

Inspiratie voor een update van de sedimentbalans Nederlandse kust

Ad van der Spek

Titel

Inspiratie voor een update van de sedimentbalans Nederlandse kust

Opdrachtgever

RWS WVL

Project

11202190-001

Kenmerk

11202190-001-ZKS-0014

Pagina's

12

Trefwoorden

Type hier de trefwoorden

Samenvatting

Type hier de samenvatting

Referenties

Type hier de referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
0.1	dec. 2018	Ad van der Spek		Marcel Taal		Frank Hoozemans	

Status

concept

Dit document is een concept en uitsluitend bedoeld voor discussiedoeleinden. Aan de inhoud van dit rapport kunnen noch door de opdrachtgever, noch door derden rechten worden ontleend.

Inhoud

1 Inleiding	1
2 Sedimentbalans: vraag en aanbod	3
3 Bronnen, putten en fluxen in het Nederlandse kuststelsel	4
3.1 Aanvoer naar het Nederlandse kuststelsel	4
3.2 Afvoer uit het Nederlandse kuststelsel	4
3.3 Herverdeling binnen het Nederlandse kuststelsel	5
3.4 Verborgen posten	6
3.4.1 Compactie	6
3.4.2 Zeespiegelstijging	7
3.4.3 Bodemdaling	8
4 Plannen voor een nieuwe sedimentbalans	10
5 Referenties	11

1 Inleiding

De meest recente sedimentbalans voor het gehele Nederlandse kuststelsel bestaat uit de periode 1990-2005 en dateert van 2014-2015 (van der Spek & Lodder, 2015; 2017). Deze sedimentbalans beschrijft de ontwikkeling van 4 typen gebieden:

- ✓ brandingszone/strand/zeereep,
- ✓ de diepere onderwateroever,
- ✓ buitendelta's en
- ✓ getijdebekkens.

Deze gebieden kennen ieder een eigen ontwikkeling.

De ontwikkeling van brandingszone/strand/zeereep is vast te stellen aan de hand van jarkusgegevens. Jarkusraaien worden ieder jaar ingemeten, waardoor ontwikkelingen goed te volgen zijn. Voor het overgrote deel van de Nederlandse kust is voor de brandingszone en het strand het sedimentvolume dat minimaal aanwezig moet zijn vastgelegd in de BasisKustLijn (BKL). Het werkelijke aanwezige sedimentvolume op een locatie wordt jaarlijks aan de hand van de jarkusraaien vastgesteld en bij (aanstaande) onderschrijding van het vastgestelde minimum aangevuld middels zandsuppleties.

De ontwikkeling van de overige gebieden wordt vastgesteld aan de hand van vaklodingen welke met een frequentie eens per 3 jaar voor de kustzone en Oosterschelde en eens per 6 jaar voor de getijdebekkens in de Waddenzee. De Westerschelde wordt jaarlijks opgenomen. Uit de vaklodingen blijken de diepere onderwateroever en de buitendelta's te eroderen terwijl de getijdebekkens van de Waddenzee sedimenteren. De grootschalige sedimentbalans van de Westerschelde is quasi-neutraal. Deze balans wordt gedomineerd door menselijke ingrepen en niet door transporten in- en uit het bekken. De Oosterschelde wisselt geen sediment uit met andere gebieden.

De bovengenoemde studie concludeerde dat erover de periode 1990-2005 een netto verlies van 144 miljoen m³ sediment optrad, wat vrijwel geheel voor rekening van de buitendelta's komt. Na correctie voor het aangebrachte suppletievolume (102 miljoen m³) komt het 'natuurlijke' verlies uit op 247 miljoen m³, grotendeels in het Deltagebied en vrijwel geheel ten gevolge van de afname van de buitendelta's. Het is niet duidelijk waar dit sedimentvolume gebleven is, waardoor een nadere analyse noodzakelijk is.

Sinds het opstellen van de bovengenoemde sedimentbalans zijn voor een aantal delen van de Nederlandse kust detailstudies van sedimentbudgetten uitgevoerd: de oostelijke Waddenzee (Vermaas & Marges, 2017), de Voordelta (Elias et al., 2017) en het Zeegat van Texel (Elias & van der Spek, 2018).

Daarnaast zijn er anno 2018 een aantal nieuwe bodemopnamen voorhanden. Voor de westelijke Waddenzee zijn de opnamen tot en met 2015 uitgewerkt (Elias, 2018), waaruit onder meer blijkt dat de sedimentatie sinds 1990 aanzienlijk minder is dan in de periode daarvoor. Voor de oostelijke Waddenzee is een dergelijke studie voor 2019 gepland.

Inmiddels is aan de hand van verschillende studies beter inzicht verworven in de ontwikkeling van het gemiddeld zeeniveau langs de Nederlandse kust (Baart et al., 2018) en de daaronder

liggende vraagstukken over, onder meer, bodemdaling (Hijma & Kooi, 2018a,b). Bodemdaling leidt tot een aanzienlijke vergroting van de accommodatieruimte in de Noordzee kustzone en Waddenzee. Indien deze accommodatieruimte volledig opgevuld wordt met sediment, leidt dit niet tot een verandering van de bodemhoogte waardoor dit afgezette sedimentvolume ten onrechte buiten de berekening van het sedimentatie-/erosievolume blijft. De conclusie die hieruit getrokken kan worden is dat de ontwikkeling van de bathymetrie in een gebied over de tijd geen volledig inzicht verschaft in eventuele veranderingen in de dikte van het sedimentpakket. De grootte van deze 'verborgen' post is op dit moment niet bekend.

Tenslotte komt binnen afzienbare tijd het onderhoud van de met zand versterkte Zwakke Schakels ten laste van kustlijnzorg.

Bovenstaande argumenten rechtvaardigen het opstellen van een nieuwe sedimentbalans voor de gehele Nederlandse kust waarbij de gegevens worden geactualiseerd, de te beschouwen periode wordt verlengd en de verborgen posten worden meegenomen.

2 Sedimentbalans: vraag en aanbod

Een sedimentbalans is een inventarisatie van de aanvoer en afvoer van sediment naar een afgebakend gebied en de interne verplaatsingen binnen dat gebied. Daarbij wordt uitgegaan van 'vraag' en 'aanbod' van sediment. 'Vraag' is te vertalen als accommodatieruimte waarin sediment afgezet kan worden, 'aanbod' is de aanvoer vanuit de verschillende te onderscheiden bronnen. Sedimentbalansen zijn op te stellen voor een hiërarchie van systemen. Zo zal de sedimentbalans voor een estuarium of getijbekken onderdeel zijn van de sedimentbalans van het aanliggende kuststelsel, dat op zijn beurt weer onderdeel is van de sedimenthuishouding van een groter bekken. Accommodatieruimte, en dus 'vraag', ontstaat door toename van het oppervlak van een balansgebied of door toename van de gemiddelde waterdiepte in een gebied, bijvoorbeeld door stijging van het gemiddeld zeeniveau en/of daling van de (zee)bodem. Ter compensatie van de toegenomen vraag is langs de Noordzeekust aanvulling met zand nodig om de kustlijn op zijn plaats te houden, in getijbekkens is aanvoer van sediment nodig om de hoogte en omvang van intergetijdegebieden in stand te houden. De verhouding van vraag en aanbod is een belangrijke sturende factor in de morfologische ontwikkeling van een kuststelsel op termijn. Als het aanbod niet aan de vraag kan voldoen zal de kustlijn zich landwaarts terugtrekken en/of zal het oppervlak aan intergetijdegebied afnemen. Als het aanbod de vraag overtreft zullen getijbekkens opvullen en op den duur verlanden. De kustlijn bouwt in die situatie zeewaarts uit. Als vraag en aanbod elkaar compenseren zal het kuststelsel grosso modo in evenwicht zijn, wat niet wil zeggen dat er geen kleinschalige veranderingen optreden.

3 Bronnen, putten en fluxen in het Nederlandse kuststelsel

Het Nederlandse kuststelsel is in het verleden opgebouwd met sediment uit de Noordzee, sediment afkomstig van erosie van Pleistoceen reliëf en aanvoer door rivieren, met name de Rijn (Beets & van der Spek, 2000). Herverdeling van sediment binnen het kuststelsel leidt lokaal tot erosie dan wel sedimentatie. Zo wordt zand van de Noordzeekustzone verplaatst naar de aangrenzende getijbekkens. Daarmee zijn de bekkens een put in de sedimentbalans van de kustzone en is de kustzone een bron voor de bekkens.

3.1 Aanvoer naar het Nederlandse kuststelsel

Natuurlijke aanvoer

Voor zover bekend is er geen significante natuurlijke aanvoer van zand vanuit Noordzee meer (Beets & van der Spek, 2000). De netto aanvoer van zand via de rivieren Rijn en Maas beperkt zich tot materiaal dat uit de benedenrivieren en de Rotterdamse haven gebaggerd en op zee gestort wordt. Van dit gestorte volume moet het volume zand dat vanuit de Noordzee naar de Nieuwe Waterweg en de Rotterdamse havens aangevoerd wordt, afgetrokken worden. Het slib in het Rijn- en Maaswater bereikt de kustzone via de Nieuwe Waterweg en de Haringvlietsluizen en wordt verder verspreid waarbij netto het meeste materiaal langs de kust naar het noorden verplaatst wordt. De sedimentaanvoer door de Westerschelde wordt 0,5 miljoen m³ per jaar geschat.¹ Of en hoeveel de Eems bijdraagt aan de zand- en slibhuishouding van de kust is op dit moment onduidelijk.

De aanvoer van zand en slib vanuit de Belgische kustzone moet voor de Nederlandse sedimentbalans als een bron beschouwd worden. De omvang van deze aanvoer is lastig vast te stellen. Een recente schatting komt op orde 1 miljoen m³ per jaar².

Projectmatige aanvoer

De grootste aanvoer van sediment vindt plaats in de vorm van zandsuppleties als onderdeel van de kustlijnverzorging. Aangezien dit zand buiten het kuststelsel gewonnen wordt moet het als netto aanvoer beschouwd worden. Daarnaast worden kusttrajecten waarvoor geen BKL is vastgesteld soms toch onderhouden met zand (bv. de Slufterdam). De hier aangebrachte volumina maken geen deel uit van het kustlijnverzorgingsbudget. Zandige versterkingen van Zwakke Schakels en nieuw aangelegde zandige kustdelen zoals de Van Dixhoorndriehoek en de kust van Maasvlakte 2 zijn netto aanvoerposten in de totale zandbalans. Hetzelfde geldt voor proeven met megasuppleties zoals de Zandmotor. Zie Tabel 1 voor een overzicht van grote ingrepen langs de kust.

3.2 Afvoer uit het Nederlandse kuststelsel

De omvang en richting van sedimentuitwisseling tussen de Nederlandse en Duitse Waddenzee is onbekend. Echter, de netto longshore transporten in oostelijke richting langs de Waddeneilanden en de vermoedelijke oostwaartse netto transporten over de wantijen en het Groninger Wad, maken het waarschijnlijk dat er een netto transport van sediment is naar het Eems estuarium. De sedimenthuishouding van de Eems is sterk beïnvloed door baggeren, storten en landaanwinning, zodat het totaalbeeld niet op voorhand duidelijk is.

¹ Schatting gemaakt tijdens sessie project Kustgenese 2.0 op 3 oktober 2018, zie Van Oeveren-Theeuwes, (2018).

² idem

Sterke sedimentatie in de Oostfriese Waddenzee achter Borkum suggereert dat er netto aanvoer van zand is naar het Eems estuarium. Sedimenttransport over de Nederlands-Duitse grens kan daardoor waarschijnlijk als een putterm in de sedimenthuishouding beschouwd worden.

Netto sedimenttransporten over de andere grenzen van het kuststelsel, de 20 m-contour en de binnenduinrand zijn onbekend, maar worden verondersteld klein te zijn.

<i>Ingreep</i>	<i>Jaar uitvoering</i>	<i>Volume (miljoen m³)</i>
Maasvlakte	1964-1976	
Van Dixhoorndriehoek	1971	18,9
Slufterdam	1986-1987	
Zwakke Schakelversterkingen	2007-2015	p.m.
idem, Hondsbossche Duinen		
Maasvlakte 2	2008-2013	
duincompensatie	2009	5,1
Zandmotor Delfland	2011	18,7
proefpilot Ameland Zeegat	2018	5

Tabel 1. Overzicht van met zand aangelegde projecten langs de Nederlandse kust. Er kan onderscheid gemaakt worden tussen permanente uitbreidingen van de kust die (met zand) onderhouden moeten worden en suppleties die vrij kunnen herverdelen (nog verder aan te vullen!).

Het verplaatsen van sediment van het kustfundament naar dieper water middels baggeren en storten is in principe een putterm in de sedimentbalans. De grootte van deze verplaatsing is op dit moment niet in beeld. Het aan land brengen van zand dat binnen het kuststelsel wordt gewonnen is eveneens een putterm. Ook van deze term is de omvang niet direct in beeld.

3.3 Herverdeling binnen het Nederlandse kuststelsel

Verreweg het grootste deel van de sedimentfluxen binnen het Nederlandse kuststelsel betreft herverdeling. Het grootschalige patroon van herverdeling laat zien dat de Waddenzee een netto afzettingsgebied is, waarbij de gevolgen van de afsluitingen van Zuiderzee en Lauwerszee en de relatieve zeespiegelstijging in de getijdebekken aandrijvende krachten zijn. De Waddenzee is daarmee de belangrijkste put in de sedimentbalans van de Nederlandse kust. Netto werd er bijna 600 miljoen m³ afgezet tussen 1935 en 2005 (Elias et al., 2012). Het grootste deel van het afgezette volume is afkomstig uit de kustzone, met als gevolg erosie van buitendelta's en eilandkusten.

Als reactie op de afsluiting van de Zuiderzee vulden de voormalige noord-zuid lopende hoofdgeulen in de westelijke Waddenzee snel op met slibrijke afzettingen (zie Midderham & de Boer, 1983; Berger et al., 1987). Daarna verliepen de ontwikkelingen geleidelijker: de grote getijgeulen heroriënteerden zich in een meer oost-westelijke richting, de intergetijdegebieden in het bekken van het Marsdiep migreerden in noordoostelijke richting en de kortsluitgeulen tussen de bekken van Marsdiep en Vlie verondiepten.

De oostelijke Waddenzee paste zich snel aan de afsluiting van de Lauwerszee aan. De buitendelta van de Zoutkamperlaag nam fors in omvang af, waarbij een deel van het

'overtollige' zand het bekken in getransporteerd werd en een ander deel op de kust van Schiermonnikoog afgezet werd. In de Zoutkamperlaag zelf werd veel sediment afgezet. In de oostelijke Waddenzee is en wordt op grote schaal aardgas gewonnen waardoor de bodem daalt, maar het wadoppervlak daalt niet mee. De uitwisseling van zand en slib tussen het Groninger wad en het Eems-Dollard estuarium is niet goed bekend. Een recente schatting van het netto transport van Waddenzee naar Eems-Dollard is 2 tot 3 miljoen m³ per jaar³.

Langs de Hollandse kust worden de ontwikkelingen vrijwel volledig gedomineerd door zandsuppleties in kader van de kustlijn­zorg, de zandige versterkingen van de Zwakke Schakels en het daaruit voortkomende onderhoud. Dit resulteert op veel plaatsen in een (forse) zeewaartse verplaatsing van de kustlijn. Het sterkst is dit in kustvak Delfland, waar ook nog een kustuitbreiding (Spanjaardsduin) en een megasuppletie (de Zandmotor) zijn aangelegd.

Ten zuiden van de Nieuwe Waterweg zijn de ontwikkelingen zeer gevarieerd en ook gedomineerd door menselijk ingrijpen. Van noord naar zuid kunnen we de volgende ontwikkelingen onderscheiden. Door de aanleg van Maasvlakte 2 is de kustlijn ter hoogte van het eiland Rozenburg enkele kilometers zeewaarts geschoven. Deze nieuwe kustlijn is geheel in zand aangelegd. De buitendelta's van Haringvliet en Grevelingen zijn sterk veranderd als gevolg van de afsluitingen van deze zee­armen, waarbij de netto volumeontwikkeling over de laatste 40 jaar min of meer neutraal is. De buitendelta van de Oosterschelde neemt na de aanleg van de stormvloedkering in volume af en fungeert daarbij als zandbron voor de Grevelingen buitendelta. Zie Elias et al. (2017) voor meer informatie. De ontwikkelingen in de monding van de Westerschelde worden beïnvloed door het suppleren van grote volumina zand (Geulwandsuppletie Oostgat, Zwakke Schakelversterking Zeeuws-Vlaanderen), baggerwerk in vaargeulen (met name in de Wielingen) en de ontwikkelingen in het estuarium zelf.

3.4 Verborgene posten

Bij het opstellen van een sedimentbalans wordt over het algemeen uitgegaan van de veranderingen in bodemligging tussen twee opnamen, waarbij een afname van de gemiddelde diepte wordt geïnterpreteerd als 'sedimentatie' en een toename als 'erosie'. Voor korte tijdsintervallen, orde enkele jaren, is dit doorgaans voldoende. Voor langere intervallen, orde decennia, zijn er een aantal bijkomende zaken die de netto verandering van het sedimentvolume kunnen beïnvloeden. Compactie van met name fijnkorrelige afzettingen, onder andere door belasting met nieuwe lagen sediment, leidt tot een afname van het volume van de oorspronkelijke afzetting, wat resulteert in extra 'erosie'. Daarnaast zullen op langere tijdschalen zeespiegelstijging en bodemdaling een rol gaan spelen.

3.4.1 Compactie

Bodem­daling door zetting en compactie van Holocene sedimentlagen wordt niet geregistreerd in waterstanden omdat peilmerken gefundeerd zijn op daaronder liggende Pleistocene lagen, maar speelt wel een rol in de sedimentvraag van kustfundament en getijdebekkens. Het effect van ondiepe onttrekkingen zoals grondwaterwinning in de duinen op de bodemligging is geanalyseerd door Hijma & Kooi (2018b). Het effect hiervan op de sedimentbalans is nog niet duidelijk. Afzetting van vooral zand op sli­blagen en veenpakketten

³ Schatting gemaakt tijdens sessie project Kustgenese 2.0 op 3 oktober 2018 (zie verslag Claire van Oeveren).

(bijvoorbeeld in het bekken van het Eierlandse Gat liggen tot 2 m dikke veenlagen onder een dm's dikke laag zand) zal tot samenpersing leiden van deze lagen, waarbij het effect groter wordt bij toenemende dikte van zowel de compactiegevoelige laag als van het overliggende zandpakket. Het sedimentvolume dat de extra 'vraag' tussen twee bodemopnamen aanvult, wordt niet meegeteld in de sedimentbalans. Compactie van onderliggende lagen bij het aanleggen van dikke zandaanvullingen (zoals bijvoorbeeld de Zandmotor en de Hondsbossche duinen) kan resulteren in een lagere hoogte van de top van het aangebrachte pakket, wat weer kan leiden tot het 'ontbreken' van een deel van het aangebrachte sediment in volumebeschouwingen en daarmee ook in de sedimentbalans. Een inventarisatie van samendrukbare pakketten in de ondiepe ondergrond van het kuststelsel kan inzicht verschaffen in de potentiële omvang van deze post in de sedimentbalans.

3.4.2 Zeespiegelstijging

De stijging van het gemiddeld zeeniveau langs de Nederlandse kust wordt berekend uit waterstandswaarnemingen op een zestal getijstations, de zogenaamde hoofdstations (Tab. 1). Waterstanden worden gemeten ten opzichte van een vaste referentie, het NAP-vlak. Als de verticale positie van dit vlak lokaal gezakt is, wordt de afwijking gecorrigeerd. Het is niet altijd duidelijk wanneer en hoeveel gecorrigeerd is (dat wordt nagegaan), en hoe dat doortelt in de vorming van accommodatieruimte en dus in 'sedimentvraag'. Baart et al. (2018) geven een overzicht van de berekende trends van stijging van het gemiddeld zeeniveau voor de hoofdstations, zie Tabel 2. Opvallend is dat de trends voor de stations in de Waddenzee lager zijn dan die langs de westkust. Ook blijkt dat het gemiddeld zeeniveau bij de hoofdstations varieert.

Station	Trend (mm/jaar)	Niveau in 1970 (mm)
Vlissingen	2.1	-97
Hoek van Holland	2.3	-45
IJmuiden	2.1	-74
Den Helder	1.4	-101
Harlingen	1.3	-38
Delfzijl	1.9	-18

Tabel 2; Zeespiegel trends per station, vastgesteld voor de periode 1890-2017. (Bron: Baart et al., 2018)

De waarnemingen sinds het eind van de 18^e eeuw laten een gemiddelde stijging zien van 1,9 mm per jaar. Dat betekent dat een sedimentbalans over de periode 1990 - 2018, het tijdperk waarin kustlijn zorg uitgevoerd wordt, het effect van zeespiegelstijging moet laten zien: het gaat om een stijging van $28 \times 1,9 \text{ mm} \approx 0,05 \text{ m}$. Om het Nederlandse kuststelsel (kustfundament plus aangetakte getijdebekkens) met een oppervlak van 6100 km² (oppervlaktes uit ArcGis bestanden Tinus de Ruiter, WVL⁴) de zeespiegelstijging te laten volgen is er $6100 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \times 0,05 \text{ m} = 305 \text{ miljoen m}^3$ sediment nodig.

Omdat lodingsgegevens ten opzichte van het NAP-vlak worden gepresenteerd zou sedimentatie ten gevolge van zeespiegelstijging meetbaar moeten zijn. Dit is echter niet op voorhand duidelijk. De bathymetrische veranderingen in een groot deel van het kuststelsel zijn vooral het gevolg van de effecten van ingrepen en zandsuppleties. Sedimentatie als gevolg van toename in accommodatieruimte door zeespiegelstijging wordt waarschijnlijk

⁴ NB het oppervlak aan duingebied achter de zeereep zit hier niet in!

hierdoor gemaskeerd. Hoe de post zeespiegelstijging doortelt in de sedimentbalans voor de Nederlandse kust moet verder uitgezocht worden.

3.4.3 Bodemdaling

Het aardoppervlak en de daaronder liggende lagen zijn niet stabiel in verticale positie. De aardkorst ligt op een plastische aardmantel waardoor spanningen in de korst leiden tot verplaatsing van materiaal, zowel horizontaal als verticaal. Als gevolg van geologische processen als tektoniek en isostasie kunnen gebieden dalen of stijgen. Daarnaast leidt onttrekking van materie (zowel vast als vloeibaar) uit de ondergrond tot daling van het aardoppervlak. Voor de sedimentbalans van de Nederlandse kust zijn de volgende aspecten van belang:

Diepe bodemdaling

De getijwaarnemingen op de hoofdstations tonen verschillen in snelheid van stijging van het gemiddeld zeeniveau (zie Tabel 2). Deze verschillen zijn ten dele een gevolg van de natuurlijke daling van diepere lagen door vooral isostatische bewegingen. Aangezien de getijstations gefundeerd zijn op de top van de Pleistocene afzettingen, zullen de stations meezakken met de diepere lagen. Hijma & Kooi (2018a,b) hebben deze component geanalyseerd en geven waarden voor de hierdoor veroorzaakte bodemdaling. Baart et al. (2018) gebruiken deze waarden om de zeespiegeltrends uit te splitsen naar bodemdalingscomponenten en vervolgens de absolute zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust vast te stellen, zie Tabel 3.

Station	Tektoniek + isostasie	Winningen	Bodemdaling	ZSS relatief	ZSS absoluut
	[cm]	[cm]	[mm/jaar]	[mm/jaar]	[mm/jaar]
Vlissingen	-2.4	0.0	-0.24	2.1	1.9
H. van Holland	-3.7	-1	-0.47	2.3	1.8
Ijmuiden	5.0	0.0	-0.5	2.1	1.6
Den Helder	-5.4	0	-0.54	1.4	0.9
Harlingen	-6.0	0	-0.60	1.3	0.7
Delfzijl	-4.8	-24	-0.48	1.9	1.4

Tabel 3; Uitsplitsing bodemdaling en zeespiegelstijging per station (bodemdaling uit Hijma & Kooi, 2018). Tektoniek + isostasie, Winningen en Bodemdaling zijn berekend over de periode 1917-2017. Relatieve zeespiegelstijging is gemeten over de periode 1890-2017. (uit Baart et al., 2018)

N.B. de berekende bodemdalingstrend voor Delfzijl lijkt niet correct: de 24 cm daling door winning is sinds de jaren 1960 opgetreden en is niet terug te vinden in het gemiddelde van 0.48 mm daling per jaar.

De geologische bodemdaling langs de Nederlandse kust neemt van zuid naar noord toe van 1-4 cm per eeuw ter hoogte van Walcheren tot 3-8 cm per eeuw in het Waddengebied (Hijma & Kooi, 2018a: Fig. 2.9). Een snelle berekening, waarbij voor het gebied ten zuiden van de Hondsbossche Duinen (oppervlakte kustfundament + Westerschelde ca. 2100 km²) een waarde van 2-5 cm/eeuw gehanteerd wordt en voor het gebied ten noorden daarvan (oppervlakte kustfundament + Waddenzee inclusief Eems-Dollard, ca. 4000 km²) een waarde van 3-8 cm per eeuw, laat zien dat 40 tot 106 miljoen m³ nodig is om de diepe bodemdaling

over periode 1990-2015 te compenseren. Deze component is tot nu toe niet meegenomen in de berekende volumeveranderingen.

Bodemdaling tussen de hoofdstations

Bodemdaling als gevolg van mijnbouwactiviteiten op tussen de hoofdstations gelegen locaties, zowel in de getijbekkens als in de Noordzeekustzone, maakt geen deel uit van de berekende zeespiegelstijgingstrends. Zo vallen alle gasvelden in de Waddenzee, met uitzondering van het Groningenveld, tussen de hoofdstations Harlingen en Delfzijl. Op de locaties van de gasvelden wordt geen daling van het wadoppervlak waargenomen in de vaklodingen. Dat leidt tot de conclusie dat de bodemdalingsschotels in korte tijd opgevuld zijn met sediment, waardoor vergelijking van de vaklodingen geen 'erosie' registreert en het betreffende afgezette sedimentvolume niet meegenomen wordt in de berekeningen.

4 Plannen voor een nieuwe sedimentbalans

De beschikbaarheid van nieuwe lodingen waarmee de waarnemingsreeksen kunnen worden verlengd en het ontbreken van de hierboven genoemde verborgen posten zijn aanleiding om een nieuwe sedimentbalans voor de Nederlandse kust op te stellen. Als uitgangspunt voor het opstellen van de verschillende bijdragen aan de balans kan de 'rekenregel' voor het berekenen van de sedimentbehoefte van het kustfundament dienen die is geformuleerd door Van der Spek et al. (2015) en verder uitgewerkt door Lodder (2016). Daarbij zal de sedimentvraag van de getijdebekken verder uitgesplitst worden.

Het achterliggende idee van de sedimentbalans is het in beeld brengen en kwantificeren van de sedimentfluxen in het kuststelsel. Door de fluxen zo goed mogelijk te kennen, kunnen de netto volumeveranderingen die afgeleid worden uit de bathymetrische ontwikkelingen en aangevuld met de genoemde verborgen posten, beter in perspectief geplaatst worden. Op dit moment kunnen de netto transporten niet vastgesteld worden, "de vergelijking heeft teveel onbekenden" om het probleem op te kunnen lossen. Een voorbeeld is de volumebalans voor de Voordelta. Elias et al. (2017) berekenen forse veranderingen in de sedimentvolumes van de buitendelta's, maar de laterale uitwisseling van sediment is waarschijnlijk factor 2-3 groter. Waar dat sediment dan blijft is niet duidelijk. Eenzelfde probleem doet zich voor bij de interpretatie van de volumeveranderingen in de westelijke Waddenzee (Elias, 2018). Ook hier ontbreekt voldoende inzicht in de sedimentfluxen tussen de verschillende delen van het systeem waardoor de ontwikkelingen niet goed geduid kunnen worden. Door zowel de natuurlijke fluxen als ook de kunstmatige sedimentverplaatsingen in beeld te brengen kan hopelijk een completer en daarmee beter sluitend beeld verkregen worden. Daarnaast kunnen de berekende volumeveranderingen op detailniveau wellicht nog verbeterd worden door tot nu toe ontbrekende delen mee te nemen. Zo is de sedimentatie langs de randen van het systeem (duinvorming en washovers op de eilandstaarten (géén BKL!) van de Waddeneilanden; sedimentatie in landaanwinningswerken en kwelders Waddenzee) in de huidige balans nog niet meegenomen. Of dit een significant verschil maakt is op dit moment niet duidelijk. Ook vindt er verstuiving van zand naar het duingebied achter de zeereep plaats. Bij een gesloten zeereep zal het om een gering volume gaan. Er wordt in toenemende mate geëxperimenteerd met het aanleggen of laten ontstaan van stuifgaten in de zeereep, waardoor het doorstuivend volume toe zal nemen. Vooral nog wordt ervan uitgegaan dat het om een klein volume gaat.

Tenslotte is het zinvol de berekende volumeveranderingen te koppelen aan waargenomen morfologische ontwikkelingen, zodat een beter beeld ontstaat van recente regionale trends en lokale afwijkingen daarvan. Als voorbeeld hierbij kan de berekende sedimentatie in de westelijke Waddenzee dienen. De netto volumeveranderingen over de periode 1935-2005 blijken groot te zijn, terwijl de veranderingen over de periode 1990-2005 voor het Marsdiep klein zijn. In dit geval is dat een gevolg van de snelle opvulling van door de Afsluitdijk afgesneden getijgeulen die rond 1975 voltooid was (Minderham & de Boer, 1983). Zonder inzicht in de morfologische ontwikkelingen kunnen volumeveranderingen en eventuele trendbreuken daarin, vaak niet goed begrepen worden. Bovendien kan inzicht in de veranderingen op kortere tijdschalen, en dan met name de sedimentatiesnelheden, aanwijzingen geven omtrent de samenstelling van het afgezette sediment. Dat laatste zou in principe een betere onderverdeling in zandige en slibrijke afzettingen mogelijk moeten maken, waarmee de sedimentbalans in theorie beter kloppend gemaakt kan worden.

5 Referenties

Baart, F, Nicolai, R, Rongen, G, 2018. Zeespiegelmonitor 2018. De stand van zaken rond de huidige zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust. Deltares rapport 11202193-000-ZKS-0004 (status: voorlopig).

Beets, DJ, van der Spek, AJF, 2000. The Holocene evolution of the barrier and the back-barrier basins of Belgium and the Netherlands as a function of late Weichselian morphology, relative sea-level rise and sediment supply. *Netherlands Journal of Geosciences* 79 (1), 3-16.

Berger, GW, Eisma, D, van Bennekom, AJ, 1987. ²¹⁰Pb-derived sedimentation rate in the Vlieter, a recently filled-in tidal channel in the Wadden Sea. *Netherlands Journal of Sea Research* 21 (4), 287-294.

de Ronde, J, 2008. Toekomstige langjarige suppletiebehoefte. Deltares rapport Z4582.24.

Elias, E, 2018. Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015). Deltares rapport 11202190-000-ZKS-0013.

Elias, EPL, van der Spek, AJF, 2017. Dynamic Preservation of Texel Inlet, the Netherlands. Understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. *Netherlands Journal of Geosciences* 96 (4), 293-317. (doi:10.1017/njg.2017.34).

Elias, EPL, van der Spek, AJF, Lazar, M, 2017. The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: Large-scale morphological changes and sediment budget 1965-2013; Impacts of large-scale engineering. *Netherlands Journal of Geosciences* 96 (3), 233-259. (doi:10.1017/njg.2016.37)

Hijma, M, Kooi, H, 2018a. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdebekkens. Deltares rapport 11200538-008-ZKS-0001.

Hijma, M, Kooi, H, 2018b. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdebekkens (deel 2). Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden. Deltares rapport 11202190-001-ZKS-0001.

Lodder, Q, 2016. Rekenregel suppletievolumes. Memo Rijkswaterstaat.

Midderham, H, de Boer, M, 1983. Sedimentatie-onderzoek detailgebied de Vlieter 1933-1980. Notitie WWKZ-83.H217, Rijkswaterstaat, Hoorn.

Van der Spek, A, Elias, E, Lodder, Q, Hoogland, R, 2015. Toekomstige suppletievolumes – Eindrapport. Deltares rapport 1208140-005-ZKS-0001.

Van der Spek, A, Lodder, Q, 2015. A new sediment budget for the Netherlands: the effect of 15 years of nourishing (1991-2005). Deltares rapport 1220040-007-ZKS-0001.

Van der Spek, A, Lodder, Q, 2017. Sedimentbalans Nederlandse kust 1990-2005. Deltares rapport 11200538-004-ZKS-0007.

Van Oeveren-Theeuwes, C, 2018. Verslag invuloefening rekenregel sedimentvraag kustbeleid. Deltares.

Vermaas, T, Marges, V, 2017. Volumeanalyse oostelijke Wadden. Deltares rapport 1230043-003-ZKS-0001.

Vermaas, T, van Dijk, T, Hijma, M, 2015. Bodemdynamica van de diepe onderwateroever, met oog op de -20 m NAP lijn. Deltares rapport 1220034-003-ZKS-0002.