



De verslibbing van het Eems-estuarium

In de afgelopen decennia is het ecologisch functioneren van het Eems-estuarium verslechterd door toenemende hoeveelheden slib. Om effectieve maatregelen te kunnen voorbereiden is onderzoek gedaan naar het gedrag van slib en naar de oorzaken van de hoge troebelheid. In dit artikel bespreken we de oorzaken van het veranderende slibgehalte, de effecten op de ecologie en ten slotte mogelijke oplossingsrichtingen om verdere vertroebeling te verminderen en de negatieve ecologische effecten ervan te reduceren.

Het Eems-estuarium op de grens tussen Nederland en Duitsland wordt gevormd door het mondingsgebied van de Eemsvier (figuur 1). Uit studies van o.a. de Jonge et al. (2014) en Van Maren et al. (2015a) blijkt dat de slibconcentratie in de waterkolom is toegenomen. Een hoge troebelheid kan leiden tot minder primaire productie (in de vorm van algen groei, de basis van de voedselketen; zie Colijn en Cadée, 2003), zuurstofloosheid (Talke et al., 2009) en een meer slibrijke bodem die de bodemfauna kan beïnvloeden (Compton et al., 2017). Door deze negatieve effecten op de ecologie wordt de verhoogde sliblast als een probleem beschouwd (IenM & Provincie Groningen, 2015). Kennis over de omvang, het ontstaan en het effect van de slibproblematiek is essentieel om duurzame maatregelen te kunnen treffen. Momenteel worden al verschillende maatregelen onderzocht en uitgevoerd (zie ook andere artikelen in deze uitgave). Dit artikel heeft tot doel de veranderingen in het slibgehalte in het Eems-estuarium te beschrijven, te verklaren en te koppelen aan ecologische veranderingen.

Het ontstaan van het Eems-estuarium

De huidige slibproblematiek is gerelateerd aan de langjarige bodemveranderingen in het Eems-estuarium. De huidige vorm van het Eems-estuarium is sterk beïnvloed door menselijk handelen (zie Vos & Knol, 2015). Tot het jaar 1500 was het Eems-estuarium veel smaller dan tegenwoordig en bestond de Dollard nog niet (figuur 2). Het estuarium lag in een groot kustveengebied en werd

geflankeerd door hoger gelegen oeverwallen, die onregelmatig overstromden. Vanaf de Middeleeuwen werden sloten aangelegd om de veengebieden te draineren en te gebruiken voor landbouw. Hierdoor daalde de bodem en nam het risico op overstromingen toe. Zo werden grote delen van het veengebied weggeslagen tijdens de Cecilia- (1412) en Damianusstormvloed (1509) en ontstonden o.a. de Dollard en de Duitse Ley Bocht (zie figuur 1). Aan het begin van de zestiende eeuw was het Eems-estuarium het grootst: de Dollard had een drie keer grotere oppervlakte dan tegenwoordig (figuur 2). Sindsdien is de omvang van het Eems-estuarium sterk afgenomen door sedimentatie van zand en slib. Invang van slib werd gestimuleerd om bruikbaar land te winnen - alleen al in de Dollard kon tot 1800 tussen de 1,6 en 3,2 miljoen m³ per jaar opslippen (Van Maren et al., 2016). De verlanding had twee belangrijke consequenties. In de eerste plaats werden grote hoeveelheden sediment direct aan het water onttrokken en vastgelegd. Daarnaast nam het getijvolume - en daarmee ook de stroomsnelheid tijdens eb en vloed - in het Eems-estuarium af. Door deze lage stroomsnelheden konden weer grote hoeveelheden sediment in het estuarium zeewaarts van de Dollard worden afgezet: 2 miljoen m³ per jaar tussen 1833 en 2014 (Pierik et al., 2019). Alleen in de periode 1953-1985 trad netto erosie op (4 miljoen m³/jaar als gevolg van de onttrekking van onderhoudsbaggerwerk en zandwinning). De laatste decennia is de Bocht van Watum sterk verkleind en is het Oostfriesche Gaatje

Eems-estuarium
slibprobleem
vertroebeling
primaire productie
ecologie

D.S. (Bas) van Maren
Deltares, Afdeling
Zee- en kustsystemen,
Boussinesqweg 1, 2629 HV
Delft & TU Delft,
bas.vanmaren@deltares.nl

H.J. (Harm Jan) Pierik
Universiteit Utrecht

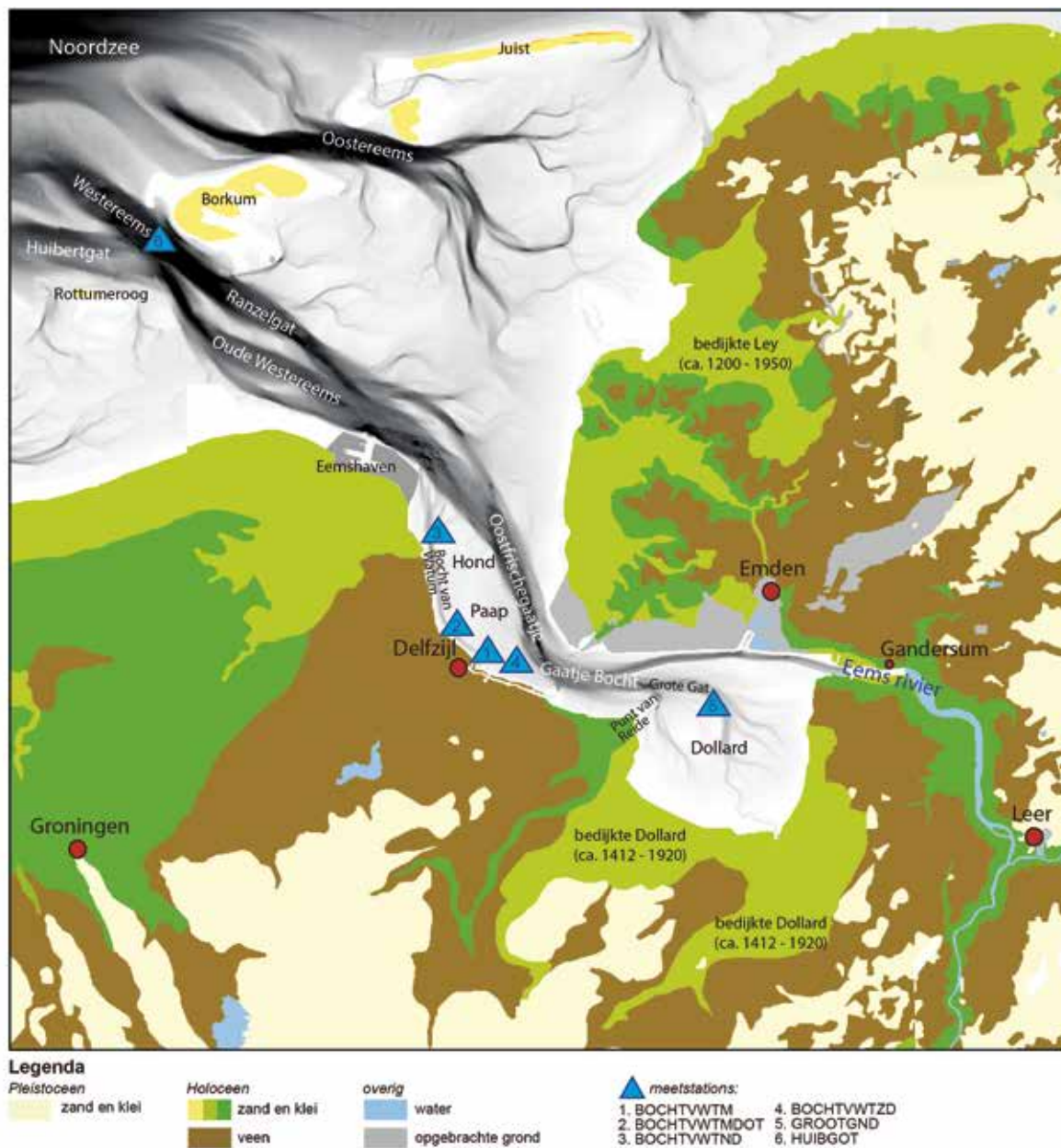
P.J.T. (Petra) Dankers
Royal HaskoningDHV

C. (Charlotte) Schmidt
Rijkswaterstaat; Water,
Verkeer en Leefomgeving

Foto: Provincie Groningen.
De Dollard bij Nieuwe
Statenzijl.

Figuur 1 Bodemligging in het Eems-estuarium met locaties van meetstations (figuur 3 en 4) en landafzettingen rondom het Eems-estuarium. Zee-afzettingen bestaan uit holoceen zand en klei, waarbij voor de meest recente afzettingen de datum van landaanwinningen is gegeven. Data: Geologische Übersichtskarte 1:200,000 en vaklodingen.

Figuur 1 Bathymetry of the Ems Estuary with locations of measurements stations in Figure 3 and 4, and terrestrial deposits surrounding the Ems Estuary. Marine deposits are composed of Holocene sand and clay, including the dates of the most recent land reclamations.



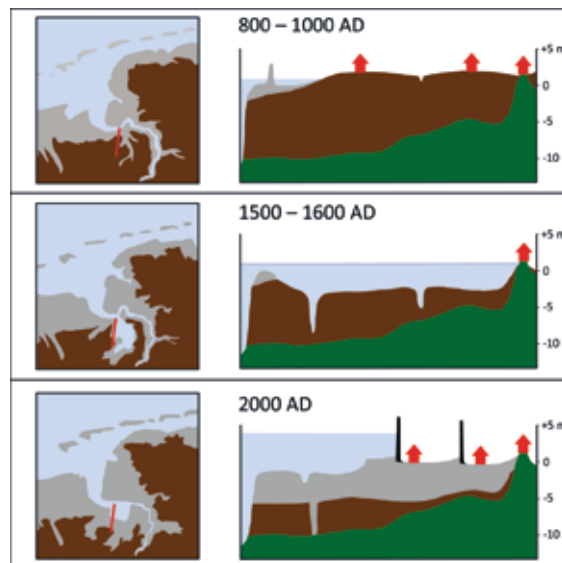
als enige toegangseuvel overgebleven (Van Maren *et al.*, 2016).

De huidige vorm van het Eems-estuarium wordt, naast deze historische ontwikkelingen, sterk gestuurd door harde, niet-erodeerbare lagen in de ondergrond. In de laatste ijstijden ontstonden, onder het gewicht van grote ijsmassa's, potklei- en keileemlagen. Daar waar deze lagen relatief ondiep liggen, kunnen de geulen niet diep insnijden en worden ze relatief breed, terwijl waar ze niet liggen de geulen een stuk dieper inschuren (Pierik *et al.*, 2019).

Veranderingen in troebelheid

Hieronder beschrijven we de vertroebeling van het Eems-estuarium nader voor de volgende vier deelgebieden: de monding, de Bocht van Watum, de Dollard en de Eemsvier (figuur 1). De belangrijkste systematische bron van informatie hiervoor bestaat uit de MWTL-metingen (Monitoring Waterstaatkundige Toestand des Lands) van Rijkswaterstaat, waarbij één of twee keer per maand (afhankelijk van het seizoen) een watermonster wordt genomen waarin de slibconcentratie wordt bepaald. Deze meetreeksen zijn begin jaren zeventig gestart. In de periode daarna zijn sommige meetlocaties echter verplaatst en zijn er veranderingen geweest in meet- en analysemethode. Daarom kunnen de gegevens tot 1990 alleen gebruikt worden om grote veranderingen in troebelheid te duiden; na 1990 kunnen ook meer subtiele veranderingen gekwantificeerd worden.

De slibconcentratie gemeten in de monding (station Huibertgat) verdubbelde tussen 1990 en 2010 van 0,013 tot 0,025 g/l. Na 2011 nam de concentratie echter af. Gemiddeld over de periode 1990-2020 is bij station Huibertgat geen sprake van een toename. Omdat dit station een zelfde meerjarige variatie vertoont als stations in de oostelijke Waddenzee (Herman *et al.*, 2018),



Figuur 2 Veen (bruin) en recente Holocene zand/kleiafzettingen (grijs) rond het jaar 800-1000, 1500-1600, en 2000, links als kaart en rechts als dwarsdoorsnede in de Dollard. De rode lijn in de kaart geeft de locatie van de dwarsdoorsnede weer. Het waterniveau (blauw) is extreem hoogwater (toenemend in de tijd). Oudere Holocene afzettingen in groen. Gebaseerd op Vos & Knol (2015).

Figure 2 Map and cross-section through the Dollard of peat (brown) and recent Holocene sand/clay deposits (gray) in the year 800-1000 AD, 1500-1600 AD, and 2000 AD. The location of the cross-section is indicated with a red line on the map. The water level (blue) is extreme high water (increasing in time). Older Holocene deposits in green. Both maps and cross-sections based on Vos & Knol (2015).

lijkt deze variabiliteit niet gekoppeld aan processen in het Eems-estuarium. In de Bocht van Watum zijn de concentraties tien keer hoger (figuur 3). De Bocht van Watum werd in de periode 1990-2020 bemonsterd bij twee stations: de Bocht van Watum Noord en de Bocht van Watum. De eerste liet tot 2011 een slibtoename zien van 60%, maar de metingen zijn sindsdien gestopt. De concentratie bij de Bocht van Watum veranderde in de periode 1990-2020 nauwelijks. In de periode 1972-1990 werden echter meer stations bemonsterd in de Bocht van Watum. De toename in slibconcentratie was op al die locaties groot (bijna een verdrievoudiging bij Bocht van Watum Zuid en een verdubbeling bij Bocht van Watum Oost en Noord), waardoor met zekerheid gesteld kan worden dat de troebelheid in de jaren '70 en '80 in de gehele Bocht van Watum sterk is toegenomen (figuur 4). Voor de Dollard is het beeld eenduidiger: de concentratie bij MWTL-meetpunt Grootte Gat is vergelijkbaar met

Figuur 3 Sedimentconcentratie gemeten aan het wateroppervlak tussen 1990 en 2020 (MWTL, 1-2 metingen per maand) met in zwart de jaargemiddelde concentratie in HuiBERTgat (HUIBGOT), Bocht van Watum Noord (BOCHTVWTND), Bocht van Watum (BOCHTVWTM) en Groote Gat Noord (GROOTGND). Bron: MWTL database.

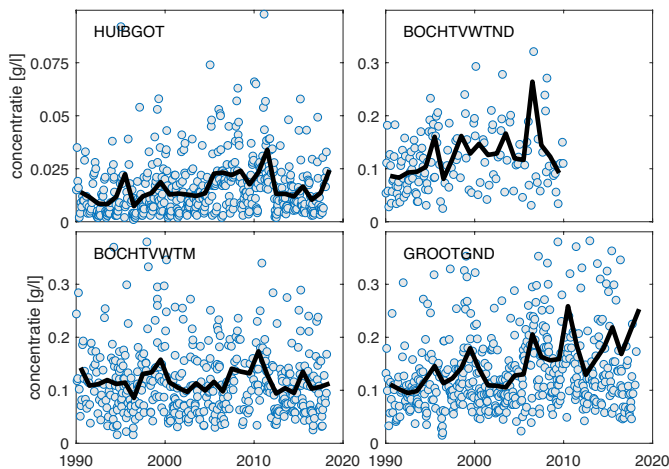
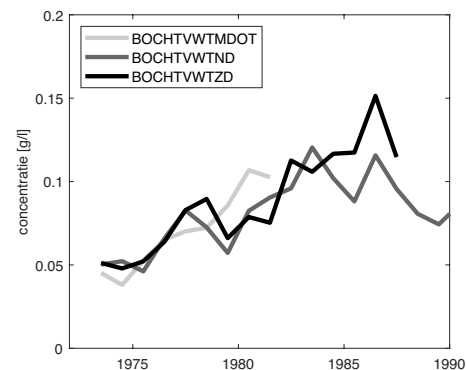


Figure 3 Sediment concentration measured near-surface between 1990 and 2020 (MWTL, 1 to 2 observations per month) with in black the yearly averaged concentration at HuiBERTgat (HUIBGOT), Bocht van Watum Noord (BOCHTVWTND), Bocht van Watum (BOCHTVWTM) and Groote Gat Noord (GROOTGND). Source: MWTL database.

Figuur 4 Jaargemiddelde sedimentconcentratie in de Bocht van Watum, gemeten tussen 1972 en 1990, in stations Bocht van Watum Oost (BOCHTVWTMDOT), Bocht van Watum Noord (BOCHTVWTND), en Bocht van Watum Zuid (BOCHTVWTZD). Bron: MWTL database.

Figure 4 Yearly averaged sediment concentration in the Bocht van Watum channel, measured between 1972 and 1990, at stations Bocht van Watum Oost (BOCHTVWTMDOT), Bocht van Watum Noord (BOCHTVWTND), and Bocht van Watum Zuid (BOCHTVWTZD). Source: MWTL database.



de concentratie in de Bocht van Watum en tegenwoordig twee keer zo hoog als in 1990. In de Eemsvier ten slotte is de slibconcentratie aan het wateroppervlak het hoogst: 100 keer hoger dan in het HuiBERTgat. Ook komt hier nabij de bodem vloeibaar slib voor met concentraties tot 30 g/l (Talke et al., 2009). Over de toename van vertroebeling in de Eemsvier bestaat geen discussie. In de jaren '50 bedroeg de slibconcentratie in de Eemsvier enkele honderden mg/l (Postma, 1961; De Jonge et al., 2014), dat is ruim 100 keer lager dan tegenwoordig.

Om de toename van deze slibconcentratie te verklaren is het belangrijk onderscheid te maken tussen de Eemsvier en het Eems-estuarium. Met name begin jaren negentig is de Eemsvier sterk verdiept om scheepvaartverkeer vanaf Papenburg mogelijk te maken. Het getij in de Eemsvier is altijd vloeddominant geweest (meer sedimenttransport naar binnen dan naar buiten), maar vóór het moment van de geulverdieping werd

de getijgedreven invoer van sediment waarschijnlijk gecompenseerd door uitspoeling tijdens hoge rivierafvoeren (Van Maren et al., 2015b). Door de verdieping is de getijslag (en daarmee het sedimenttransport) toegenomen en de uitspoeling verminderd, waardoor netto meer slib in de rivier achterblijft. Daarbij is door bezinking van slib de bodem gladder geworden, waardoor het getij nog gemakkelijker kan binnendringen en er nog meer slib naar binnen wordt getransporteerd (Winterwerp et al., 2013). Door deze positieve terugkoppeling is het slibprobleem in de Eemsvier steeds groter geworden en zeer persistent.

Voor de toename in de slibconcentratie in het estuariumdeel zijn de volgende verklaringen mogelijk:

1. De toename van vertroebeling in de Eemsvier heeft geleid tot een toename van vertroebeling in het Eems-estuarium, omdat het getij of hoge rivierafvoer troebel water het estuarium inspoelt.



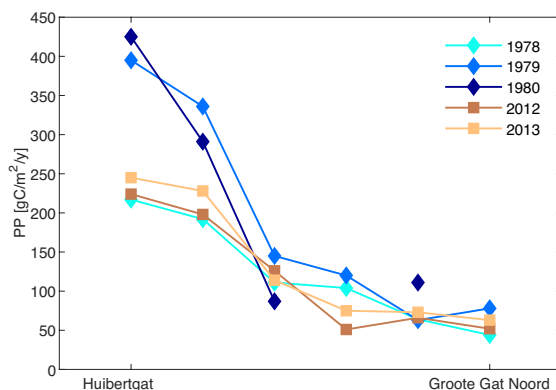
Figuur 5 Het Eems-estuarium. Foto: Joop van Houdt, Rijkswaterstaat.

Figure 5 The Ems estuary. Photo: Joop van Houdt, Rijkswaterstaat.

2. In het verleden werden grote hoeveelheden slib vastgelegd via natuurlijke aanslibbing en landaanwinningen, en tot 1994 zijn grote hoeveelheden sediment onttrokken. Na 1994 is het onttrekken van slib gestopt, wat waarschijnlijk tot een toename van de slibconcentratie heeft geleid (Van Maren *et al.*, 2016).
3. Het slib in het Eems-estuarium wordt aangevoerd vanuit de Waddenzee en de Noordzee. Het is waarschijnlijk dat deze aanvoer tegenwoordig groter is dan in de periode tot aan 1969, omdat destijds grote hoeveelheden slib konden worden ingevangen in landaankenningswerken langs de Groningse en Friese kust en in de inmiddels afgesloten Zuiderzee (1929) en Lauwerszee (1969; zie Van Maren *et al.*, 2016).
4. Jaarlijks wordt rond de 10 miljoen ton slib gebaggerd uit havens en vaarwegen en vervolgens weer teruggestort op een aantal daarvoor aangewezen verspreidingslocaties in het mondingsgebied (Van Maren *et al.*, 2015a). Deze bagger- en stortactiviteiten (in massa veel groter dan de onttrekkingen uit punt 2) zouden een belangrijke oorzaak van de toename in vertroebeling kunnen zijn (De Jonge, 1983; De Jonge *et al.*, 2014).
5. De geulen in het estuarium zijn uitgediept. Deze verdieping heeft niet tot een versterking van het getij ge-

Figuur 6 Primaire productie (PP) gemeten in 1978-1980 door Colijn & de Jonge (1984) en in 2012-2013 door Brinkman *et al.* (2014), op zes locaties in het Eems-estuarium tussen Huibertgat en Groote Gat Noord. Zie Brinkman *et al.* (2014) voor locaties en details.

Figure 6 Primary production (PP) measured in 1978-1980 by Colijn and de Jonge (1984), and in 2012-2013 by Brinkman *et al.* (2014), on 6 locations in the Ems estuary between Huibertgat and Groote Gat Noord. See Brinkman *et al.* (2014) for locations and details.



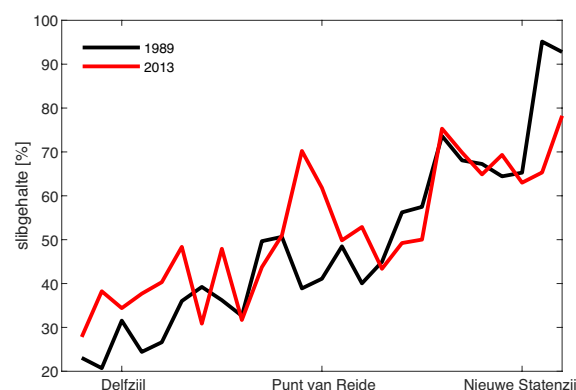
leid (zoals in de Eemsrivier) maar wel tot een toename van de zoutgedreven stroming aan de bodem, waarbij relatief troebel water het estuarium instroomt (Van Maren *et al.*, 2015a).

Waarschijnlijk heeft een combinatie van deze mechanismes geleid tot een toename van de slibaanvoer het estuarium in en daarmee tot een toename van de slibconcentratie (Dollard, Bocht van Watum). In de monding van het estuarium spelen bovengenoemde processen niet of veel minder en wordt de slibconcentratie vooral beïnvloed door die in de Waddenzee en de Noordzee.

Effecten op de ecologie

De belangrijkste ecologische effecten van hoge slibconcentraties zijn in de Eemsrivier gerelateerd aan het zuurstofgehalte en in het Eems-estuarium aan de primaire productie en de bodemfauna.

Het zuurstofgehalte in de Eemsrivier is, met name in de zomer, te laag. Een zuurstofgehalte lager dan 4.4 mg/l is in meer dan de helft van de gevallen zeer schadelijk voor vissen (Vaquer-Sunyer & Duarte, 2008). Vóór 1995 kwam een zeer laag zuurstofgehalte (< 5 mg/l) in de Eemsrivier tussen de 0 en 20 dagen per jaar voor; tussen 1995 en



2000 nam dit toe tot 50-100 dagen per jaar (Talke *et al.*, 2009). Dit is sterk gerelateerd aan de hoge slibconcentraties. Bacteriën gebruiken zuurstof om organisch materiaal in de waterkolom af te breken, maar hoge slibconcentraties onderdrukken de verticale menging van zuurstof waardoor de aanvoer van zuurstof wordt gelimiteerd. Omdat bacteriële decompositie sneller gaat bij hoge temperaturen treedt dit effect vooral op in de zomer.

Primaire productie in het Eems-estuarium is gemeten in de periode 1978-1980 door Colijn & de Jonge (1984) en in 2012-2013 door Brinkman *et al.* (2014) op zes meetpunten in het Eems-estuarium (zie figuur 6). Deze metingen laten zien dat in het mondingsgebied (de twee meest zeevaartse stations) de primaire productie met bijna 40% is afgenomen (van 309 gC/m²/jaar in 1978-1980 naar 224 gC/m²/jaar in 2012-2013). Deze afname is waarschijnlijk het gevolg van de afname van nutriënten in het water, vooral van fosfor (Brinkman *et al.*, 2014). Voor de vier landwaarts gelegen stations in het middengebied en de Dollard ligt dit anders. Hier is geen gebrek aan nutriënten en limiteert de hoge slibconcentratie de primaire productie. In de Dollard is de primaire productie erg laag en niet veranderd. Eén locatie in het mid-

dengebied nabij Knock (vierde meetpunt in figuur 6) laat een sterke reductie zien van de primaire productie, waarschijnlijk als gevolg van de toename van de slibconcentratie.

De totale biomassa aan bodemfauna in het Eems-estuarium is aanzienlijk lager dan in de rest van de Waddenzee (Compton *et al.*, 2013). Zeewaarts van Eemshaven is de totale biomassa sinds 1974 toegenomen, vooral door een toename in invasieve soorten (Compton *et al.*, 2017), maar in de Dollard is de biomassa afgenomen, waarschijnlijk door verminderde eutrofiëring (als gevolg van wijzigingen in het landbouwbeleid). In het middendeel van het Eems-estuarium is de totale hoeveelheid biomassa ook afgenomen en is een verschuiving vastgesteld van tweekleppigen (strandgaper, kokkel) naar slibtolerante bodemfauna-soorten zoals borstelwormen, slakken en het Wadkreeftje (Compton *et al.*, 2017). Deze verschuiving is in lijn met de gemeten toename van het bodemslibgehalte in het middendeel van het Eems-estuarium (figuur 7), gemeten in 1989 en 2013. Dit is erg hoog, tussen ongeveer 30% bij Delfzijl en ongeveer 80% bij Nieuwe Statenzijl in de Dollard (resultaterend in omvangrijke modderplaten, zoals te zien in figuur 5). Het slibgehalte in de bodem in het middendeel van het estuarium (tussen de Punt van Reide en Delfzijl) is toegenomen; in de Dollard (tussen de Punt van Reide en Nieuwe Statenzijl) is het gelijk gebleven of zelfs iets afgenomen.

Maatregelen ter verbetering

Op basis van de hierboven beschreven veranderingen kan gesteld worden dat het slibgehalte in de waterfase zeer sterk is toegenomen in de Eemsrivier, en in mindere mate in het middengebied en de Dollard. De primaire productie in het middengebied is lichtgelimiteerd,

maar ondanks een toename in de sedimentconcentraties niet sterk afgenomen sinds 1978/1979. Het slibgehalte in de bodem is in het middengebied iets toegenomen, waardoor waarschijnlijk een verschuiving is opgetreden in de bodemfauna-soortensamenstelling. De biomassa is laag vergeleken met de rest van de Waddenzee. Bij het definiëren van maatregelen om het slibgehalte te reduceren moet uitgegaan worden van de eerder besproken mechanismen die verantwoordelijk zijn voor de veranderingen in het slibgehalte (effect Eemsrivier, baggeren, vastleggen, verdiepingen).

In de Eemsrivier moeten maatregelen vooral gericht zijn op een afname van de vloeddominantie van het getij. Een mogelijkheid is om de sluisdeuren van de stormvloedkering bij Gandersum ('Tidesteuerung') deels gesloten te laten tijdens vloed, maar volledig te openen tijdens eb. Hierdoor wordt het slibtransport tijdens vloed gedempt, waardoor de sedimentimport afneemt. Een andere mogelijkheid die onderzocht wordt is het ontpolderen van gebieden langs de Eemsrivier. Dit heeft twee positieve effecten: het getij wordt minder vloeddominant en door bezinking in deze opengestelde gebieden wordt sediment aan het systeem onttrokken. Het is nog onduidelijk wat deze maatregelen betekenen voor de vertroebeling in het Eems-estuarium.

Maatregelen in het Eems-estuarium zijn sterk gericht op sedimentonttrekking of het vastleggen door sedimentatie. De leidende gedachte hierachter is dat in een natuurlijk en onbedijkt systeem grote hoeveelheden sediment worden afgezet (onttrokken) in de uitgestrekte intergetijdengebieden. In het huidige estuarium zijn bezinkplaatsen zeer beperkt door bedijkingen. De mogelijkheid van binnendijkse slibinvang wordt nu verkend in de polder Breebaart en de Groote Polder en die van buitendijkse slibsedimentatie in de Dollard. Daarnaast

wordt in de Kleirijperij gekeken naar hergebruik van ingewonnen slib (zie Haarman, dit nummer). De effectiviteit van deze maatregelen hangt af van de locatie en de beoogde doelen. Als het doel is om de slibconcentratie zoveel mogelijk te verlagen, is onttrekking zo ver mogelijk stroomopwaarts het meest efficiënt: hoe dichter bij de zee, hoe meer verversing met zeewater het effect van onttrekking tegenwerkt. Als het doel is om primaire productie in de waterkolom te verhogen, dan is het vaststellen van de locatie ingewikkelder. Onttrekken zou dan plaats moeten vinden op de locaties waar (1) de primaire productie lichtgelimiteerd is, (2) de slibconcentratie zodanig laag is dat onttrekken tot een substantiele verhoging van de hoeveelheid licht en daarmee van de primaire productie leidt, en (3) onttrekken een substantieel effect heeft op de slibconcentratie. Wanneer het doel is om zo snel mogelijk zoveel mogelijk slib in te vangen, is de Dollard de meest geschikte locatie. Hier zal een verlaging van de slibconcentratie in het water echter niet snel leiden tot meer primaire productie omdat de troebelheid ook na onttrekking relatief hoog zal blijven. Maatregelen gericht op het verhogen van de primaire productie zijn het meest efficiënt in het mid-

dendeel van het estuarium maar kunnen bij voldoende schaal ook effectief zijn in de Dollard, vanwege het uitstralende effect richting het middendeel. In plaats van baggerslib uit de havens en vaargeulen terug te storten zou dit direct onttrokken kunnen worden (zoals nu voor de Kleirijperij). Ten slotte kan de aanvoer van slib via de monding worden verminderd door langs de Waddenzee slib in te vangen.

Dit artikel is mogelijk gemaakt door het Rijkswaterstaat/ KRW-programma 'Onderzoek slibhuishouding Eems-Dollard' en het ED2050 programma 'Hydromorfologische verbetering Eems-Dollard'.

Summary

Siltation of the Ems Estuary

Bas van Maren, Harm Jan Pierik, Petra Dankers & Charlotte Schmidt

Ems estuary, siltation, turbidity, primary production, ecology

In this article we discuss the causes behind high mud concentrations in the Ems estuary, situated on the Dutch-German border. In addition we reflect upon its

impact on ecology and potential measures to reduce this impact. Over the last decades, sediment concentration in the inner, muddy parts of the Ems estuary has increased, but not in the mouth of the estuary. In the upstream tidal river this increase results from deepening. The increasing mud content in the estuary results from loss of natural sediment sinks and possibly the artificial deepening effects of the tidal river. Observations suggest that the pelagic primary production has decreased in the outer estuary. However, primary production here is not light-limited and seems to be more strongly influ-

enced by a reduction in nutrient availability rather than by changes in the suspended sediment concentration. The middle reaches of the estuary experienced an increase in mud content in the bed and saw a change in benthic fauna species composition, but to what extent these correlate cannot be established. The Dollard area has al-

ways been muddy and changes here are minor, but still experienced a decline in biomass. Measures aiming to reduce the suspended sediment concentration focus on reducing flood dominance of the tide in the tidal river and on extracting sediment from the estuary.

Literatuur

Brinkman, A.G., R. Riegman, P. Jacobs *et al.*, 2014. Ems-Dollard primary production research: Full data report. IMARES report C160/14.

Colijn, F. & V.N. De Jonge, 1984. Primary production of microphytobenthos in the Ems-Dollard Estuary. *Marine Ecology Progress Series* 14: 185-196.

Colijn, F. & G.C. Cadée, 2003. Is phytoplankton growth in the Wadden Sea light or nitrogen limited? *Journal of Sea Research* 49: 83- 93.

Compton, T.J., S. Holthuijsen, S., Koolhaas *et al.*, 2013. Distinctly variable mudscapes: distribution gradients of intertidal macrofauna across the Dutch Wadden Sea. *Journal of Sea Research* 82: 103-116.

Compton, T.J., S. Holthuijsen, M. Mulder *et al.*, 2017. Shifting baselines in the Ems Dollard estuary: A comparison across three decades reveals changing benthic communities. *Journal of Sea Research* 127: 119-132.

Herman, P.M.J., T. van Kessel, J. Vroom *et al.*, 2018. Mud dynamics in the Wadden Sea. Deltares, Report 11202177-000-ZKS-0011.

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 Science* 40 (Supplement 1): 289-300.

De Jonge, V.N., H.M. Schuttelaars, J.E.E. van Beusekom *et al.*, 2014. The influence of channel deepening on estuarine turbidity levels and dynamics, as exemplified by the Ems estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 139: 46-49.

Van Heuvel, T., 1991. Sedimenttransport in het Eems-Dollard estuarium, volgens de methode McLaren. Rijkswaterstaat, dienst Getijdewateren. Nota GWWS-91.002.

Van Maren, D.S., T. van Kessel, K. Cronin *et al.*, 2015a. The impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. *Continental Shelf Research* 95: 1-14.

Van Maren, D.S., J.C. Winterwerp & J. Vroom, 2015b. Fine sediment transport into the hyperturbid lower Ems River: the role of channel deepening and sediment-induced drag reduction. *Ocean Dynamics* 65: 589-605.

Van Maren, D.S., A.P. Oost, Z.B. Wang *et al.*, 2016. The effect of land reclamations and sediment extraction on the suspended sediment concentration in the Ems Estuary. *Marine Geology* 376: 147-157.

IenM & provincie Groningen, 2015. Economie en Ecologie Eems-Dollard in balans. Ministerie van Infrastructuur en Milieu en de provincie Groningen. Eindrapport MIRT-onderzoek.

Postma, H., 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research* 1: 148-190.

Pierik, H.J., F.S. Busschers, & M.G. Kleinhans, 2019. De rol van resistente lagen in de historische morfologische ontwikkeling van het Eems-Dollard estuarium vanaf de 19^e eeuw. Universiteit Utrecht, Departement Fysische Geografie.

Talke, S.A., H.E. de Swart & V.N. de Jonge, 2009. An Idealized Model and Systematic Process Study of Oxygen Depletion in Highly Turbid Estuaries. *Estuaries and Coasts* 32: 602-620.

Vaquer-Sunyer, R. & C. M. Duarte, 2008. Thresholds of hypoxia for marine biodiversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Oct 2008, 105(40): 15452-15457.

Vos, P.C. & E. Knol, 2015. Holocene landscape reconstruction of the Wadden Sea area between Marsdiep and Weser. Explanation of the coastal evolution and visualization of landscape development of the northern Netherlands and Niedersachsen in five palaeogeographical maps from 500 BC to present. *Netherlands Journal of Geosciences* 94(2): 157-183.

Vroom, J., D.S. van Maren, M. Ibanez *et al.*, 2014. Mud dynamics in the Ems-Dollard, phase 2: Analysis soil samples. Deltares, rapport 1205711-001-ZKS-0006.

Winterwerp, J.C., Z.B. Wang, A. van Braeckel *et al.*, 2013. Man-induced regime shifts in small estuaries - I: a comparison of rivers. *Ocean Dynamics* 63(11-12): 1293-1306.