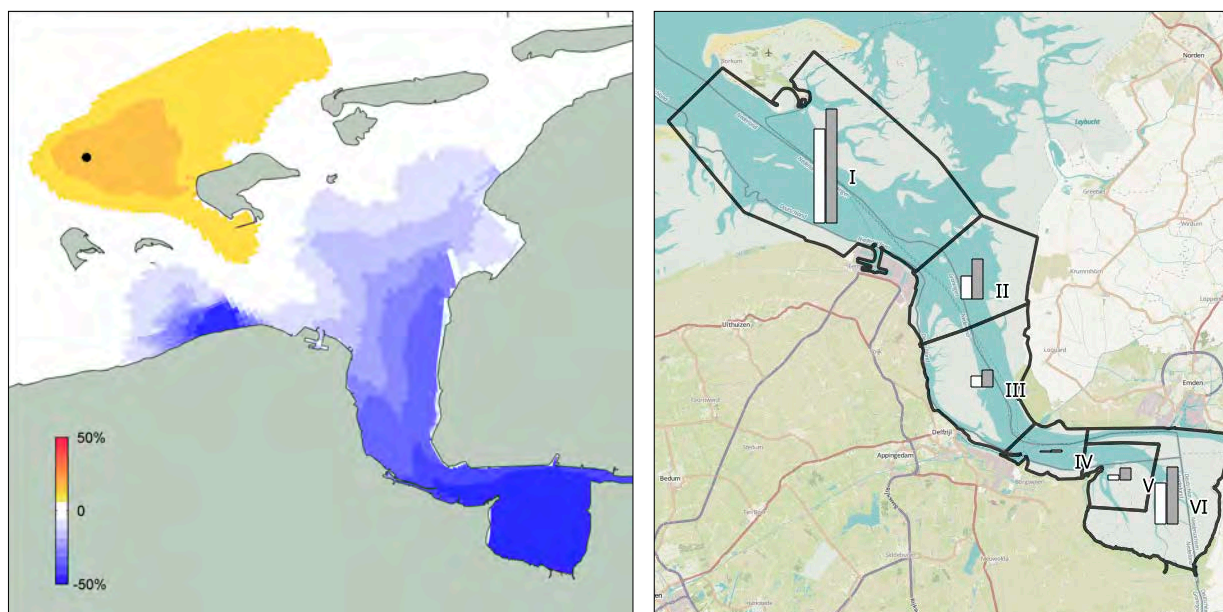
Maatregelen moeten gebaseerd zijn op het verkregen inzicht in de slibhuishouding omdat het lichtklimaat een grote invloed heeft op de primaire productie in het estuarium. Omdat een belangrijke reden voor de geconstateerde veranderingen van de slibconcentraties, de veranderingen in bezinkplaatsen en onttrekkingen is, wordt als eerste gezocht naar maatregelen waarmee gericht slib wordt onttrokken. In hoofdstuk 4 werd duidelijk dat de getijslag in het estuarium maar weinig veranderd is en dat ingrepen gericht op de getijslag voor het estuarium waarschijnlijk geen effect zullen hebben op de slibconcentraties. Daarnaast geldt dat we de slibconcentraties in de Noordzee en/of de Waddenzee niet kunnen beïnvloeden.

De effecten van 'onttrekken van opgebaggerd materiaal' is verkend met modelberekeningen. De linkerzijde van Figuur 24 is één van de modelresultaten en laat zien wat de verbetering in troebelheid zou kunnen zijn als al het slib dat wordt opgebaggerd uit alle havens en de vaarweg bij Emden (Tabel 2), wordt teruggestort op een locatie in de Noordzee (zwarte punt), buiten de invloedssfeer van het estuarium. De resultaten laten zien dat een reductie van 50% mogelijk is in de Dollard. Dit percentage wordt kleiner richting de monding.



Ook is berekend welk effect de verbetering van de lichtomstandigheden hierdoor heeft op de totale netto primaire productie (rechterzijde van Figuur 24). Deze neemt bijna 20% toe. Deze waarde is

een gemiddelde over de gebieden tussen de zwarte lijnen. Deze waarde is een onderschatting van het totale effect aangezien het Buitengebied groter is dan het gebied in Figuur 24.



Figuur 24: Resultaten van modelonderzoek van het effect van 'storten op een locatie op de Noordzee in plaats van de huidige stortplaatsen, van het door Nederland en Duitsland opgebaggerde slib'. Links: Procentuele verschillen in slibconcentraties tussen de huidige situatie en als de baggerstrategie wordt veranderd. Rechts: Totale netto primaire productie van de waterkolom per jaar per gebied in de huidige situatie (witte staven) en bij het scenario 'terugstorten op de Noordzee'.

Vanuit het perspectief van het estuarium is het van belang dat de huidige onttrekking van het in de Getijdenrivier opgebaggerde slib niet wordt gestopt. Stoppen zal zeer waarschijnlijk leiden tot een verdere stijging van de slibconcentraties op de getijdenrivier (zie bijvoorbeeld de sterke uitbreiding van het ETM tussen 1992/1993 en 2005/2006 in stroomopwaartse richting in Figuur 9). Via getijd dispersie heeft dat waarschijnlijk negatieve consequenties voor vooral het Middengebied en de Dollard. Maatregelen om de kwaliteit van de rivier vanuit Duitsland te verbeteren, zijn in ontwerpvorm vastgelegd in het Masterplan Ems 2015, en zullen verder worden ontwikkeld. De mogelijke effecten op de rest van het estuarium moeten nog bepaald worden.

De mogelijkheden voor verlaging van de troebelheid van het estuarium

Ander sedimentbeheer Eemshaven:

Het slib uit de Eemshaven wordt nu gestort in het relatief heldere Buitengebied, waar 80% van de totale (waterkolom plus droogvallende platen) primaire productie plaatsvindt. Door geen specie tijdens het groeiseizoen te storten, kan de primaire productie minder worden beïnvloed. Dit gebeurt echter al grotendeels. Door niet of verder weg te storten zal de slibconcentratie in het gehele estuarium substantieel afnemen (zie Figuur 24). Dit zal bovendien tot een afname van de benodigde baggerinspanning in de haven zelf leiden.



Ander sedimentbeheer vaarweg Emden

In het zeewaartse deel van de vaarweg wordt grotendeels zand gebaggerd. Vanaf Knock naar Emden wordt het opgebaggerde materiaal steeds slibrijker. Dit slib wordt nu door de Duitse beheerder zeewaarts gebracht, naar een stortplaats ter hoogte van Eemshaven, maar oostelijker. De belangrijkste verschillen met het terugstorten van de baggerspecie uit de Eemshaven zijn (i) dat er meer slib wordt verspreid en (ii) dat de huidige stortlocatie minder ver zeewaarts ligt. Als dit baggerslib niet meer in het estuarium wordt teruggestort, zal dit een sterkere verlaging van de troebelheid met zich meebrengen dan als het havenslib uit de Eemshaven niet meer wordt teruggestort.

Ander sedimentbeheer Delfzijl

Bij Delfzijl wordt momenteel het grootste deel van het slib dat uit het havenbekken verwijderd moet worden 'geagiteerd' of opgewoeld, zodat het met de ebstroom mee de haven uitstroomt. Het effect van agiteren op de vertroebeling is daarmee vergelijkbaar met storten bij de havenmond. Tien tot twintig procent van het havenslib wordt wel echt opgebaggerd en in de mond van de Dollard gestort. Door het slib uit de haven van Delfzijl niet terug te storten, zullen de slibconcentraties nabij de haven en in de Dollard afnemen. De sedimentatie zal op termijn ook afnemen, waardoor er uiteindelijk minder gebaggerd hoeft te worden.

Vergroten van oppervlak waar slib kan bezinken

Door het creëren van gebieden waar slib kan bezinken, bijvoorbeeld door het verleggen van dijken en/of het 'winnen' van gesedimenteerd slib, wordt de troebelheid in het gehele estuarium verminderd, net als bij 'niet meer in het estuarium storten'. Door de verlaging van slibconcentraties in het estuarium zal de totale baggerinspanning in havens en vaargeulen op termijn ook afnemen.

Hoe nu verder?

Met deze studie is veel inzicht gebundeld en zijn nieuwe inzichten verkregen in de samenhang tussen troebelheid, nutriëntenaanbod en de primaire productie van de waterkolom in het estuarium (Buitengebied, Middengebied en Dollard). Het is mogelijk om langs de route van de hier ontwikkelde gedachtegangen na te denken over maatregelen die de 'natuurwaarden', uitgedrukt in o.a. KRW-doelen en Natura2000-doelen, te vergroten. Geconcludeerd is dat als de troebelheid in delen of het hele gebied substantieel afneemt, de primaire productie toeneemt. Er zijn meestal voldoende nutriënten beschikbaar. Er is geen risico op het optreden van schadelijke algenbloeien omdat licht op de meeste plaatsen de limiterende factor zal blijven. Als de primaire productie in de waterkolom toeneemt door betere lichtcondities zal dit positieve effecten hebben op de voedselbeschikbaarheid voor alle andere organismen (wormen, schelpdieren, zoöplankton, kreeftachtigen, vissen, vogels en zeezoogdieren) die via het voedselweb afhankelijk zijn van de productie van voedsel aan de basis.

Door de baggerspecie uit de havens en vaargeulen (het gaat momenteel jaarlijks om 1,5 miljoen ton uit de Nederlandse havens en om 2 tot 2,5 miljoen ton uit het Duitse onderhoud van de Oostfriesche Gaatje en Vaarwater naar Emden) niet in het estuarium terug te storten kan een substantiële verlaging van de troebelheid bereikt worden. Door de verminderde troebelheid zal de sedimentatiesnelheid in de havens en vaargeulen ook verminderen, waardoor er minder hoeft te worden gebaggerd. Een dergelijke maatregel zal samen met Duitsland moeten worden uitgevoerd.

Om de kosten van ander beheer van opgebaggerd slib beheersbaar te maken, is het nodig dat nuttige toepassingen van het zoute baggerslib gevonden worden. Door het Rijk en het samen-



werkingsverband 'Ecologie en Economie in balans' is hiertoe reeds initiatief genomen.

Concluderende samenvatting

De troebelheid in het estuarium is de laatste decennia toegenomen door minder onttrekkingen en (in veel mindere mate) door verdieping van de vaargeulen zoals die naar Emden.

Uit de literatuur, het recente veldwerk van Imares en het modelonderzoek van Deltares blijkt dat door de troebelheid omlaag te brengen de netto primaire productie in het gehele gebied substantieel kan toenemen. Hoewel niet in dit kader onderzocht, wordt er wel verwacht dat de hele voedselpiramide hiervan zal profiteren. Gebleken is dat de belasting met nutriënten niet verminderd hoeft te worden, omdat het systeem grotendeels lichtgelimiteerd zal blijven. Door minder lichtlimitatie zullen nutriënten eerder (in Middengebied in plaats van Buitengebied) resulteren in algengroei, de basis van het voedselweb.

De maatregel met het grootste effect op de slibconcentraties in het estuarium (Buitengebied, Middengebied en Dollard) is het slib dat in de havens en de vaargeulen sedimenteert niet meer terug te storten in het systeem, maar uit het systeem te halen. Dit zal op termijn resulteren in zowel een verlaging van de slibconcentraties als een verlaging van de te baggeren hoeveelheden slib. Om de baggerspecie uit het systeem te halen zijn betaalbare nuttige toepassingen van zout baggerslib gewenst.

Aanbevolen wordt de KRW-doelen in de toekomst meer te richten op de ecologische kwaliteit van het gehele ecosysteem, waar naast de primaire producenten ook de rest van de organismen in samenhang de waarde krijgt toebedeeld die het verdient.



Achtergrondrapporten van deze studie

De rapporten (behalve 9) zijn beschikbaar via <http://kennisonline.deltares.nl>

- 1 Mud dynamics in the Het Eems estuarium, research phase 1, literature review mud and primary production
- 2 Mud dynamics in the Eems - Dollard, research phase 1 : working plan phase 2 and 3
- 3 Mud dynamics in the Eems - Dollard, research phase 2 : analysis existing data
- 4 Mud dynamics in the Eems- Dollard, phase 2 : setup hydrodynamic models
- 5 Mud dynamics in the Eems - Dollard, phase 2 : setup sediment transport models
- 6 Mud dynamics in the Eems estuary : set-up of primary production model
- 7 Mud dynamics in the Eems Estuary, phase 2 : model analysis
- 8 Mud dynamics in the Eems - Dollard, phase 2 : analysis soil samples
- 9 Eems -Dollard primary production research (volledig datarapport te vinden op <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/489709> en samenvattend rapport op <http://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/489710>)
- 10 Memo on scenario definition
- 11 Mud dynamics in the Eems- Dollard, phase 3 : scenarios for improvement



Gebruikte en geciteerde literatuur

- Baretta J.W., Ruurdij, P., 1988. Tidal flat estuaries. Simulation and analysis of the Ems estuary. Ecological Studies 71. Springer Verlag. 353 pp.
- Chernetsky, A., Schuttelaars, H., Talke, S., 2010. The effect of tidal asymmetry and temporal settling lag on sediment trapping in tidal estuaries. *OceanDyn.* 60, 1219-1241. <http://dx.doi.org/10.1007/s10236-010-0329-8>.
- Colijn F., 1982. Light absorption in the waters of the Ems-Dollard estuary and its consequences for the growth of phytoplankton and microphytobenthos. *Netherlands Journal of Sea Research*, 15 (2), 196-216.
- Colijn F., 1983 Primary production in the Ems-Dollard estuary. Ph. D. Thesis, Groningen, The Netherlands, 123 pp.
- Colijn F. & De Jonge V.N., 1984. Primary production of microphytobenthos in the Ems - Dollard Estuary. *Marine Ecology Progress Series*, 14, 185 - 196. doi: 10.3354/meps014185.
- Herrling, G., Niemeyer, H. D., 2008. Hydro- and Morphological Pressures and Impacts. Report of the European project HARBASINS, www.harbasins.org, 28 pp.
- Herrling, G., Elsebach, J., Ritzmann, A., 2014. Evaluation of Changes in the Tidal Regime of the Ems-Dollard and Lower Weser Estuaries by mathematical modelling. *Die Küste*, 81, p. 353-368.
- Jager, Z., Kolbe, Z., 2013. Wax and wane of *Zostera marina* on the tidal flat Hond - Paap/ Hund-Paapsand in the Ems estuary; examinations of existing data. Report NLWKN, 60 pp.
- de Jonge, V.N., 1983. Relations between annual dredging activities, suspended matter concentrations and the development of the tidal regime in the Ems estuary. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 40 (suppl. 1): 289-300.
- de Jonge, V.N., 1992. Physical Processes and Dynamics of Microphytobenthos in the Ems Estuary (The Netherlands), PhD Thesis, University of Groningen, 176 pp.



- de Jonge & D.J. de Jong, 1992. Role of tide, light and fisheries in the decline of *Zostera marina* L. in the Dutch Wadden Sea. Proceedings of the 7th International Wadden Sea Symposium, Ameland, The Netherlands. *Neth. Inst. Sea Res., Publication Series no 20*: 161-176.
- de Jonge, V.N., 1995. Wind-driven tidal and annual gross transport of mud and microphytobenthos in the Ems Estuary and its importance for the ecosystem. In: Dyer, K. and R. Orth (eds.), *Changes in fluxes in estuaries: implications from science to management*. International Symposium Series, Olsen and Olsen Publ., Fredensborg, DK. pp. 29-40.
- de Jonge, V.N., 2000. Importance of temporal and spatial scales in applying biological and physical process knowledge in coastal management, an example for the Ems estuary. *Continental Shelf Research* 20: 1655-1686.
- de Jonge, V.N., de Jong, D.J., 2002. 'Global Change' impact of inter-annual variation in water discharge as a driving factor to dredging and spoil disposal in the river Rhine system and of turbidity in the Wadden Sea. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 55: 969-991.
- de Jonge, V.N., Brauer, V.S., 2006. The Ems estuary. Changes in functioning and structure of a system under pressure, report for Rijkswaterstaat, RIKZ. 100 pp.
- de Jonge, V.N., Schuttelaars, H.M., van Beusekom, J.E.E., Talke, S.A., de Swart, H.E., 2014. The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 139: 46-59.
- Krebs, M., Weilbeer, H., 2008. The Ems-Dollard Estuary. *Die Küste* 74, 252-262.
- van de Kreeke, J., C.M. Day, H.P.J. Mulder, 1997. Tidal variations in suspended sediment concentration in the Ems estuary: origin and resulting sediment flux. *Journal of Sea Research* 38 (1997) 1- 16
- van Maren, D.S., van Kessel, T., Cronin, K., Sittoni, L. 2015A. The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research* 95, p. 1-14 <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2014.12.010>.
- van Maren, D.S., Winterwerp, J.C., Vroom, J., 2015B. Fine sediment transport into the hyperturbid lower Ems River: the role of channel deepening and sediment-induced drag reduction, *Ocean Dynamics*, DOI 10.1007/s10236-015-0821-2.
- van Maren, D.S., Oost, A.P., Wang, Z.B., Vos, P.C. 2016. The effect of land reclamations and sediment extraction on the suspended sediment concentration in the Ems Estuary. *Marine Geology*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.margeo.2016.03.007>
- Mulder, H.P.J., 2013. *Bagger- en stortgegevens Eems-Dollard estuarium voor de periode 1960-2011*, Rijkswaterstaat.
- Schuttelaars, H.M., de Jonge, V.N., Chernetsky, A., 2013. Improving the predictive power when modelling physical effects of human interventions in estuarine systems. *Ocean & Coastal Management* 79: 70-82. doi:10.1016/j.ocecoaman.2012.05.009
- Stratingh, G.A., Venema, G.A., 1855. *De Dollard of geschied-, aardrijks- en natuurkundige beschrijving van dezen boezem der Eems*. J. Oomkens, J. Zoon en R.J. Schierbeek, Groningen (reprint 1979), 333 pp.
- Van Veen, Joh., 1950. *Eb- en Vloedschaar Systemen in de Nederlandse Getijwateren* Tijdschrift Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap 67: 303-325.
- Vos P.C. & E. Knol, 2013. *De ontstaansgeschiedenis van het Dollardlandschap; natuurlijke en antropogene processen*. In: K. Essink (red.): *Stormvloed 1509, Geschiedenis van de Dollard*. Stichting Verdrongen Geschiedenis, Groningen, p. 31-47.
- Vos, P.C., 2015. *Origin of the Dutch coastal landscape. Long-term landscape evolution of the Netherlands during the Holocene, described and visualized in national, regional and local palaeogeographical map series*. PhD thesis, Utrecht University, Barkhuis, Groningen, 359 pp.
- Wang, L., 2010. *Tide Driven Dynamics of Subaqueous Fluid Mud Layers in Turbidity Maximum Zones of German Estuaries*. Thesis, University Bremen. 96 pp.

