



Implementatie / in gebruik

> Sedimentaire systeem van de Waddenzee

IDEA/EXPLORATION



PROOF OF CONCEPT



EXPERIMENT/PILOT



IMPLEMENTATION/IN OPERATION

INHOUD

INLEIDING
GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS
SCHEMATISCHE WEERGAVE
PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK
KENNISLEEMTES
LITERATUUR EN LINKS
DISCLAIMER

INLEIDING

Het Waddengebied is een van de grootste ononderbroken intergetijdengebieden ter wereld en sterkt zich uit langs de kusten van Nederland, Duitsland en Denemarken. Het gebied heeft een grote diversiteit aan dier- en plantensoorten, en vormt een belangrijke broedplaats en halte voor trekvogels. Hierdoor heeft het een significante betekenis voor de biodiversiteit op wereldschaal met als resultaat dat de Waddenzee in 2009 is aangewezen als Unesco Werelderfgoed. Dat het Waddengebied in vele opzichten uniek is, schept ook een verplichting voor verantwoord beheer van het gebied. Dit is wettelijk vastgelegd (Natuurbeschermingswet, Natura2000, Vogel- en Habitat richtlijn, KRW, PKB, EHS, OSPAR).



De Waddenzee trekt door haar bijzondere natuur en unieke landschap veel toerisme aan (jaarlijks 4 miljoen overnachtingen). Dit is de belangrijkste motor van de economie op de eilanden. Daarnaast bevinden zich meerdere havens (Harlingen, Eemshaven, Delfzijl) in het gebied, die samen met visserij zorgen voor economische activiteit. Gaswinning in het Waddengebied en het aangrenzende vasteland is een belangrijk onderdeel van de Nederlandse economie. In het Nederlandse deel van het Waddengebied wonen ca. 400.000 mensen.

De Waddenzee vormt door haar barrière-eilanden en ondiepe binnenzee een belangrijke buffer tegen golfaanval vanaf de Noordzee. Om bovenbeschreven functies, de ecologische waarde en de bufferende werking van het Waddengebied te behouden, hebben we kennis van het systeem nodig. Hoewel we al veel weten van processen die belangrijk zijn, weten we nog niet goed genoeg hoe het Waddengebied zich de komende eeuw zal gaan ontwikkelen op het gebied van de morfologie. We willen o.a. graag weten of de wadplaten kunnen meegroeien met relatieve zeespiegelstijging (incl. bodemdaling), zodat de bufferende werking en ecologische waarde behouden blijft. Bij welke (relatieve) zeespiegelstijging kunnen de wadplaten niet meer meegroeien? En als dit punt wordt bereikt, kunnen wij mensen het systeem dan een handje helpen? Hoe zullen de buitendelta's en opdringende geulen zich ontwikkelen? Dit zijn belangrijke vragen, die alleen beantwoord kunnen worden als we meer kennis van het systeemgedrag hebben. Hiervoor is onderzoek en monitoring van het systeem onontbeerlijk.

Het Deltaprogramma Waddengebied is opgezet om een integrale aanpak te ontwikkelen die de veiligheid van het Waddengebied tegen overstromingen moet waarborgen, nu en in de toekomst. Er wordt gekeken welke strategieën het meest kansrijk zijn om in de toekomst aan de veiligheidsopgave te kunnen blijven voldoen. Tegelijkertijd wordt er gekeken of het mogelijk is met deze strategieën ook de ecologie en sociaaleconomische waarde van het gebied te versterken. In het kader van het Deltaprogramma Waddengebied wordt ook een lange termijn (trilateraal) onderzoeksprogramma opgezet, gecombineerd met pilots en monitoring. Dit Deltafact focust op het sedimentaire systeem van het Waddengebied, en geeft een kort overzicht van de werking van het sedimentaire systeem, het lopende onderzoek in het kader van het Deltaprogramma Waddengebied en de geïdentificeerde kennisleemtes.

GERELATEERDE ONDERWERPEN EN DELTAFACTS

Trefwoorden: sedimenttransport, morfologie, getij, golfwerking

Deltafacts: **Effect van zandsuppleties op de kust en het wad**

SCHEMATISCHE WEERGAVE

De Waddenzee is een ondiepe binnensee, die wordt omsloten door eilanden en bedijkte Waddenzeekust. Tussen de eilanden bevinden zich diepe zeegaten, waardoor het getij vanaf de Noordzee naar binnen dringt. In de bekkens bevindt zich een vertakt stelsel van geulen, die zich uitstrekken tot aan de vastelandskusten en de wantijen. De wantijen zijn ondiepe, droogvallende gebieden, die een overgang tussen de bekkens vormen en waar stroomsnelheden laag zijn. Aan de Noordzeezijde van de zeegaten bevindt zich een buitendelta, een gebied met eveneens geulen en ondiepe en deels droogvallende platen. Op deze manier zijn de afzonderlijke bekkens in de Waddenzee min of meer begrensd en heeft elk bekken zijn eigen geometrie en bodemligging. Als gevolg van deze geometrie en bodemligging, wordt het getij vanaf de Noordzee verder vervormd. De vervorming kan ertoe leiden dat de getijslag in het bekken zowel toe als af kan nemen, afhankelijk van de invloed van de geometrie en de bodemwrijving. Bodemwrijving is het gevolg van de korrelgrootte en bodemvormen (zoals ribbels) en speelt vooral over lange afstanden een rol. De mate waarin de getijgolf wordt gedempt is weer afhankelijk van de waterdiepte en de stroomsnelheid. De getijslag voor de Noordzeekust neemt toe in de voortplantingsrichting van het getij met ongeveer 1.5m in het westen (bij Den Helder) tot ca. 2 m in het oosten (bij Schiermonnikoog).

De wind heeft naast het getij een belangrijke invloed op de waterbeweging in de Waddenzee. Lokaal worden golven opgewekt, waarvan de hoogte afhankelijk is van de windsnelheid, de afstand waarover de wind waait (de strijklengte) en de waterdiepte. Golven die op de Noordzee worden opgewekt, worden grotendeels gedempt op de buitendelta. Tijdens stormen kan de wind ook zorgen voor een sterke opzet van het water. Dit gebeurt grotendeels op de Noordzee, waar de opzet tijdens de stormvloed van 1953 bijvoorbeeld 3 meter bedroeg. In de Waddenzee kan het water nog enkele decimeters verder worden opgezet. Ook leidt wind tot eolisch transport van zand, waardoor duinen kunnen worden gevormd. De duinen zijn een belangrijke schakel in de bescherming tegen overstromingen en hierin is veel sediment vastgelegd.



Figuur 1. Satellietfoto van de westelijke Waddenzee (Bron: www.esa.int)

De waterbeweging in de Noordzee en Waddenzee bepaalt ook de sedimenttransporten. Ruimtelijke veranderingen in sedimenttransporten leiden tot veranderingen in de bodemligging. Zo wordt de buitendelta gevormd door de naar buiten lopende ebstream, die als gevolg van vertraging van de stroomsnelheden sediment neerlegt op de buitendelta. Dit sediment wordt tijdens vloed weer opgepakt en meegenomen de bekkens in. Op deze manier ontstaat uitwisseling van sediment tussen de Noordzeezijde van de eilanden en de bekkens. Deze uitwisseling hangt samen met een groter patroon waarbij sediment van de oostzijde van eilanden, via de buitendelta wordt doorgegeven aan de westzijde van het volgende eiland.

Golven zijn belangrijk voor het opwoelen van sediment, wat vervolgens door de getijstroming wordt meegenomen. In de bekkens vindt het meeste sedimenttransport plaats in de geulen. Als tijdens vloed de wadplaten overstroomd, vertraagt de stroming en wordt sediment op de wadplaten afgezet. Golven zorgen op deze platen weer voor het eroderen van sediment. Het is juist als gevolg van deze dynamiek dat de wadplaten kunnen bestaan. Op plekken waar de stroomsnelheden lager zijn, zoals bij de wantijen en op de kwelders, worden fijnere deeltjes afgezet. In de geulen zijn de grovere zandfracties te vinden.

Op de kwelders wordt het sediment extra goed vastgehouden door de vegetatie. Hierdoor worden kwelders steeds hoger. De meeste kwelders langs de vastelandskust zijn zo hoog dat ze nauwelijks nog overstromen en begroeid zijn met climaxvegetatie. Op de wadplaten kunnen algen(matten) een rol spelen in het vasthouden van sediment. Het aandeel zeegras in de Waddenzee is beperkt. Biota, zoals wormen en krabbetjes, kunnen door het omwerken van sediment er juist weer voor zorgen dat dit materiaal makkelijker erodeert.

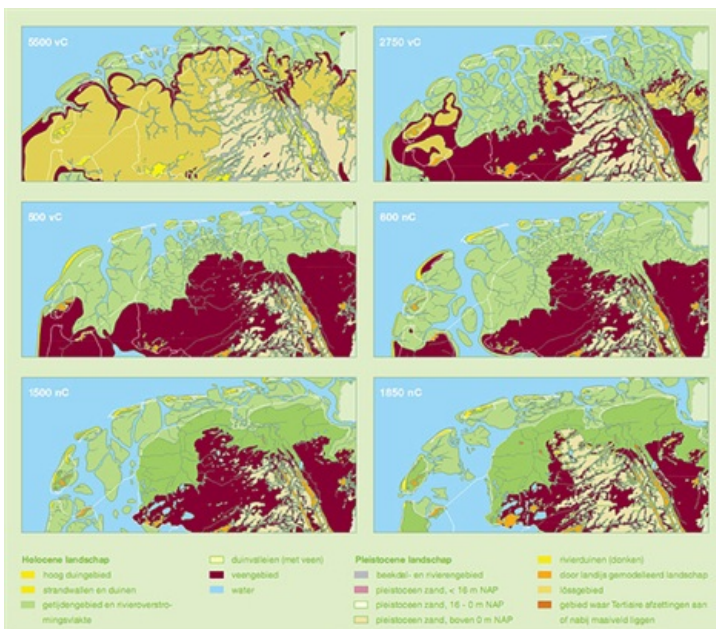


Figuur 2. Schematische weergave van de getijstromen en sedimentbewegingen in de Waddenzee. (Bron: *Hoe werkt het wad?*)

Omdat het Waddengebied, met de eilanden, buitendelta's, wadplaten en kwelders, als geheel een buffer vormt voor de stormaanval vanaf de Noordzee en het een ecologisch en economisch waardevol gebied is, willen we graag weten hoe de Waddenzee zich in de toekomst zal ontwikkelen. De bovengeschetste (natuurlijke) interacties zijn namelijk aan verandering onderhevig. Zo weten we dat de zeespiegel stijgt, prognoses van het KNMI voor zeespiegelstijging voor het jaar 2085 lopen uiteen van 25 tot 80 cm. De combinatie van zeespiegelstijging en bodemdaling wordt relatieve zeespiegelstijging genoemd. De relatieve zeespiegelstijging, en een mogelijke versnelling hiervan in de toekomst, beïnvloedt de waterbeweging en sedimenttransporten in de Waddenzee. De vraag is hoe de bodemligging zal veranderen als gevolg hiervan.

Daarnaast beïnvloeden wij de Waddenzee, bijvoorbeeld door te baggeren in de vaargeulen, te suppleren aan de eilandkusten, door inpolderingen en grootschalige afsluitingen van delen van bekkens (Zuiderzee, Lauwerszee) in het verleden, door gas te winnen onder de wadbodem met bodemdaling tot gevolg. Al deze ingrepen beïnvloeden in meer of mindere mate het hydrodynamische en sedimentaire systeem in het Waddengebied. Afsluitingen hebben een grote impact ten opzichte van de andere ingrepen. Om het Waddengebied op een verantwoorde manier te kunnen beheren, is het noodzakelijk te weten wat bovenstaande ingrepen en autonome ontwikkelingen zoals relatieve zeespiegelstijging precies voor invloed hebben. Hiervoor is onderzoek en monitoring nodig.

Veranderingen in het verleden kunnen veel inzicht geven in de werking van het systeem. De Waddenzee is geologisch gezien een relatief jong gebied, van ca. 7000 jaar oud. Een dergelijk systeem van barrière-eilanden met achterliggende bekkens met intergetijdenplaten, kan alleen bestaan als er een bepaalde balans is tussen (relatieve) zeespiegelstijging en aanvoer van sediment. Als de aanvoer van sediment groter is dan de relatieve zeespiegelstijging, zullen de bekkens zich opvullen en zal de Waddenzee verlanden. Als de aanvoer van sediment kleiner is dan de relatieve zeespiegelstijging, zullen wadplaten verdrinken en zullen op lange termijn zelfs de eilanden kunnen verdwijnen. De afgelopen 7000 jaar is de zeespiegelstijging ongeveer in balans geweest met de import van sediment. Er is nog veel debat gaande over de mechanismen die deze import bepalen. Een belangrijke vraag daarbij, met het oog op zeespiegelstijging en de gevolgen van menselijke ingrepen, of er een grens is aan de hoeveelheid sediment die het systeem kan importeren.



Figuur 3. Ontstaan van de Waddenzee (P.C. Vos, Deltares)

Tijdens grofweg het afgelopen millennium zijn menselijke ingrepen een steeds grotere invloed gaan spelen in het systeem. Dat begon met het indijken van kweldergebieden in oude inbraakgebieden, die nog maar weinig overstromden. Door aanslibbing van kwelders komen deze steeds hoger te liggen, en konden ze uiteindelijk gemakkelijk worden ingedijkt. Hierdoor werd de begrenzing van de bekkens steeds verder noordwaarts opgeschoven. Vanaf de 17^e eeuw werd kweldervorming zelfs actief gestimuleerd door het graven van greppels, die zorgden voor een snelle ontwatering van de kwelders bij eb. Vanaf de jaren '30 van de vorige eeuw werd kweldervorming actief gestimuleerd door de plaatsing van rijshouten dammetjes. Deze zijn ook nu nog voor de vastelandskusten aanwezig.

De afsluiting van de Zuiderzee werd voltooid in 1932 door de constructie van de Afsluitdijk. Overstromingen door opstuwning van water tijdens stormen in de relatief ondiepe Zuiderzee waren de belangrijkste motivatie voor afsluiting. Daarnaast werd een groot zoetwaterbekken gecreëerd en werden grote polders aangelegd. Door de afsluiting, werden de bekkens van het Marsdiep en de Vlie verkleind en nam de getijslag in deze bekkens toe. De 'zandhonger' van de Waddenzee die hierdoor is veroorzaakt, is nog steeds niet gestild. De bekkens zijn zich nog steeds aan het aanpassen aan de afsluiting, en dit proces zal zich ook in de toekomst nog ongeveer een eeuw voortzetten. Iets vergelijkbaars, maar op kleinere schaal, is gebeurd door de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. De buitendelta's en aangrenzende kusten zijn tot nu toe een belangrijke bron van sediment geweest om de aanpassing aan de nieuwe situatie te faciliteren. Hierdoor zijn de buitendelta's kleiner geworden. De kusten van Noord-Holland, Texel, Terschelling en Ameland worden gesuppleerd om de kusten op z'n plaats te houden en daarmee de erosie te mitigeren. Het afsluiten van delen van bekkens en het inpolderen van kweldergebieden (ook op grote schaal in de Dollard) heeft er ook toe geleid dat gebieden met relatief lage stroomsnelheden, waar veel fijn sediment werd afgezet, aan het systeem zijn onttrokken. Door relatieve zeespiegelstijging komt er extra accommodatieruimte op de kwelders beschikbaar, waar slib kan bezinken. Wat voor invloed deze factoren precies hebben op de slibhuishouding in de Waddenzee is onderwerp van onderzoek.

Klimaatverandering kan naast zeespiegelstijging ook leiden tot andere neerslag- en droogteperiodes. Als de hoeveelheid neerslag toeneemt of de bui-intensiteit toeneemt, heeft dit invloed op het debiet wat in de Waddenzee wordt gespuid (o.a. bij Kornwerderzand en Den Oever). Het effect van neerslag en spui volumes op dichtheidsstromingen en sedimenttransporten in de Waddenzee wordt onderzocht (Burchard et al. 2008).

PRAKTIJKERVARING EN LOPEND ONDERZOEK

Behalve dat kwelders een 'sink' vormen voor fijn sediment, spelen ze een rol in de veiligheid tegen overstromen, door de demping van golven voordat ze de dijk bereiken. Golven breken onder maatgevende omstandigheden door de beperkte waterdiepte boven de kwelder, hierdoor neemt de golfhoogte af. De rol van bodemwrijving door vegetatie is onder maatgevende omstandigheden klein, en speelt alleen over lange afstanden een rol. Wel zorgt de vegetatie ervoor dat de erosie onder maatgevende omstandigheden klein is. Vanuit ecologisch oogpunt is niet een hoge, brede kwelder interessant, maar juist het dynamische gedrag waarbij de kwelder zich steeds weer verjongt (en dus lager wordt). Dit is een spanningsveld als kwelders in toenemende mate ingezet gaan worden ten behoeve van de veiligheid. Binnen het Deltaprogramma Waddengebied is veel onderzoek gedaan naar de toegevoegde waarde van kwelders voor de veiligheid.

Het sedimentaire systeem in de Waddenzee, met eilanden, buitendelta's, platen en kwelders vormt een buffer voor de golfaanval vanaf de Noordzee op de dijken die aan de Waddenzee grenzen. Hiermee dient het Waddensysteem in de preventie-laag volgens de strategie Meerlaagsveiligheid. Binnen het Deltaprogramma is gekeken naar de mogelijkheden om ook meer in te zetten op laag 2 en 3 van de Meerlaagsveiligheid, in plaats van alleen aan preventie te werken, maar hier is voornamelijk weinig draagvlak voor.

Om te monitoren wat er in de toekomst zou kunnen veranderen in het Waddengebied, wordt binnen het Deltaprogramma Waddengebied een adaptief monitoringsplan opgezet. Hierin wordt geïnventariseerd welke monitoring nodig is om veranderingen tijdig te signaleren, en wordt gekeken hoe pilots kunnen worden ingezet om met intensieve monitoring ons

stroominzicht te vergroten. Voor onderzoek en monitoring van het Waddengebied wordt intensief samengewerkt met Duitsland en Denemarken (trilateraal onderzoeksprogramma, TMAP).

Samen met de Deltaprogramma's Kust en Zuidwestelijke Delta, werkt het Deltaprogramma Waddengebied aan de 'Beslissing zand'. Hierin wordt gekeken hoe de Nederlandse kust nu en in de toekomst de veiligheid tegen overstromen kan waarborgen, en tegelijkertijd hoe de functies in het kustgebied (ecologie, recreatie, visserij en havens) gehandhaafd en verder ontwikkeld kunnen worden. Het belangrijkste instrument hiervoor zijn de suppleties. Pilotsuppleties kunnen gebruikt worden om meer inzicht te krijgen in het gedrag van suppleties en voor het optimaliseren van suppleties. Ze vormen een belangrijk onderdeel van het onderzoek en de monitoring die nodig is om de kust op een uitgekende manier te beheren en onderhouden.

De kennis die binnen het Deltaprogramma Waddengebied is opgedaan vormt input voor het nieuwe programma Kunstgenese 2.0. In Kunstgenese 2.0, wat tot 2020 zal lopen, zal kennis worden samengebracht en ontwikkeld, met een brede focus. Er zal kennis worden ontwikkeld voor het gehele Nederlandse zand-delende kuststelsel, de veiligheid en het beheer en de invloed van klimaatverandering hierop.



KENNISLEEMTES

Windgedreven stroming en windgolven zijn belangrijk in de Waddenzee, o.a. door hun eroderende invloed op de wadplaten. De impact van deze processen is nog niet goed begrepen. Kennis van processen tijdens stormen is belangrijk als in de toekomst het stormklimaat gaat wijzigen, bijvoorbeeld omdat stormen uit een andere richting komen, of wijzigen in kracht of frequentie. We weten nog weinig van de sedimenttransporten tijdens stormen. Deze kunnen belangrijk zijn voor de uitwisseling tussen bekkens. Ook weten we niet goed wat de impact van stormen op de buitendelta's is.

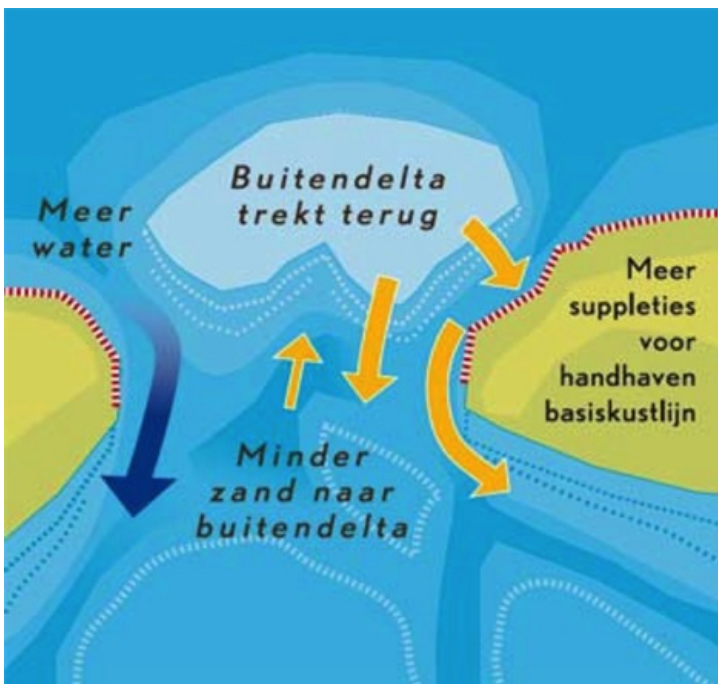
Wat betreft sedimenttransporten is al aangegeven dat een onderscheid moet worden gemaakt tussen fracties, op z'n minst tussen zand en slib. Er is nog weinig bekend over import van slib en van de invloed van de afsluitingen en relatieve zeespiegelstijging op de slibhuishouding. Onderzoek naar ruimtelijke en temporele patronen inclusief veranderingen in de slibdynamiek kunnen belangrijke informatie leveren over de ontwikkeling van het morfologische systeem.

In het trilaterale onderzoeksprogramma zijn in samenwerking met het Deltaprogramma Waddengebied een aantal onderwerpen aangewezen waar op gefocust zal worden. Het betreffen de buitendelta's, de ontwikkeling van de bekkens, de sedimentbalansen van de eilanden en het migreren van geulen.

Rondom de buitendelta's zijn ook nog veel processen niet bekend. We weten niet precies of deze bij de Nederlandse Waddenzee ook volledig kunnen verdwijnen en hoe de golf- en getijvoortplanting verandert als de buitendelta's verder verkleinen of zelfs verdwijnen. Ook weten we niet welke processen de (pseudo) cycliciteit van buitendelta's veroorzaken.

Wat betreft de ontwikkeling van de bekkens is de balans tussen relatieve zeespiegelstijging en de aanvoer van sediment van grote invloed op de instandhouding van het sedimentaire systeem van de Waddenzee in haar huidige vorm. Met betrekking tot zeespiegelstijging is het belangrijk om te weten wat de kritieke grens voor (relatieve) zeespiegelstijging is, m.a.w. bij welke zeespiegelstijgingssnelheid kunnen de wadplaten niet meer meegroeien? En welke factoren zijn van invloed op deze meegroeisnelheid? Als we meer weten over de interactie tussen platen en geulen, kunnen we ook beter begrijpen hoe platen kunnen meegroeien met zeespiegelstijging.

Aan de ene kant is zeespiegelstijging van invloed op het sedimentaire systeem. De andere kant van de balans wordt gevormd door de aanvoer van sediment. Als er meer kennis wordt ontwikkeld over het effect van suppleties op het meegroeivermogen van de Waddenzee, kan worden gekeken hoe de kritieke grens van zeespiegelstijging mogelijk kan worden opgerekt met behulp van menselijke ingrepen. Nu wordt voornamelijk op de vooroever gesuppleerd, maar suppleties op de buitendelta's en mogelijk zelfs in de Waddenzee kunnen ons veel leren over sedimenttransportprocessen en het meegroeivermogen van de Waddenzee. Het is waarschijnlijk dat in de toekomst een buitendeltasuppletie wordt uitgevoerd als pilot. Ook de interactie tussen geulen en platen is van belang voor het meegroeivermogen van de wadplaten en hier dit is ook onderwerp van onderzoek.



Figuur 4. Mogelijke effecten van zeespiegelstijging op buitendelta's en eilanden. (Bron: *Hoe werkt het wad?*)



Figuur 5. Buitendeltasuppletie (Bron: *Deltaprogramma Waddengebied, 2014*)

Netto sedimenttransporten door de zeegaten zijn niet goed bekend, doordat metingen (van bruto sedimenttransporten) vrijwel ontbreken. Ook is het onbekend wat de sedimenttransportcapaciteit van de zeegaten is, d.w.z. de maximale hoeveelheid sediment die netto per tijdseenheid door het zeegat kan worden aangevoerd. De sedimenttransporten hebben een grote variatie in de tijd en in de ruimte. Het relatief kleine verschil tussen de ingaande en uitgaande bruto transporten vormt het netto transport. Een relatief kleine fout in de bepaling van de bruto transporten kan dus grote invloed hebben op de netto transporten. Sedimentbalansstudies geven een eerste inschatting van de netto import per bekken, op basis van de gemeten bodemliggingen (vaklodgingen data). De sedimentbalansstudies gaan uit van een vaste begrenzing van de bekkens. We weten dat wantijen van positie kunnen veranderen, en dat die invloed heeft op de grootte van de bekkens. Dit heeft ook weer invloed op de hydrodynamica, en daarmee de sedimenttransporten en uiteindelijk zelfs het meegroeivermogen van de bekkens. De aanname dat de begrenzing van de bekkens vast is, introduceert dus een onnauwkeurigheid als de balansen worden vertaald naar sedimenttransporten. Daarnaast is in de sedimentbalansstudies vaak geen onderscheid gemaakt tussen zand en slib, terwijl deze op verschillende plaatsen worden neergelegd. De gemeten bodemliggingen waarop de sedimentbalansen gebaseerd zijn, bevatten een grote meetfout t.o.v. de netto sedimenttransporten.

De wantijen vormen een (zachte) begrenzing van de bekkens. De positie en hoogte kunnen veranderen, en dit beïnvloed ook het transport over de wantijen. De uitwisseling tussen de bekkens, het sedimenttransport over de wantijen, is slecht gekwantificeerd. We weten nog niet goed welke mechanismen de uitwisseling beïnvloeden en wat het effect is van stormen op het transport van sediment over de wantijen.

Zoals aangegeven geven sedimentbalansen inzicht in de ontwikkeling van het sedimentdelende systeem. In de meeste sedimentbalansen zijn de eilanden niet meegenomen, terwijl hierin grote hoeveelheden sediment liggen opgeslagen. De processen en factoren die uitwisseling van sediment tussen voeroever, strand en duinen bepalen moeten onderzocht worden, evenals ordegrrootte van eolisch transport en transport bij washovers.

Het migreren van geulen zowel bij buitendelta's als in de bekkens kan direct een bedreiging vormen voor de veiligheid tegen overstromen. Meer inzicht in het gedrag van migrerende geulen bij dijken, de risico's voor stabiliteit van dijken en mogelijke effectieve ingrepen als een geul te dicht bij een dijk komt te liggen zijn belangrijke onderzoeksvragen met betrekking tot de veiligheid.

LITERATUUR EN LINKS

- Bazelmans, J., van der Meulen, M., Weerts, H. & Vos, P.C. (2011). Atlas van Nederland in het Holoceen. Landschap en bewoning vanaf de laatste ijstijd tot nu. Uitgeverij Prometheus/Bert Bakker.
- Burchard, H., Flöser, G., Staneva, J. V., Badewien, T. H. and Riethmüller, R. (2008). [Impact of density gradients on net sediment transport into the Wadden Sea](#), J. Phys. Oceanogr., 38, 566-587.
- Dastgheib, A., Roelvink J.A. & Wang, Z.B. (2008). [Long-term Process-based Morphological Modeling of the Marsdiep Tidal Basin](#), Marine Geology, doi:10.1016/j.margeo.2008.10.003.
- Deltacommissie (2008). [Samen werken met water. Een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst. Bevindingen van de Deltacommissie 2008.](#)
- Dijkema, K.S., van Duin, W.E., Dijkman, E.M., Nicolai, A., Jongerius, H., Keegstra, H., van Egmond, L., Venema, H.J. & Jongsma, J.J. (2011). [Vijftig jaar monitoring en beheer van de Friese en Groninger kwelderwerken: 1960-2009.](#) Werkdocument 229 Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu Wageningen.
- Elias, E. (2006). [Morphodynamics of Texel Inlet](#). Thesis Delft University of Technology / WL Delft Hydraulics; IOS Press Amsterdam, 261 pp.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. & De Ronde, J. (2012). [Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century.](#) Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw, 91.
- KNMI (2014). [KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie](#), KNMI, De Bilt, 34 pp.
- Kragtwijk, N.G, Zitman, T.J., Stive M.J.F. & Wang, Z.B. (2004). [Morphological response of tidal basins to human interventions](#), Coastal Engineering, 51 (2004) 207-221.
- Louters, T. & Gerritsen, F. (1994). [Het mysterie van de Wadden, Hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging](#), Rapport RIKZ-94.040.
- Min. EL&I en Min. I&M (2012). [Hoe werkt het wad?](#), Brochure Deltaprogramma Waddengebied.
- Min. I&M en Min. EZ (2013). [Deltaprogramma Waddengebied](#). Bijlage A8. Deltaprogramma 2014.
- Min. I&M en Min. EZ (2014). Deltaprogramma Waddengebied. [Synthesedocument Waddengebied](#). Achtergronddocument B10.
- Nichols, M.M. (1989). [Sediment accumulation rates and relative sea-level rise in lagoons](#). Marine Geology 88, 201-209.
- Oost, A.P. (1995). [Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet; a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas and drainage basins.](#) PhD-Thesis, Utrecht, Geologica Ultraiectina, 126, 518 pp.
- Oost, A.P. & Kleine Punte, P.A.H. (2004). [Autonome morfologische ontwikkeling Westelijke Waddenzee. Een doorkijk naar de toekomst](#), Rapport RIKZ/2004.021.
- Oost, A.P., Wang, Z.B., de Groot, A.V. & van der Valk, L. (in prep.). Preparing for climate change: an adaptive strategy for safety. Plan 2014-2027 in cooperation with Denmark and Germany: Managing en Predicting the Wadden Sea Morphodynamics. Deltares report 1208855.
- Sha, L.P. (1989). [Cyclic morphologic changes on the ebb-tidal delta, Texel Inlet, Wadden Sea](#), The Netherlands, Geologie en Mijnbouw, 68, 35-48.
- Van der Spek, A.J.F. (1994). Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Thesis, Utrecht University.
- Van Dongeren, A.R. & de Vriend, H.J. (1994). [A model of morphological behaviour of tidal basins](#), Coastal Engineering 22: 287-310.
- Van Duren, L., Winterwerp, H., van Prooijen, B., Ridderinkhof, H. & Oost A. (2011). [Clear as Mud: understanding fine sediment dynamics in the Wadden Sea – Action Plan](#). Waddenacademie.
- Van Goor, M.A., Zitman, T.J., Wang, Z.B. & Stive, M.J.F. (2003). [Impact of sea-level rise on the morphological stability of tidal inlets](#), Marine Geology, Volume 202, issues 3-4, pp.211-227.
- Vugteveen, P., Hanssen, L., de Groot, A. & Vroom, J. (2013). [Kennis & Klimaat. WaLTER rapportage.](#)
- Wang, Z.B., Hoekstra, P., Burchard, H., De Swart, H.E. & Stive, M.J.F. (2012). [Morphodynamics of the Wadden Sea and its barrier island system](#). Ocean & Coastal Management 68; 39-57. Special Issue on the Wadden Sea Region.

[Deze Deltafact is opgesteld door Deltares, juni 2014.](#)

Auteurs: J. Vroom, Z. Wang, B. van der Valk, A. Oost.

DISCLAIMER

De in deze publicatie gepresenteerde kennis en diagnosemethoden zijn gebaseerd op de meest recente inzichten in het vakgebied. Desalniettemin moeten bij toepassing ervan de resultaten te allen tijde kritisch worden beschouwd. De auteur(s) en STOWA kunnen niet aansprakelijk worden gesteld voor eventuele schade die ontstaat door toepassing van het gedachtegoed uit deze publicatie.