

Gulzige geulen en slinkende slikken in de Zuidwestelijke Delta

een geologisch perspectief

Jan Mulder
Sytze van Heteren

Titel

Gulzige geulen en slinkende slikken in de Zuidwestelijke Delta

Opdrachtgever **Pagina's**
RWS Waterdienst 13

Trefwoorden

Sedimentbalans, sedimentvraag, sedimentaanbod, zeespiegelstijging, lange termijn

Samenvatting

De geschiedenis en de werking van de kust en van de getijdebekkens van de ZW Delta, worden verklaard aan de hand van een aantal eenvoudige basisprincipes voor natuurlijke kustontwikkeling: vraag en aanbod van sediment, gestuurd door lange termijn processen zoals zeespiegelstijging en op kortere termijn gedomineerd door de effecten van plotselinge veranderingen, ofwel van natuurlijke -, ofwel van menselijke aard.

De lessen lijken duidelijk: (-) abrupte veranderingen in de kustvorm brengen een morfologische aanpassing op gang (middels herverdeling van sedimenten) die eeuwen kan duren; (-) op de schaal van deelsystemen (afzonderlijke bekkens, de Voordelta) overschaduwen de (nog doorwerkende) reacties op abrupte veranderingen in het verleden, de te verwachten reacties op geleidelijke veranderingen zoals zeespiegelstijging; (-) op de schaal van het kuststelsel (kustfundament ZW Delta) is de reactie op zeespiegelstijging dominant en leidt de reactie op abrupte veranderingen (slechts) tot herverdeling van sediment binnen het systeem.

Deze basisprincipes en algemene lessen worden gebruikt voor het ontwerpen van beheersmaatregelen voor de Oosterschelde.

Referenties

- De Ronde, J., 2008, Toekomstige langjarige suppletiebehoefte, Deltares rapport Z4582.24, september 2008, 36 pp.
- Dumoulin, P., 2004, Monitoring Ophoogzand, Dienst Weg & Waterbouwkunde, rapport DWW-1735 / Publicatiereeks grondstoffen 2004/08, 55 pp.
- Hesselink, A.W., D.C. van Maldegem, K. van der Male en B. Schouwenaar, 2003, Verandering in de morfologie van de Oosterschelde door aanleg van de stormvloedkering, Werkdocument RIKZ/OS/2003.810x
- Louters, T., van den Berg J.H. and Mulder, J.P.M., 1998, Geomorphological Changes of the Oosterschelde Tidal System During and After the Implementation of the Delta project, Journ of Coastal Research 14(3), 1134.
- Mulder, J.P.M., and T. Louters, 1994, Changes in basin geomorphology after implementation of the Oosterschelde Project, Hydrobiologia, 282/283: 29.
- ten Brinke, W., Dronkers, J and Mulder, J.P.M., 1994, Fine sediments in the Oosterschelde tidal basin before and after partial closure, Hydrobiologia 282/283: 41.
- van Otterloo, R.H. van, Berghem, J.W. van, Kuijpers, J.W.M., Broekhuizen, A., Dreumel, P.F. van en Mol, J.W., 1987, De onderwaterbodem van het Noordelijke Deltabekken, Nota RWS Directie Benedenrivieren, 29 pp.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	2009-03-23	Jan Mulder		Marcel Taal		Johan Boon	

Status

Definitief

Inhoud

1	Basisprincipes kustontwikkeling	2
1.1	Vraag en aanbod van sediment	2
1.2	Lange termijn en middellange- tot korte termijn	2
2	Kust en getijdebekkens van de ZW Delta	3
2.1	ZW Delta gebied als geheel	3
2.2	Deelgebieden ZW Delta	4
2.2.1	<u>Het Oosterscheldebekken</u>	5
2.2.2	<u>Het Westerschelde estuarium</u>	6
2.2.3	<u>De Voordelta</u>	7
3	Conclusies	7
4	Toepassing bij ontwerp beheersmaatregelen voor Oosterschelde	8

1 Basisprincipes kustontwikkeling

De relatieve stijging van de zeespiegel - dat wil zeggen het gecombineerde effect van de stijging van de waterspiegel (de absolute zeespiegelstijging) en van bodemdaling – is op lange termijn sterk bepalend voor de ontwikkeling van onze kust en getijdebekkens. Op kortere termijn en op kleinere ruimteschaal wordt het geleidelijke effect van zeespiegelstijging vaak overschaduwd door de effecten van plotselinge gebeurtenissen.

1.1 Vraag en aanbod van sediment

Door de (relatieve) stijging van de waterspiegel heeft de kust de neiging om zich landwaarts terug te trekken. Hoe sterk dat gebeurt, hangt in de eerste plaats af van de snelheid van de stijging en van de vorm van de kust; bij een flauw hellende kust en bij een kust met getijdebekkens is de terugtrekking sterker dan bij een steile kust zonder zeegaten. Toch is het niet helemaal zo simpel. Het uiteindelijke effect wordt mede bepaald door de mate waarin het verdrinken van de kust kan worden gecompenseerd door de aanvoer van sediment vanaf elders. En dat maakt het ingewikkeld, want een stijging van de waterspiegel veroorzaakt niet alleen een tendens tot terugtrekking van de kust, maar ook een verandering in de mogelijkheden voor sedimentaanvoer. Immers, door de stijging van de waterspiegel treedt verandering op in de beschikbaarheid van sedimentbronnen ¹ en in de capaciteit van water en wind om sediment te verplaatsen ².

De extra waterschijf die ontstaat door een (relatieve) stijging van de waterspiegel, kan worden beschouwd als een potentiële, extra bergingsruimte voor sediment. Deze potentiële bergingsruimte is op te vatten als een sedimentvraag, de potentiële sedimentaanvoer als een sedimentaanbod. De balans tussen sedimentvraag en –aanbod bepaalt de natuurlijke kustontwikkeling. Daarom is het mogelijk dat de kust zich op de ene plaats uitbouwt en zich op de andere juist terugtrekt, soms heel dicht bij elkaar.

1.2 Lange termijn en middellange- tot korte termijn

Voor de lange termijn (eeuwen) is de sturende factor voor deze balans het geleidelijke, maar continue proces van de relatieve stijging van de zeespiegel. Dit proces leidt tot relatief langzame veranderingen in sedimentvraag en –aanbod ³, welke ononderbroken optreden gedurende vele eeuwen tot millennia.

Voor de korte- en middellange termijn (decennia – eeuwen) zijn abrupte veranderingen van de kustvorm bepalend ⁴: doorbraken en inbraken van de zee tijdens storm kunnen zorgen voor een abrupte verandering van de sedimentvraag (door een verandering van de bergingsruimte) en van het sedimentaanbod (door een verandering in beschikbare sedimentbronnen en in transportcapaciteit door wijzigingen in getijdebiet en –amplitude). Hetzelfde geldt voor ingrepen

¹ In het verdrongen deel van de kust komen de aanwezige sedimenten als potentiële sedimentbronnen beschikbaar voor transport door water, terwijl ze als potentiële sedimentbron voor transport door de wind verloren gaan. Tegelijkertijd komen bij een stijgende waterspiegel meer sedimenten dieper te liggen dan de golfbasis, waardoor ze niet meer als potentiële sedimentbron kunnen fungeren.

² De waterdiepte bepaalt niet alleen de hoogte van de golven die kunnen optreden (en daarmee de energie die beschikbaar is om sediment los te woelen), maar ook de omvang van de stroomsnelheid (en daarmee de energie die beschikbaar is om sediment te transporteren).

³ Bij de huidige zeespiegelstijging voor het gehele Nederlandse kuststelsel in de orde van 14 miljoen m³ per jaar.

⁴ Als gevolg van ofwel extreme stormvloed, ofwel menselijke ingrepen, dan wel een combinatie van beide.

als de aanleg van dijken en dammen of grootschalig baggeren en storten van sediment. Deze veroorzaken in relatief korte tijd, (zeer) grote veranderingen in sedimentvraag en –aanbod⁵ die vele decennia tot eeuwen doorwerken.

2 Kust en getijdebekken van de ZW Delta

De geschiedenis en de werking van de kust en van de getijdebekken van de ZW Delta, kunnen worden verklaard aan de hand van bovengenoemde basisprincipes voor natuurlijke kustontwikkeling.

2.1 ZW Delta gebied als geheel

Allereerst beschouwen we het ZW Deltagebied in zijn totaliteit: het hele gebied tussen de -20 m dieptelijn in het Westen en de Brabantse hoge gronden in het Oosten, en tussen de grens met België in het Zuiden en de Nieuwe Waterweg in het Noorden.

Bij deze grote ruimteschaal past een beschouwing op een grote tijdschaal: de lange-termijn ontwikkeling van het ZW Deltagebied als geheel, wordt in hoofdzaak gestuurd door de relatieve zeespiegelstijging. De vraag is dan: hoe beïnvloedt deze stijging de vraag en het aanbod van sediment?

De sedimentvraag neemt toe met de relatieve stijging van de waterspiegel: de potentiële extra bergingsruimte voor sediment. Binnen de huidige configuratie van zeekeringen in de ZW Delta moeten we dan onderscheid maken tussen *actieve*, potentiële bergingsruimte (in gebieden waar actief marien sedimenttransport mogelijk is; i.e. het buitendijkse gebied van Westerschelde en de Voordelta) en *passieve*, potentiële bergingsruimte (in gebieden waar geen actief marien sedimenttransport meer mogelijk is, maar welke wel gelegen zijn onder zeeniveau; i.e. de afgedamde zeegaten en het bedijkte poldergebied). De *passieve* sedimentvraag wordt bij de huidige zeespiegelstijging geschat op 5,5 miljoen m³ per jaar. De *actieve* sedimentvraag als gevolg van zeespiegelstijging is in de huidige situatie naar schatting 3 miljoen m³ per jaar. Zandwinning, kan de actieve sedimentvraag nog vergroten. Momenteel vindt alleen nog zandwinning plaats in de Belgische Zeeschelde met een omvang van naar schatting 1 Mm³ per jaar.

Het sedimentaanbod van buiten het aandachtsgebied aan gebieden met een *passieve* sedimentvraag, is (per definitie) voor de afgedamde bekkens beperkt tot mogelijke sedimentaanvoer door rivieren (hoofdzakelijk via het Hollandsch Diep), en door de mens (storten van baggerspecie van buiten het gebied en ophogen van bouwterreinen). Vooral het laatste is van belang en bedraagt gemiddeld enkele miljoenen m³ per jaar⁶; een bijdrage vanuit de rivieren blijkt verwaarloosbaar⁷.

⁵ *Plotselinge veranderingen zoals het verdrinken van grote delen van Zuid-Beveland of de aanleg van de Oosterscheldedekering veroorzaken, in één klap, veranderingen in het patroon van vraag en aanbod van grootte orde vele honderden miljoenen m³. Bij de bestaande transportcapaciteit van het systeem vergt het vele honderden jaren om vraag en aanbod weer in evenwicht te brengen.*

⁶ *Het gebruik aan ophoogzand varieert in de tijd afhankelijk van de omvang en het aantal bouwprojecten. In de periode 2001-2002, een tijd met een relatief grote bouwactiviteit, bedroeg de netto import van ophoogzand zo'n 5 miljoen m³ per jaar. (Dumoulin, 2004).*

⁷ *De geusedimentatie in het Haringvliet bedroeg in de eerste dertien jaar na afsluiting minder dan 0,1 miljoen m³ per jaar (van Otterloo et al., 1987). Voor een deel was dat afkomstig van erosie van de platen – welke inmiddels is gestopt door het aanbrengen van oeverbeschermingen –, voor een ander deel door*

Voor het sedimentaanbod aan gebieden met een *actieve* sedimentvraag, spelen deze zelfde factoren een rol. Ook hier echter is de natuurlijke sedimentaanvoer vanuit rivieren (Haringvliet, Schelde) verwaarloosbaar. Potentieel wel van belang is de sedimentuitwisseling langs de kust met enerzijds het Belgische deel en anderzijds de Maasgeul. Bij een netto noordwaarts zandtrandport langs de kust, wordt vooralsnog aangenomen dat beide transportfluxen elkaar opheffen. Het is niet aannemelijk dat de zeespiegelstijging door een verschuiving in de getijamplitude, verandering zal brengen in het transport langs de kust. De zeespiegelstijging is wel van invloed op de sedimentuitwisseling tussen kust en de diepere zeebodem: die wordt steeds minder (of zelfs verwaarloosbaar) naarmate een steeds groter deel van de zeebodem dieper dan -20 m en daarmee buiten bereik van de golven komt te liggen. Tegenover een natuurlijk sedimentaanbod dat netto gelijk is aan nul, staat sinds 1990 een menselijke aanvoer van gemiddeld zo'n 2,5 miljoen m³ suppletiezand per jaar.

Samenvattend: het natuurlijke *sedimentaanbod* in gebieden met een *actieve* sedimentvraag (Voordelta en Westerschelde) is in de huidige situatie gelijk aan nul. Gevoegd bij een jaarlijkse *sedimentvraag* van 3 Mm³ door de huidige zeespiegelstijging en 1 miljoen m³ door zandwinning, betekent dit dat het actieve deel van het ZW Deltagebied als geheel zand verliest. Op de lange termijn zouden hierdoor – zonder menselijk ingrijpen – de functies van het gehele gebied worden ondermijnd. Om dit tegen te gaan, zijn zandsuppleties nodig met een omvang die minimaal gelijk is aan het optredende tekort op de zandbalans. Gegeven een totale sedimentvraag van 3-4 miljoen m³ per jaar, lijkt een jaargemiddelde suppletie inspanning van 2,5 miljoen m³ per jaar – zoals uitgevoerd vanaf 1990 – onvoldoende om alle tekorten aan te vullen.

Ook in gebieden met een *passieve* sedimentvraag (de afgedamde zeegaten en het poldergebied) veroorzaakt relatieve zeespiegelstijging een negatieve sedimentbalans. Het functieverlies dat hiervan het gevolg is, kan (in theorie) fundamenteel worden opgelost door het verkleinen van de *passieve* sedimentvraag door de kunstmatige aanvoer van zand. Uitgedrukt in volume, levert een jaarlijkse aanvoer van ophoogzand van enkele miljoenen m³ per jaar hier al een redelijke bijdrage. Echter, deze toepassing gebeurt zeer lokaal en vrijwel alleen uit bouwkundige overwegingen. Vanuit waterkeringbeheer wordt het functieverlies als gevolg van een cumulatief, oplopende *passieve* sedimentvraag, primair vanuit de traditie tegengegaan door het versterken van de waterkering. Doordat bij deze aanpak de bodem van het achterland niet kan meegroeien met de zeespiegel, zullen de omvang en het belang van de waterkeringen evenredig toenemen met de groei van de *passieve* sedimentvraag. In aanvulling op het waterkeringbeheer kan een strategie die de *passieve* sedimentvraag gericht en geleidelijk terugdringt, wellicht een nuttige bijdrage leveren aan een duurzame Delta..

2.2 Deelgebieden ZW Delta

Dat, zonder tegenmaatregelen, zeespiegelstijging in het ZW Deltagebied op de lange termijn zal leiden tot functieverlies als gevolg van sedimenttekorten, staat vast. Op welke plekken en wanneer dit functieverlies zich zal openbaren, is mede afhankelijk van de wijze waarop het aanwezige sediment zich zal herverdelen.

Om daar enig zicht op te krijgen, is een beschouwing nodig op kleinere schaal. In onderstaande wordt dit uitgewerkt voor een aantal deelgebieden. Opnieuw wordt bij deze beschrijvingen teruggegrepen op de basisprincipes van natuurlijke kustontwikkeling.

aanvoer vanuit het Hollandsch Diep. Dit aandeel kan in de tijd toenemen naarmate Biesbosch en Hollandsch Diep, door sedimentatie geleidelijk aangepast raken. De totale omvang van sedimentaanvoer uit deze gebieden naar het Haringvliet zal echter altijd beperkt van omvang blijven.

2.2.1 Het Oosterscheldebekken

Op kleinere schaal dan het gehele ZW Deltagebied worden sedimentvraag en –aanbod niet alleen bepaald door de lange-termijn trend in zeespiegelstijging, maar evenzeer, zo niet sterker, door de gevolgen van abrupte gebeurtenissen in het verleden. Voor een deelgebied als het Oosterscheldebekken is dat heel duidelijk.

De stijging van de zeespiegel leidt in het Oosterscheldebekken tot een gestage toename van de sedimentvraag: bij de huidige stijgingsnelheid van 2 mm per jaar, groeit elk jaar de sedimentvraag met 0,75 Mm³. Daarnaast heeft de aanleg van de Oosterscheldewerken in de jaren '80 van de vorige eeuw, een sedimentvraag (zandhonger) doen ontstaan van 400 – 600 Mm³⁸. De invloed van deze ingreep is op korte en middellange termijn veel groter dan het geleidelijke effect van zeespiegelstijging.

Ook het sedimentaanbod wordt sterk bepaald door deze plotselinge verandering: door de aanleg van de kering is sedimentuitwisseling met de Noordzee (de Voordelta) zeer sterk afgenomen⁹. Het potentiële sedimentaanbod vanuit het achterland is tot nul gereduceerd¹⁰.

De grote onbalans tussen vraag en aanbod van sediment bepaalt de morfologische ontwikkeling van het huidige Oosterscheldebekken. De sedimentvraag (zandhonger) van de geulen wordt beantwoord met een lokaal sedimentaanbod door de platen, slikken en schorren. De veranderde hydrodynamische condities na aanleg van de kering, zorgen voor een herverdeling van het aanwezige sediment binnen het bekken. In de (te) ruime geulen is de stroomsnelheid dusdanig afgenomen dat de sedimentaanvoer naar de platen sterk is gereduceerd; de plaatopbouw stakt. Tegelijkertijd is de plaatafbraak sterk toegenomen: door de afname van het verschil tussen hoog- en laagwater (het getijverschil) vindt de golfaanval plaats in een meer geconcentreerde zone¹¹.

De dominantie van abrupte veranderingen in de (vorm van de) Oosterschelde op de morfologische ontwikkeling, kan verder worden geïllustreerd door de geschiedenis van de Oosterschelde in de voorbije eeuwen.

Een abrupte verandering van natuurlijke oorsprong vond plaats op 5 november 1531. De St. Felixvloed veroorzaakte een grote inbraak die leidde tot het ontstaan van het Verdrongen Land van Zuid-Beveland. De *passieve* bergingsruimte voor sediment, welke was ontstaan door onoordeelkundig landgebruik (ontwatering en moertering) achter zwakke, primitieve dijken, werd in één klap omgezet in *actieve* bergingsruimte. Gevolg: de potentiële sedimentvraag nam direct enorm toe. Wat de zaak compliceert is dat op de schaal van het Oosterscheldebekken zelf, deze toegenomen bergingsruimte niet onmiddellijk als een sedimentvraag naar voren kwam. Integendeel. Parallel aan de plotselinge toename van de actieve bergingsruimte was het getijvolume sterk toegenomen (met naar schatting 50 %). Om deze hoeveelheid in- en uitstromend water te kunnen accommoderen, schuurden de eb- en vloedgeulen sterk uit. Het Oosterscheldebekken manifesteerde zich niet als een sedimentvrager, maar juist als een sedimentaanbieder: het bekken exporteerde zand naar de Voordelta.

Dit exporteren van zand ging door tot de aanleg van de Oosterscheldewerken. Uit metingen is bekend dat tussen 1872 en 1952 de export ongeveer 350 miljoen m³ heeft bedragen. Deze export

⁸ Door de aanleg van de Oosterscheldewerken is de hoeveelheid water die het bekken in- en uitstroomt met 30% afgenomen. De geulen zijn te groot geworden in verhouding tot de hoeveelheid water die ze vervoeren. Om deze verhouding te herstellen is veel sediment nodig: 400 - 600 Mm³.

⁹ Door het ontstaan van ontgrondingskuilen is de uitwisseling van zand vrijwel verwaarloosbaar geworden; de import van slib wordt geschat op maximaal 1 miljoen m³ per jaar (Louters et al., 1998), maar is zeer onzeker.

¹⁰ De dijken rond de Oosterschelde verhinderen verdrinking en erosie van het achterland, waardoor deze gebieden als potentiële sedimentbronnen afvallen.

¹¹ Door de concentratie van alle golfenergie in een kleinere zone, neemt hier de erosie toe,

was niet meer alleen het gevolg van de St. Felixvloed, maar ook van de toename in getijvolume veroorzaakt door de landwaartse uitbreiding van het Oosterscheldebekken in de richting van het Zijpe, ten koste van de Grevelingen.

De omvang van de export in de honderd jaar voorafgaand aan de aanleg van de stormvloedkering (350 miljoen m³ alleen al tussen 1872 en 1952) is van dezelfde grootte-orde als de omvang van de zandhonger die de Oosterscheldewerken hebben veroorzaakt (400 – 600 miljoen m³). Dat levert een indicatie voor de tijd die nodig zou zijn om, langs natuurlijke weg, het dynamische evenwicht in het Oosterscheldebekken te herstellen: de import en herverdeling binnen het bekken van 400-600 miljoen m³, zal – in een situatie met minder getij-energie dan voor de afsluiting –, zeker enkele eeuwen in beslag nemen. In de tussentijd zal zonder gerichte tegenmaatregelen, veel plaatareaal verloren gaan. Het stimuleren van extra zand import door de stormvloedkering, kan daar niets aan veranderen. De herverdeling van dat zand over de platen en geulen binnen het bekken, zal daarvoor te langzaam gaan.

Wat dit betekent voor mogelijke beheersmaatregelen wordt toegelicht in de laatste paragraaf: Toepassing op ontwerp beheersmaatregelen Oosterschelde.

2.2.2 Het Westerschelde estuarium

Ook in het Westerschelde estuarium worden de effecten van zeespiegelstijging voornamelijk overschaduwd door de effecten van menselijk handelen; in dit geval de vele bagger- en stortactiviteiten in het estuarium.

Bij de huidige snelheid van de zeespiegelstijging, 20 cm per eeuw, neemt de bergingsruimte voor sediment in de Westerschelde jaarlijks toe met 0,5 miljoen m³. Zandwinning met een omvang van tussen de 1 en 5 miljoen m³ per jaar – zoals het geval is geweest vanaf het begin van de jaren '60 – heeft deze bergingsruimte evenredig vergroot. Er is dus in de Westerschelde een duidelijke sedimentvraag aanwezig. Gevoegd bij het theoretisch grote sedimentaanbod vanuit de Voordelta, lijken alle voorwaarden aanwezig voor import van sediment in het Westerschelde estuarium. Echter, in werkelijkheid blijkt ook af en toe het omgekeerde het geval ¹².

Een oorzaak kan liggen in de groei van het verschil tussen hoog- en laagwater, waardoor ook de komberging en de totale hoeveelheid in- en uitstromend water toeneemt. Om dit grotere getijdebiet te kunnen vervoeren passen de geulen zich aan door te eroderen; de omvang van de geulerosie zou kunnen leiden tot een netto export van sediment uit de Westerschelde. Vooral belangrijk echter lijken de vele bagger- en stortactiviteiten in het estuarium. Het verdieppingsprogramma in de Westerschelde (met name in het oostelijke deel) heeft de stromingscondities danig veranderd. Een andere factor is de ongelijke verdeling van sediment die het gevolg is van het bagger- en stortprogramma; baggeren in het oostelijk deel en storten in het westelijke deel. De kunstmatige overmaat aan sediment in het westelijk deel van het estuarium wordt door de getijstrooming herverdeeld; een deel stroomt naar het oosten terug het estuarium binnen, een ander deel naar het westen de Voordelta in. Tot slot zorgt zandwinning in de Belgische Zeeschelde ervoor dat sediment uit het estuarium wordt aangetrokken.

Het resultaat kan zijn dat in sommige periodes - ondanks het bestaan van een duidelijke sedimentvraag - het estuarium netto sediment exporteert. Echter, steeds neemt, evenredig aan de mate van zeespiegelstijging en van zandwinning uit het estuarium, de sedimentvraag (bergingsruimte voor sediment) verder toe. Op enig moment zal het groeien van de sedimentvraag, de sedimentexport telkens weer neutraliseren of doen omslaan in een sedimentimport.

¹² Uit waarnemingen over de periode '50 – '90 blijkt een netto import, tussen 1995 en 2004 is de trend exporterend, terwijl de jongste gegevens weer wijzen op een omslag naar import.

2.2.3 De Voordelta

Gezien op de schaal van de gehele Voordelta wordt de grootschalige morfologische ontwikkeling gestuurd door de zeespiegelstijging. Op de schaal van afzonderlijke buitendelta's is de reactie op abrupte gebeurtenissen in het verleden en op menselijke ingrepen dominant.

Voor de Westerscheldemond betreft dit een reactie op de grootschalige verdiepingswerken in het Belgische deel van de buitendelta, waarbij vanaf 1970 enkele honderden miljoenen m³ sediment zijn gebaggerd en gestort. Maar ook een reactie op vaargeulonderhoud en -verdieping en de zandwinning in het Westerschelde estuarium; de sedimentexport die in sommige periodes hier het gevolg van is (zie boven), leidt tot een tijdelijke toename van het sedimentvolume van de Voordelta. Het lijkt vrij zeker dat deze extra zandbuffer op termijn weer zal worden aangeproken om de sedimentvraag van het estuarium te beantwoorden. Op welke termijn zo'n omslag plaatsvindt is minder zeker.

De buitendelta's van Veerse Gat, Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet zijn sterk beïnvloed door de aanleg en (gedeeltelijke) afdamming van deze zeearmen. De omvang van de buitendelta's is niet meer in evenwicht met het sterk afgenomen, of verdwenen getijdebiet door bijbehorende zeegaten. Dit leidt tot een interne herverdeling van het sediment. Ook hier vragen te ruime geulen sediment, wat in eerste instantie wordt geleverd door de naburige platen. Er treedt een vervlakking op van het reliëf in het landwaartse deel van de buitendelta's. Tegelijkertijd worden aan het zeewaartse front van de buitendelta's, de landwaarts gerichte golfkrachten minder of niet langer gecompenseerd door de zeewaarts gerichte ebstroming vanuit het bekken. Het gevolg is een verdieping en versteiling van het deltafront waarbij het sediment landwaarts en langs de kust wordt verplaatst. Aan de buitenrand van de buitendelta's worden zandplaten gevormd en treedt een accentuering op van het reliëf.

Op de langere termijn gezien vertegenwoordigen deze buitendelta's een zandvoorraad die zonder de menselijke barrières (dijken en dammen) beschikbaar zou komen als sedimentbron voor het beantwoorden van de (groeïende,) *passieve* sedimentvraag in de bekkens (en het laagland). De netto landwaartse herverdeling van sedimenten die momenteel plaatsvindt, is hiervan een afspiegeling. Afgezien van het feit dat de bestaande barrières (zonder nadere maatregelen,) uiteindelijk een landwaarts transport belemmeren, zou een natuurlijke herverdeling van een dergelijke hoeveelheid sediment vele eeuwen in beslag nemen.

3 Conclusies

De lessen lijken duidelijk: (-) abrupte veranderingen in de kustvorm brengen een morfologische aanpassing op gang (middels herverdeling van sedimenten) die eeuwen kan duren; (-) op de schaal van deelsystemen (afzonderlijke bekkens, de Voordelta) overschaduwen de (nog doorwerkende) reacties op abrupte veranderingen in het verleden, de te verwachten reacties op geleidelijke veranderingen zoals zeespiegelstijging; (-) op de schaal van het kuststelsel (kustfundament ZW Delta) is de reactie op zeespiegelstijging dominant en leidt de reactie op abrupte veranderingen (slechts) tot herverdeling van sediment binnen het systeem.

4 Toepassing bij ontwerp beheersmaatregelen voor Oosterschelde

Zoals er twee soorten natuurlijke processen zijn die estuaria beïnvloeden, langjarige die op een tijdschaal van eeuwen min of meer constant zijn en extreme gebeurtenissen die in korte tijd grote veranderingen veroorzaken, zijn er ook twee soorten maatregelen om de gevolgen van de zandhonger van de Oosterschelde te minimaliseren. Enerzijds zijn er maatregelen die op korte termijn grote veranderingen zullen brengen. Dit zijn maatregelen die meer water in het systeem brengen, zoals ontpoldering of afbraak van de stormvloedkering. Anderzijds zijn er lange-termijn maatregelen die meer zand in het systeem brengen.

In de huidige situatie, met een kering die nog lange tijd zal bestaan en met dijken die het laaggelegen polderland zullen blijven beschermen, zijn maatregelen met zand de meest haalbare en effectieve optie. Omdat niet de zandhonger van het getijbekken zelf, maar het verlies aan intergetijdenareaal het primaire probleem is, zal een maatregel met zand alleen effectief zijn als juist de platen en slikken worden gesuppleerd. Hiervoor zijn verschillende theoretische scenario's te bedenken.

Omwille van duurzaamheid moeten de gesuppleerde zandvolumes bij voorkeur dezelfde orde-grootte hebben als die van de optredende natuurlijke processen: de korte-termijn omvang van de plaaterosie en het lange-termijn proces van zeespiegelstijging. Eerstgenoemde blijkt uit metingen sinds 1983 jaargemiddeld ongeveer 1,5 miljoen m³¹³. Daarnaast doet de huidige zeespiegelstijgsnelheid van 2 mm per jaar, de totale zandvraag in het bekken jaarlijks toenemen met zo'n 0,75 miljoen m³.

Door alleen platen en slikken te suppleren, kan het verlies aan intergetijdenareaal worden gestopt gedurende de periode waarin het systeem zich aan de door de Deltawerken ontstane zandhonger aanpast. Dan moet echter de minimale omvang van plaat- en sliksuppleties gelijk zijn aan het verlies: 1,5 miljoen m³ per jaar.

In theorie kan deze 1,5 miljoen m³ jaarlijks worden gewonnen uit de nabije geulen. Door een continue, interne herverdeling van het sediment, zou op deze wijze het plaatareaal in stand kunnen blijven. Echter, door het gebruik van sediment uit het bekken zelf, wordt geen bijdrage geleverd aan het stillen van de zandhonger, en ook niet aan het tegengaan van de *groei* in zandhonger als gevolg van zeespiegelstijging. Deze groei in zandhonger, zal de omvang van de plaaterosie geleidelijk versnellen. Bijgevolg zal de vereiste jaarlijkse suppletie-inspanning om de platen te behouden, in dit scenario geleidelijk toenemen.

Het zand voor de plaatsuppleties kan ook worden ingevoerd van buiten de Oosterschelde. Wordt jaarlijks 1,5 miljoen m³ op platen gesuppleerd met zand van buiten, dan snijdt het mes aan meer kanten: de plaaterosie wordt gecompenseerd, de jaarlijkse groei van de zandhonger (0,75 miljoen m³) wordt tegengegaan en tegelijkertijd wordt jaarlijks 0,75 miljoen m³ 'afgelost' van de grote zandhonger. Om een idee te geven: het zou dan meer dan 500 jaar duren om de zandhonger van 400 miljoen m³ in het systeem te stillen, als de zeespiegel intussen niet sneller zou gaan stijgen en als we sedimentimport door de kering buiten beschouwing laten.

Nemen we aan dat er ook nog jaarlijks 1 miljoen m³ sedimentimport door de kering plaatsvindt vanuit zee, dan neemt - bij een jaarlijkse plaatsuppletie met zand van buiten en met

¹³ Hesselink et al., 2003

een omvang van 1,5 miljoen m³ - de totale sedimentvraag jaarlijks met 1,75 miljoen m³ af. Ook dan duurt het echter meer dan 200 jaar voor het systeem zich aan de door de Deltawerken veranderde hydrodynamische condities heeft aangepast. Als de snelheid van de zeespiegel toeneemt naar meer dan 4 mm per jaar, zoals door het KNMI voorspeld, - en daarmee de jaarlijkse groei in zandhonger stijgt naar meer dan 1,5 miljoen m³ per jaar - zal de adaptatieperiode uitkomen op ruim 400 jaar. Grootschalige plaat- en sliksuppletie moet dan ook worden gezien als een permanente maatregel.

Bij sedimentimport door de kering spelen echter meer overwegingen dan alleen de hoeveelheid en de adaptatieperiode. De *kwaliteit* van de import (zand en/of slib) bepaalt mede het toekomstig karakter van de Oosterschelde. Zo er in de huidige situatie al sprake is van sedimentimport, dan beperkt deze zich hoofdzakelijk tot slib met een maximale omvang van 1 miljoen m³ per jaar. Dit leidt tot een relatieve verslibbing van de geulen. Het is de vraag of langs kunstmatige weg het zandgehalte van een import kan worden verhoogd.

Bronnen voor suppletiezand buiten de Oosterschelde, zijn in theorie niet alleen de Noordzeebodem buiten - , maar ook de Voordelta, binnen het kustfundament. Een overweging om het laatste ook in beschouwing te nemen, zou het systeemeigen karakter van dat zand kunnen zijn. Het is in de Voordelta neergelegd in de exportperiode voorafgaand aan de aanleg van de werken. Na aanleg van de kering vindt hier erosie plaats van het deltafront, zolang zich nog geen nieuw morfologisch evenwicht heeft ingesteld. Theoretisch is het denkbaar om dit nieuwe evenwicht kunstmatig te forceren, door het afgraven van het deltafront voordat het aan natuurlijke erosie ten prooi valt. Het daarbij vrijkomende zand zou een mooie bron kunnen vormen voor plaatsuppletie binnen de Oosterschelde met systeemeigen zand.

Overwegingen over jaarlijkse omvang en tempo, en over de mogelijke bron van het te suppleren zand, worden echter niet alleen ingegeven door duurzaamheid en kostenefficiëntie. Ook de onzekerheid in de mate van toekomstige zeespiegelstijging speelt een belangrijke rol. Mocht door de verwachte versnelling van de zeespiegel een vroegtijdig einde komen aan de levensduur van de stormvloedkering (zoals de Deltacie aangeeft), dan dienen zich andere mogelijkheden aan om het dynamisch morfologische evenwicht te herstellen: het eventueel verwijderen van de kering maakt dan een grotendeels herstel mogelijk van het getijdenprisma. Door vooralsnog de omvang van de plaatsuppleties af te stemmen op de jaarlijkse teruggang van de platen, wordt voorkomen dat een overmaat aan zand naar binnen wordt gebracht die op termijn weer zou worden geëxporteerd als het getijdenprisma zich zou herstellen.

Tot slot zal bij de keuze van de suppletievariant, een optimaal ecologisch rendement van doorslaggevende betekenis zijn.