

Sedimentbalans Waddenzee

Synthese ten behoeve van Technisch Advies Kustgenese 2.0



Sedimentbalans Waddenzee

Synthese ten behoeve van Technisch Advies Kustgenese 2.0

Auteur(s)

Edwin Elias

Zheng Wang

Sedimentbalans Waddenzee

Synthese ten behoeve van Technisch Advies Kustgenese 2.0

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Carola van Gelder en Harry de Looff
Referenties	Kustgenese 2.0, zaaknummer 31123135
Trefwoorden	Kustgenese 2.0, Kustfundament, Zeegaten, Waddenzee, Sedimentbalans, Zandtransport, Zeespiegelstijging

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	24-02-2020
Projectnummer	1220339-007
Document ID	1220339-007-ZKS-0010
Pagina's	29
Status	definitief

Auteurs(s)

	Edwin Elias	
	Zheng Wang	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Edwin Elias 	Ad van der Spek 	Toon Segeren 	
	Zheng Wang			

Samenvatting

Het zandverlies vanuit het kustfundament naar de Waddenzee is een belangrijke term voor de sedimentbehoefte van het kustfundament. In het kader van het Kustgenese 2.0 onderzoek “lange termijn kustontwikkeling” is de grootte van deze term – in miljoen m³/jaar – onderzocht. Dit syntheserapport heeft tot doel om het verwachte zandverlies naar de Waddenzee en de bandbreedte rondom de verwachting af te leiden voor de periode tot 2035 en voor de periode 2035-2100. Hiervoor zijn de onderzoeksresultaten van de studies van Elias (2019) en van Wang en Lodder (2019) gebundeld en samengevat.

Periode tot 2035

Voor de periode tot 2035 wordt uitgegaan van de huidige snelheid van zeespiegelstijging. De sedimentuitwisseling tussen kustfundament en Waddenzee kan dan afgeleid worden uit de recente trend van volumeverandering per kombergingsgebied van de zeegaten. In de volumebalans, die zowel per zeegatsysteem als voor de gehele Waddenzee is opgesteld, worden naast de volumeverandering de volgende termen meegenomen: a) bodemdaling door gas- en zoutwinning, b) transport over de wantijen, c) bagger- en/of stortvolumes, d) zand- en schelpenwinning, e) transport naar kwelder, en f) transport door de zeegaten. Van deze termen zijn alleen het transport over de wantijen en het transport door de zeegaten onbekenden. Van de overige termen zijn metingen en/of gegevens beschikbaar. Door aannamen te doen van de uitwisseling over de individuele wantijen – op basis van lokale volumeveranderingen nabij het wantij en expert judgement – is een schatting gemaakt van de bijdrage per zeegat.

Uitwerking van de volumebalans geeft tot 2035 een netto sedimentexport vanuit het kustfundament naar de Waddenzee (exclusief Eems-Dollard) van +5,2 miljoen m³/jaar. Gecorrigeerd voor het percentage slib, waarvoor de 8% ondergrens van de gevonden range van 8% tot 40% (Oost et al., 2018) is aangenomen, komt de totale netto zandimport door de zeegaten van de Waddenzee exclusief Eems-Dollard uit op 4,7 miljoen m³/jaar. Voor de Eems-Dollard is geen volumebalans opgesteld, maar is beschikbare literatuur gebruikt om een geschat zandtransport van +1,2 miljoen m³/jaar af te leiden.

Het grootste zandtransport treedt op door het Zeegat van Texel (+1,9 miljoen m³/jaar). Het Eierlandse Gat transporteert zand van de Waddenzee naar het kustfundament (-0,3 miljoen m³/jaar). Zandtransport door het Zeegat van het Vlie wordt geschat op +1,1 miljoen m³/jaar, door het Zeegat van Ameland op +1,1 miljoen m³/jaar en door het Friesche Zeegat op +0,4 miljoen m³/jaar, en richting het Groninger Wad tenslotte op +0,6 miljoen m³/jaar.

De bandbreedte rond de zandtransporten (exclusief Eems-Dollard) is bepaald op 18% door voor alle termen van de volumebalans een boven- en een ondergrens in te schatten en vervolgens de volumebalans op te lossen. Dit levert 81 uitkomsten voor het zandtransport door de zeegaten. De range van uitkomsten heeft een standaarddeviatie van 18%, ofwel ± 0,9 miljoen m³/jaar. Het zandtransport naar de Eems-Dollard heeft een grote onzekerheid, omdat de sedimentbalans in het estuarium erg complex is door de interactie van zand en slib, de bagger- en stortactiviteiten en de zandwinning, en de Nederlands-Duitse grens.

Periode 2035-2100

Met behulp van modelberekeningen met ASMITA zijn toekomstige sedimenttransporten door de zeegaten van 2035 tot 2100 berekend voor verschillende zeespiegelstijgingsscenario's. ASMITA is een geaggregeerd morfodynamisch model voor zeegatsystemen op basis van empirische relaties. Voor de omrekening van sedimenttransport naar zandtransport is wederom een slibpercentage van

8% aangenomen. Voor het Groninger Wad en de Eems-Dollard is geen ASMITA model beschikbaar.

Uit de analyses volgt dat bij voorzetting van de huidige zeespiegelstijging het zandtransport naar de Waddenzee (exclusief Groninger Wad en Eems-Dollard) daalt van 4,2 miljoen m³/jaar nu naar 3,3 miljoen m³/jaar in 2100. De transportcapaciteit is meer dan voldoende om deze zeespiegelstijging bij te houden, waardoor de Waddenzee langzaam gemiddeld iets ondieper wordt.

Bij het hoogste zeespiegelstijgingsscenario van 8 mm per jaar wordt in 2100 een toename van 40% verwacht tot 5,8 miljoen m³/jaar ten opzichte van de huidige zandtransport naar de Waddenzee (exclusief Groninger Wad en Eems-Dollard) van 4,2 miljoen m³/jaar. De toename is relatief gering, omdat de zeegatsystemen vertraagd reageren op de verandering van zeespiegelstijging. De vertraging is groter voor de zeegaten met grotere bekkens en met een sedimenttekort door ingrepen in het verleden (afsluiting Zuiderzee en Lauwerszee). Door de lange morfologische tijdschaal is het morfologisch evenwicht in 2100 nog niet bereikt en zal de zandimport na 2100 nog verder toenemen. Hoeveel en hoe lang nog is niet in deze studie onderzocht.

De versnelling van de zeespiegelstijging is in de modelscenario's vanaf 2020 opgelegd. De modelresultaten laten zien dat verschillen in zandtransport door de zeegaten pas merkbaar worden in 2030 in de kleine systemen van het Pinkegat en Eierlandse Gat en pas aan het eind van de eeuw in het grote zeegatsysteem van het Zeegat van Texel waarvan bekend is dat de zandimport transport gelimiteerd is. De veranderingen van de zandimport ten opzichte van de huidige situatie zijn relatief klein. Voor de Waddenzee als geheel (exclusief Groninger Wad en Eems-Dollard) neemt voor alle zeespiegelstijgingsscenario's de totale zandimport eerst af in de tijd door het dempen van de verstoringen door de ingrepen in het verleden. De versnelling van zeespiegelstijging buigt deze afnemende trend om, maar niet vóór 2050. Tot 2060 zijn de verschillen niet significant.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding en doelstelling	7
2	Een beknopte beschrijving van de Waddenzee	8
2.1	Gebiedsbeschrijving en morfologische kenmerken	8
2.2	De werking van het morfologische systeem	9
3	Huidige sedimenttransport naar de Waddenzee	11
3.1	Methode van berekening en onderbouwing van de getallen	11
3.2	De volumebalans	15
3.3	Een schatting van de nauwkeurigheid	18
3.4	Een schatting van de volumeverliezen van het Groninger Wad en het Eems-Dollard Estuarium	21
4	Toekomstige sedimenttransport naar de Waddenzee	24
5	Referenties	29

1 Inleiding en doelstelling

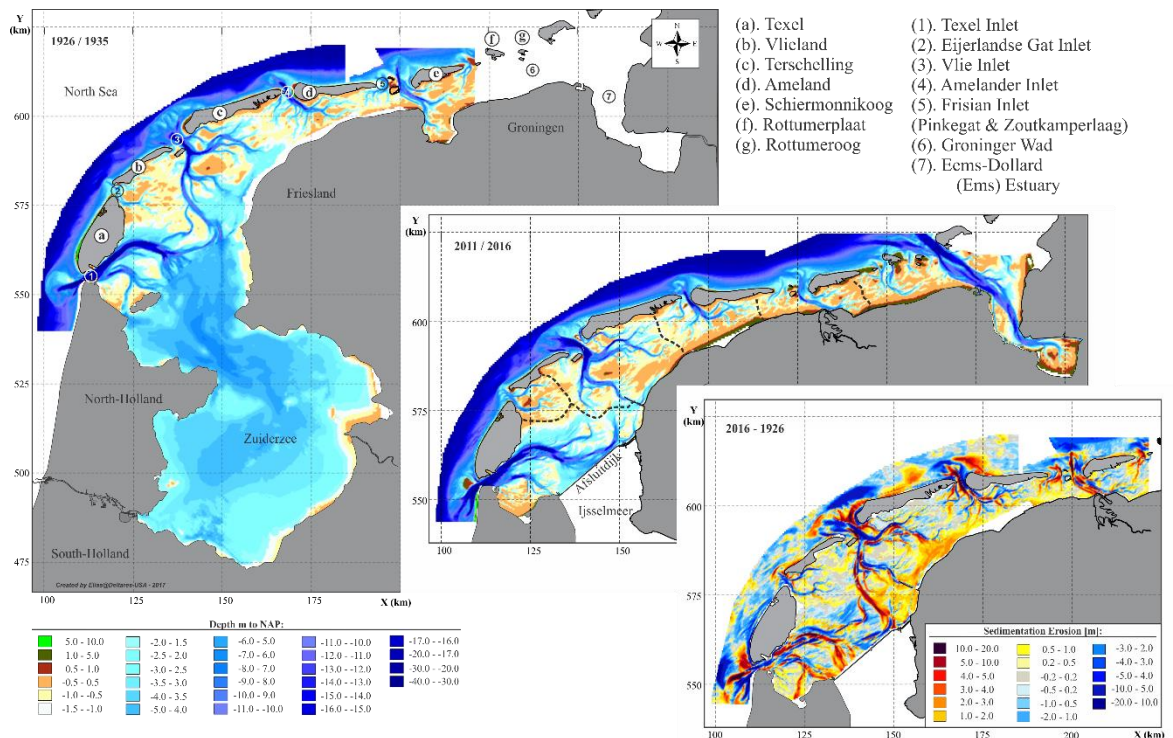
De rekenregel uit Rijkswaterstaat (2016) is het uitgangspunt voor de bepaling van de sedimentbehoefte van het kustfundament. Een belangrijke verliespost in de rekenregel is het zandverlies vanuit het kustfundament richting de Waddenzee. Eerdere studies van Elias *et al.* (2012) en Wang *et al.* (2018) presenteren de laatste inzichten in de sedimenthuishouding en morfologie van de Waddenzee, gebaseerd op een analyse over de periode 1935-2005. Deze studies laten zien dat er gedurende deze periode ongeveer 650 miljoen m³ sediment de Waddenzee is in getransporteerd. Deze studies geven een goed beeld van wat er in het verleden is gebeurd, maar het is echter de vraag in hoeverre de geobserveerde volumeveranderingen ook een representatief beeld geven van de huidige en toekomstige zandvraag van de Waddenzee. Binnen de onderzoekprogramma's KPP B&O Kust (deelproject 'uitwisseling getijddebekken Waddenzee en morfodynamiek eilandkoppen'), KPP Morfologie Wadden en Kustgenese 2.0 hebben Deltares en Rijkswaterstaat de afgelopen jaren samengewerkt om het inzicht in de huidige en toekomstige sedimenthuishouding van de Waddenzee te vergroten.

In dit Technisch Advies worden de resultaten van de studie van Elias (2019) en van Wang en Lodder (2019) beknopt samengevat. Op basis van de berekende volumeveranderingen in het bekken (recente trend inclusief correcties voor ingrepen) wordt hieruit de huidige zandbehoefte afgeleid (H2 en H3; Elias, 2019). Een schatting voor de toekomstige verliezen onder invloed van verschillende zeespiegelstijgingsscenario's is gebaseerd op ASMITA berekeningen (H4; Wang en Lodder, 2019).

Het doel van deze samenvatting is een onderbouwing te geven voor de verliesposten uit het Kustfundament naar de Waddenzee te gebruiken in het Technisch Advies Sedimentbehoefte Kustfundament (Deltares, 2020).

2 Een beknopte beschrijving van de Waddenzee

2.1 Gebiedsbeschrijving en morfologische kenmerken



Figuur 2.1 : Een overzicht van de bodem van de Waddenzee voor de periode 1926/1935, 2011/2016 en de morfologische veranderingen (1926-2016). De geel-rode kleuren geven sedimentatie weer, de blauwe kleuren erosie.

Aan de noordwestzijde van Nederland bevindt zich de Waddenzee. De Waddenzee is geologisch gezien een jong gebied. Over een periode van 7000 jaar heeft zich een uniek landschap gevormd, dat bestaat uit een opeenvolging van diepe en ondiepe platen, grote en kleine geulen, kweldergebieden, zeegaten en eilanden. Aan de noordoostzijde vormt het Eems-Dollard estuarium de scheiding met het Duitse deel van de Waddenzee.

De Waddenzee wordt vaak gezien als een ongestoord gebied waar de natuurlijke processen vrij hun gang kunnen gaan zonder dat de mens daar een grote invloed op heeft. De studie van Elias et al. (2012) laat echter zien dat natuurlijke processen ongestoord hun gang kunnen gaan, maar wel binnen een begrenzing die door menselijke ingrepen is gevormd. Gedurende de laatste eeuwen hebben we de grenzen van de Waddenzee vrijwel vastgelegd of zelfs zeewaarts verschoven. De kusten van Noord-Holland, Friesland en Groningen worden beschermd door dijken en zeeweringen. De afsluitdijk heeft in 1932 de voormalige Zuiderzee afgescheiden van de Waddenzee. De kustlijn van de centrale eilandkusten wordt door strekdammen (Texel, Vlieland) en zandsuppleties op de 1990 ligging gehouden. Ondanks deze ingrepen, blijft het karakteristieke Waddenlandschap goed behouden. Zowel in de oude (1926/1935) bodem als in een recente (2011/2016) weergave zien we overeenkomstige morfologische kenmerken (Figuur 2.1).

Het westelijke deel van de Waddenzee wordt gevormd door de kombergingsgebieden van drie zeegaten: het Zeegat van Texel (ook wel Marsdiep genoemd), het Eierlandse Gat en het Zeegat

van het Vlie. Het oostelijke deel wordt gevormd door de bekkens van het Zeegat van Ameland en het Friesche Zeegat met ten oosten hiervan het Groninger Wad en het Eems-Dollard Estuarium. Deze laatste twee gebieden worden in deze studie niet direct berekend, maar zijn afgeleid uit de literatuur (paragraaf 3.4). De belangrijkste reden hiervoor zijn dat de grote dynamiek van de buitendelta's, de uitwisseling met de Eems-Dollard en de vele ingrepen (bagger- en stort werkzaamheden) die hier uitgevoerd worden, het niet mogelijk maken een nauwkeurige randvoorwaarde of begrenzing te trekken voor het oplossen van de sedimentbalans.

Wat direct opvalt in Figuur 2.1, zijn de grote geulen in het westelijke deel van het bekken. Vanaf het zeegat (Marsdiep) strekken de geulen Texelstroom en Doove Balg zich in oostelijke richting, langs de Afsluitdijk, uit. Via een ondiep gebied ten westen van Harlingen (Kornwerderzand) gaan de geulen over in het bekken van het Vlie. Een hele duidelijke scheiding tussen de twee bekkens is hier eigenlijk niet aanwezig. Zo'n scheiding is wel duidelijk zichtbaar richting het Eierlandse Gat in de vorm van de plaatgebieden Waarden en de noordelijke Waardgronden. In de Westelijke Waddenzee zijn er grote morfologische veranderingen opgetreden sinds afsluiting van de Zuiderzee (voltooid in 1932). Voor afsluiting lagen er in het bekken van het Vlie grote en diepe geulen die verbinding maakten met de Zuiderzee. Deze geulen zijn grotendeels opgevuld met sediment en in de recente bodem hebben zich hier grote platen (zoals de Vlakte van Oosterbierum) gevormd. Dit gebied begint dan ook overeenkomsten te vertonen met het oostelijke deel van de Waddenzee.

De kombergingsgebieden van het Ameland en Friesche Zeegat worden gekenmerkt door grote diepe geulen in en nabij het zeegat. In het bekken vertakken deze geulen zich in een stelsel van steeds kleiner wordende geulen. Langs de kust van Friesland en Groningen zijn er uitgebreide plaatoppervlakten en kweldergebieden aanwezig. Ook tussen de zeegaten vinden we duidelijke ondiepten ter plaatse van de wantijen. Deze wantijen worden vaak gebruikt om een morfologische afbakening te maken tussen de verschillende bekkens van de zeegaten in de Waddenzee. Het idee is dat de ondiepten die gevormd worden de sedimentuitwisseling tussen de systemen beperkt houden, waardoor het mogelijk is de kombergingsgebieden te scheiden (zie onderverdeling in Figuur 2.1, 2011/2016). Dit zijn van west naar oost respectievelijk het Terschellinger Wad (scheiding tussen de bekkens van het Zeegat van het Vlie en Ameland), het Pinkewad (Ameland - Friesche Zeegat) en het Hornhuizerwad aan de oostzijde van het Friesche Zeegat.

Met uitzondering van het Friesche Zeegat hebben alle zeegaten een duidelijke, diepe hoofdgeul welke verbinding maakt met het achterliggende geulenstelsel. Het Friesche Zeegat heeft 2 relatief grote hoofdgeulen gescheiden door de Engelsmanplaat. Het wat kleinere Pinkegat vormt het westelijke deel van het Zeegat en maakt verbinding met het achterliggende bekken. Ten oosten van de Engelsmanplaat vinden we de grotere en diepere geul Zoutkamerlaag. Het geulenstelsel van de Zoutkamerlaag heeft zich na afsluiting van de Lauwerszee (1969) in oostelijke richting verlegd en uitgebreid. Beide geulen dragen bij aan de vorming van de gezamenlijke, voorliggende buitendelta.

2.2 De werking van het morfologische systeem

Al sinds de 15^{de} eeuw zijn er regelmatig kaarten en bodemopnamen van de Waddenzee gemaakt. Deze unieke tijdreeks maakt het mogelijk de morfologische veranderingen goed en gedetailleerd in kaart te brengen. De oude bodemopnamen zijn alleen via (papier) kaarten beschikbaar, maar vanaf 1926 data ook digitaal beschikbaar welke het mogelijk maakt verschilkaarten te genereren en volumes te bepalen. De bodemkaarten uit de periode 1926-1986 zijn gedigitaliseerd vanaf de papieren kaarten. Sinds 1987 wordt de data digitaal opgenomen en opgeslagen. De kustzone van de zeegaten wordt in 3-jaarlijks interval gemeten en het bekken elke 6 jaar. Van west naar oost wordt jaarlijks een bekken ingemeten, dus na 6-jaar is er dan een volledige opname van de kust en het bekken van de Waddenzee. De digitale dataserie vormen de basis van de sedimentbalans zoals weergegeven in deze studie. Voor een gedetailleerd overzicht van de data en methode van verwerking wordt verwezen naar Elias (2019).

De verschilkaart weergegeven in Figuur 2.1 laat al duidelijk zien dat er zich over de periode 1926-2016 grote morfologische veranderingen hebben voorgedaan in de Waddenzee en langs de aanliggende kust. Eerdere studies (Elias et al., 2012; Wang et al. 2018) geven aan dat het sedimentvolume in de Waddenzee in de periode 1935-2005 met ruwweg 650 miljoen m³ is toegenomen. Het merendeel van dit sediment werd geleverd door de buitendelta's die sterk in volume afnamen. De toename in sedimentvolume is ruimschoots voldoende om het effect van zeespiegelstijging te compenseren. Echter, Elias et al. (2012) concluderen ook dat de grootste volumeverandering, ongeveer 75%, plaatsvindt in het westelijke deel van de Waddenzee. Hier vulden de afgesloten geulen op en vond er grote sedimentatie plaats langs de kust van Friesland en Noord-Holland (zie Figuur 2.1). Deze sedimentatie lijkt dan ook in belangrijke mate het gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee en niet primair een respons op bijv. de stijging van de zeespiegel. De geobserveerde stabiliteit van de bekkens van het Friesche Zeegat en Groninger Wad laten wel zien dat er voldoende sediment aanwezig is om relatieve bodemdaling, door zeespiegelstijging maar ook gas- en zoutwinning, te compenseren. In deze bekkens zou bodemdaling door de onttrekking van gas aan de ondergrond het watervolume met 38 miljoen m³ vergroten. Deze bodemdaling is in de bekkens echter niet terug te zien. De grote netto sedimenttransporten richting Waddenzee bevestigen de conclusies uit o.a. Stive et al. (1990), dat de Waddenzee een belangrijke verliespost van het Nederlandse kuststelsel vormt.

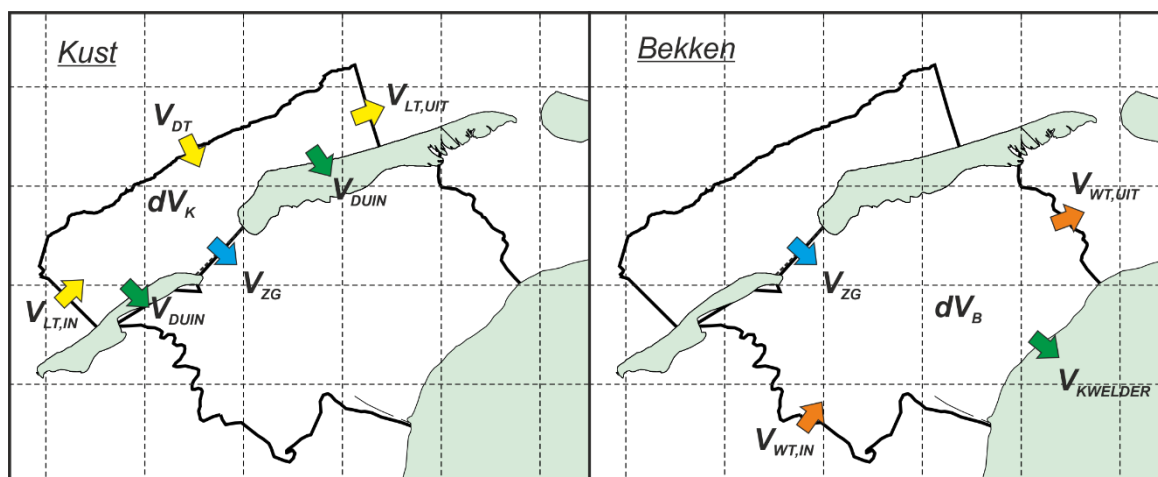
Het is echter de vraag in hoeverre deze volumeveranderingen uit het verleden ook een representatief beeld geven van de huidige en toekomstige sedimentvraag. Om een betrouwbare voorspelling voor de toekomst te maken is het zaak om de sedimenttransportpaden en de resulterende volumeveranderingen veel beter te begrijpen. We moeten niet alleen de volumeverandering per kombergingsgebied kennen, maar ook de uitwisseling tussen de kombergingsgebieden en de daar achterliggende processen begrijpen.

3 Huidige sedimenttransport naar de Waddenzee

Het sedimenttransport naar de Waddenzee wordt op basis van volumebalansen afgeleid voor het Zeegat van Texel, het Eierlandse Gat, het Vlie, het Amelander Zeegat en het Friesche Zeegat (gecombineerd Pinkegat en Zoutkamperlaag). Voor het Groninger Wad en de Eems-Dollard zijn onvoldoende of te onzekere gegevens beschikbaar om een volumebalans op te stellen. Deze twee zeegaten worden apart besproken in paragraaf 3.4.

3.1 Methode van berekening en onderbouwing van de getallen

De ‘klassieke’ methode van het bepalen van de sedimentbalans bestaat uit het in kaart brengen van de erosie en sedimentatievolumes die binnen een vast balansgebied optreden. Hierop kan dan een correctie worden toegepast voor extra sedimentverliezen of toevoegingen zoals door bodemdaling, zandsuppleties en zandwinning. Deze methode is o.a. toegepast in de eerdere studies van Walburg (2001) en Elias et al. (2012). In deze studies werd het effect van bodemdaling niet rechtstreeks in de volumes verwerkt. Dit laatste is wel gedaan in de studie van Wang et al. (2018). In deze studies werden de afzonderlijke bekkens, ofwel kombergingsgebieden, apart beschouwd. De eventuele uitwisseling tussen de bekkens wordt hierin niet expliciet meegenomen. Dat deze aanname eigenlijk niet geldig is, is wel bekend, maar het is niet per definitie een probleem. Als we puur naar de volumeveranderingen per deelgebied kijken en onder de aanname dat de geobserveerde trends zich ook in de toekomst doorzetten, dan maakt het in essentie niet uit waar het sediment vandaan komt. Wat we observeren geeft een beeld voor de toekomst. Het probleem in de Waddenzee is echter dat de volumeveranderingen zoals geobserveerd in het verleden waarschijnlijk niet de juiste trend geven voor de toekomst. Zo is de volumeverandering in met name de Westelijke Waddenzee gedomineerd door de effecten van de afsluiting van de Zuiderzee. Deze effecten ebben langzaam weg en zullen in de toekomst dan ook niet meer of in veel mindere mate een rol spelen. Om een betrouwbare voorspelling voor de toekomstige sedimentbehoefte te verkrijgen is het daarom een noodzaak om de achterliggende processen verantwoordelijk voor de volumeveranderingen veel beter te begrijpen.



Figuur 3.1 Conceptuele uitwerking van een sedimentbalansmodel voor de kust (links) en voor het bekken (rechts)

Een geschematiseerde weergave van het “sediment-delend systeem” wordt gegeven in Figuur 3.1 en vormt de basis voor de sedimentbalansmodellen zoals gebruikt in deze studie. Het conceptueel model geeft een samenvatting van alle netto winst- en verliesposten per zeegat. Als deze uitgewerkt worden kunnen we de sedimentimport of -export in de zeegaten (blauwe pijlen) uitrekenen. Eigenlijk

vormt de kust + bekken een zand delend systeem, maar de winst- en verliesrekening is ook voor de kust en bekken apart op te stellen.

De gemeten bodemverandering in de kustzone (dV_K) is in principe een simpele optelsom van de verschillende winst- en verliesposten zoals samengevat in onderstaande vergelijking:

$$dV_K = (dV_{SUB} + dV_{SUB_GAS/ZOUT}) + V_{IN} - V_{UIT}$$

met

$$V_{IN} = V_{LT,IN} + V_{DT,IN} + V_{STORTEN} + V_{SUPPLETIES}$$

$$V_{UIT} = V_{ZG} + V_{LANGS,UIT} + V_{DT,UIT} + V_{DUIN} + V_{BAGGEREN} + V_{ZANDWINNING} + V_{SCHELPEWINNING}$$

Hierin is:

- dV_K = gemeten volumeverandering van de kustzone.
- dV_{SUB} = subsidence of bodemdaling in het betreffende deel van het kustvak.
Deze bestaat uit de natuurlijke bodemdaling, maar ook de extra bijdragen door o.a. de winning van gas en zout.
- V_{ZG} = netto transport door het zeegat.
- $V_{LT,IN/UIT}$ = netto langstransport balansgebied in of uit.
- $V_{DT,IN/UIT}$ = netto dwarstransport balansgebied in of uit.
- V_{DUIN} = volumeverlies naar de duinen.
- $V_{STORTEN}$ = volumetoename door storten van sediment.
- $V_{SUPPLETIES}$ = volumetoename door uitgevoerde suppleties .
- $V_{BAGGEREN}$ = volumeverlies door baggeren van sediment.
- $V_{ZANDWINNING}$ = volumeverlies door zandwinning.
- $V_{SCHELPEWINNING}$ = volumeverlies door schelpenwinning.

In het bekken kan de balans worden geschreven in de vorm:

$$dV_B = (dV_{SUB} + dV_{SUB_GAS/ZOUT}) + V_{IN} - V_{UIT}$$

met

$$V_{IN} = V_{ZG} + V_{WT,IN} + V_{STORTEN}$$

$$V_{UIT} = V_{WT,UIT} + V_{BAGGEREN} + V_{ZANDWINNING} + V_{SCHELPEWINNING} + V_{KWELDER}$$

Hierin is:

- dV_B = gemeten volumeverandering van het bekken.
- dV_{SUB} = subsidence of bodemdaling in het betreffende deel van het kustvak.
Deze bestaat uit de natuurlijke bodemdaling, maar ook de extra bijdragen door o.a. de winning van gas en zout.
- $V_{WT,IN/UIT}$ = netto transport (in of uit) over de wantijen.
- V_{ZG} = netto transport door het zeegat.
- $V_{STORTEN}$ = volumetoename door storten of suppleren van sediment.
- $V_{BAGGEREN}$ = volumeverlies door baggeren van sediment.
- $V_{ZANDWINNING}$ = volumeverlies door zandwinning.
- $V_{SCHELPEWINNING}$ = volumeverlies door schelpenwinning.

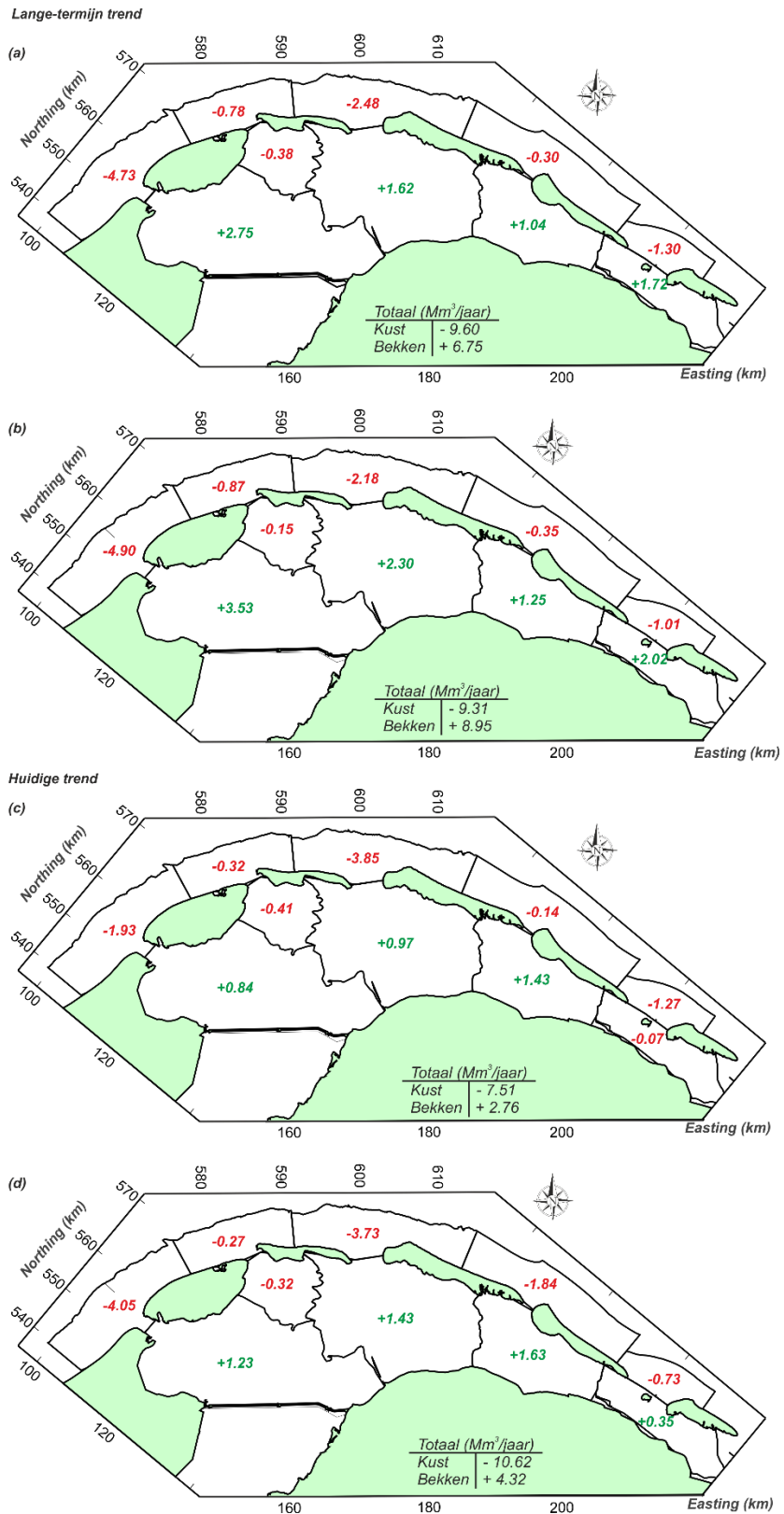
Met schattingen van deze winst- en verliesposten kunnen de transporten tussen de verschillende balansgebieden worden berekend. De meerwaarde van een dergelijke aanpak is dat we enerzijds veel meer grip krijgen op het functioneren van het systeem (nu en in de toekomst) en anderzijds ook zichtbaar wordt waar kennislacunes zijn die we moeten invullen, willen we gesteld staan voor de toekomst.

De basis van het sedimentbalansmodel bestaat uit een verdeling in grootschalige morfologische eenheden. Per zeegat wordt een kustgebied en een bekken gedefinieerd. De kustpolygonen omsluiten ruwweg het gebied vanaf het midden van de eilanden tot de -15 / -20m contour aan de zeezijde. Het bekken gebruikt de wantijen als afbakening. Dit sluit aan op de beschikbaarheid van de bodemdata. Voor ieder zeegat kan de sedimentbalans voor de kustzone en het bekken apart worden beschreven en het transport door het zeegat worden bepaald (Figuur 3.1).

Een samenvatting van de winst- en verliesposten wordt gegeven in Figuur 3.2 voor de langetermijntrends (a,b) en voor het huidige gedrag (c,d). Deze getallen zijn gebaseerd op Elias (2019). Een volledig overzicht van de onderliggende getallen voor de huidige trend is weergegeven in Tabel 3.1 en Tabel 3.2. De trendlijnen zijn in deze studie per kombergingsgebied zodat deze het morfologische gedrag op zowel lange termijn en voor de huidige trend optimaal benaderen. Dit betekent wel dat de periode van de trendlijnbepaling per deelgebied kan afwijken. Gedeeltelijk kunnen deze afwijkingen worden verklaard door verschillen in respons op grootschalige veranderingen (zoals afsluiting van de Zuiderzee), maar ook de verschillen in periode en (on)nauwkeurigheid tussen de opname van de deelgebieden speelt een rol. De langetermijntrends in de Westelijke Waddenzee zijn voor zowel bekken als kustzone afgeleid over de periode 1933-2015. Het huidige gedrag is hier gebaseerd op de periode waarin de grootschalige aanpassing aan de gevolgen van de afsluiting van de Zuiderzee is uitgedempt. Voor de kustzone geeft dit de periode 1997-2015 en voor het bekken is dit 1991-2015. In de Oostelijke Waddenzee is de langetermijntrend gebaseerd op de periode 1926/1948 – 2012/2015 en de huidige trend op de periode 1989 – 2012/2015. Voor de buitendelta van het zeegat van Ameland is er voor gekozen de 1926 bodem niet te gebruiken in de trendlijnanalyse. Deze bodem lijkt met name in de kustzone onrealistisch te zijn. Het niet meenemen van deze bodem verklaart het verschil in gevonden bodemverandering tussen de huidige studie (-0.30 miljoen m³/jaar) ten opzichte van de eerder gerapporteerde waarde van +1.36 miljoen m³/jaar (Elias et al., 2012; Wang et al., 2018).

Op basis van deze getallen kan worden geconcludeerd, dat de kustzone zowel op lange termijn en op korte termijn (huidige trend) sediment verliest terwijl er in het totale bekken sedimentatie optreedt. De sedimentatie van het bekken op de lange termijn is een factor 2 tot 3 hoger dan de huidige trend. Op basis van de gecorrigeerde volumina kan worden geconcludeerd dat er in het huidige bekken een aanzanding van 4.3 miljoen m³/jaar optreedt. Het volumeverlies van de kustzone is ruimschoots voldoende om dit sediment te leveren. Ongecorrigeerd voor ingrepen neemt de erosie van de kustzone af van -9.6 miljoen m³/jaar (lange termijn) tot -7.5 miljoen m³/jaar (huidig). Dit beeld verandert echter als we corrigeren voor ingrepen. Met name de grote suppletievolumes in de kustzone van het Zeegat van Texel en op Ameland zorgen ervoor dat de gecorrigeerde trend sterk toeneemt (van -7.5 miljoen m³/jaar naar -10.6 miljoen m³/jaar).

In de gepresenteerde volumebalans is niet specifiek gekeken naar het aandeel zand versus slib. Schattingen van het slibpercentage in de bodem van de Waddenzee liggen tussen 8% en 37% (Oost et al., 2018). Als we uitgaan van het minimum percentage, dan reduceert de zandvolume toename in het bekken tot 4.0 miljoen m³/jaar.



Figuur 3.2 Overzicht van de berekende volumeveranderingen per zeegatsysteem onderverdeeld in kust en bekken voor (a) lange termijn, ongecorrigeerd voor ingrepen, (b) lange termijn, gecorrigeerd voor ingrepen, (c) huidige trend, ongecorrigeerd voor ingrepen en (d) huidige trend, gecorrigeerd voor ingrepen.

Tabel 3.1 Volumetrends (in miljoen m³/jaar) zoals gebruikt voor het sedimentbalansmodel Waddenzee - Kust representatief voor de huidige trends voor het Marsdiep (MD), Eierlandse Gat (ELD), Zeegat van het Vlie (Vlie), Zeegat van Ameland (AME), Pinkegat (PGAT) and Zoutkamperlaag (ZKL). Pinkegat (PGAT) and Zoutkamperlaag (ZKL) vormen samen het Friesche Zeegat.

Parameter	MD	ELD	VLIE	AME	PGAT	ZKL
dV_K	-1.93	-0.32	-3.85	-0.14	-0.30	-0.97
$V_{DD}^{(1)}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00
V_{SUPPL}	2.65	0.24	0.29	2.01	0.00	0.00
V_{SUB}	0.23	0.14	0.22	0.20	0.20	0.38
V_{DUIN}	0.30	0.15	0.19	0.11	0.00	0.005
Totaal⁽²⁾	-4.05	-0.27	-3.73	-1.84	-0.14	-0.59
$V_{LT,IN}$	0.50	1.00	1.00	2.00	1.50	-
$V_{LT,OUT}$	1.00	1.00	2.00	1.50	-	1.00
V_{DT}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

⁽¹⁾ $V_{DD} = V_{STORTEN} + V_{ZANDWINNING} + V_{SCHELPEWINNING}$

⁽²⁾ $Totaal = dV_K - V_{DD} - V_{SUPPL} + V_{SUB} - V_{DUIN}$

Tabel 3.2 Volumetrends (in miljoen m³/jaar) zoals gebruikt voor het sedimentbalansmodel Waddenzee - Bekken representatief voor de huidige trends voor het Marsdiep (MD), Eierlandse Gat (ELD), Zeegat van het Vlie (Vlie), Zeegat van Ameland (AME), Pinkegat (Pgat) and Zoutkamperlaag (ZKL).

Parameter	MD	ELD	VLIE	AME	PGAT	ZKL
dV_B	0.84	-0.41	0.97	1.43	-0.28	0.21
V_{DD}	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
V_{SUB}	0.39	0.09	0.46	0.20	0.13	0.18
$V_{KWELDER}$	0.00	0.00	0.00	0.04	0.05	0.06
Totaal⁽¹⁾	1.23	-0.32	1.43	1.63	-0.10	0.45
$V_{WT,IN}$	0	max 0.25	max 1.5	max 0.5	max 0.5	max 0.5
$V_{WT,OUT}$	max 1.5	max 0.25	max 0.5	max 0.5	max 0.5	max 0.5

⁽¹⁾ $Totaal = dV_B - V_{DD} + V_{SUB} + V_{KWELDER}$

3.2 De volumebalans

Het sedimentbalansmodel geeft ons in principe een samenvatting van alle winst- en verliesposten zoals samengevat in Figuur 3.3a. Deze balans kunnen we uitwerken op verschillende schalen; het balansmodel is toepasbaar voor de individuele zeegaten, maar ook voor de Waddenzee of kustzone als geheel. Afhankelijk van het schaalniveau worden dan meer of minder transportpaden zichtbaar. Bijvoorbeeld: onder de aanname dat er maar 1 transportpad (pijl) is, via het zeegat, naar een kombergingsgebied is het transport gelijk aan de in het kombergingsgebied bepaalde sedimentatie. Als er echter meerdere transportpaden zijn (nog 2 over de wantijen) dan ontstaat er, indien er geen additionele informatie beschikbaar is, een onder-gedefinieerd systeem (er zijn meer onbekenden dan vergelijkingen), wat leidt tot een grote suite aan mogelijke oplossingen. Een deel van deze onbekenden kunnen we oplossen door modelleringen, metingen en expert judgement.

Grootschalig kunnen we de sedimentbehoefte afschatten door (1) de volumebalans van de kustzone op te lossen (Figuur 3.3b) of (2) de volumebalans van het bekken op te lossen (Figuur 3.3c). In de kustzone bestaat de volumebalans uit de optelsom van geobserveerde verandering van -10.62 miljoen m³/jaar (erosie), de transporten door de zeegaten, het netto langtransport en eventuele dwarstransporten. Uit de analyse van Elias (2019) volgt dat de afschatting van deze transporten geen triviale zaak is. Met een aanzanding van +4.32 miljoen m³/jaar in het bekken en een verlies van 0.20 miljoen m³/jaar over het wantij, zou dit betekenen dat er in totaal verlies van -6,1 miljoen m³/jaar moet optreden. Deze waarde is significant hoger dan wat we op basis van de huidige kennis kunnen verklaren. Mogelijke oorzaken van deze discrepantie zijn het onderschatten van de

verliezen naar de eilanden, het niet correct corrigeren voor het effect van suppleties en mogelijke onnauwkeurigheden in de bodemdata en daardoor ook de trendlijn bepaling.

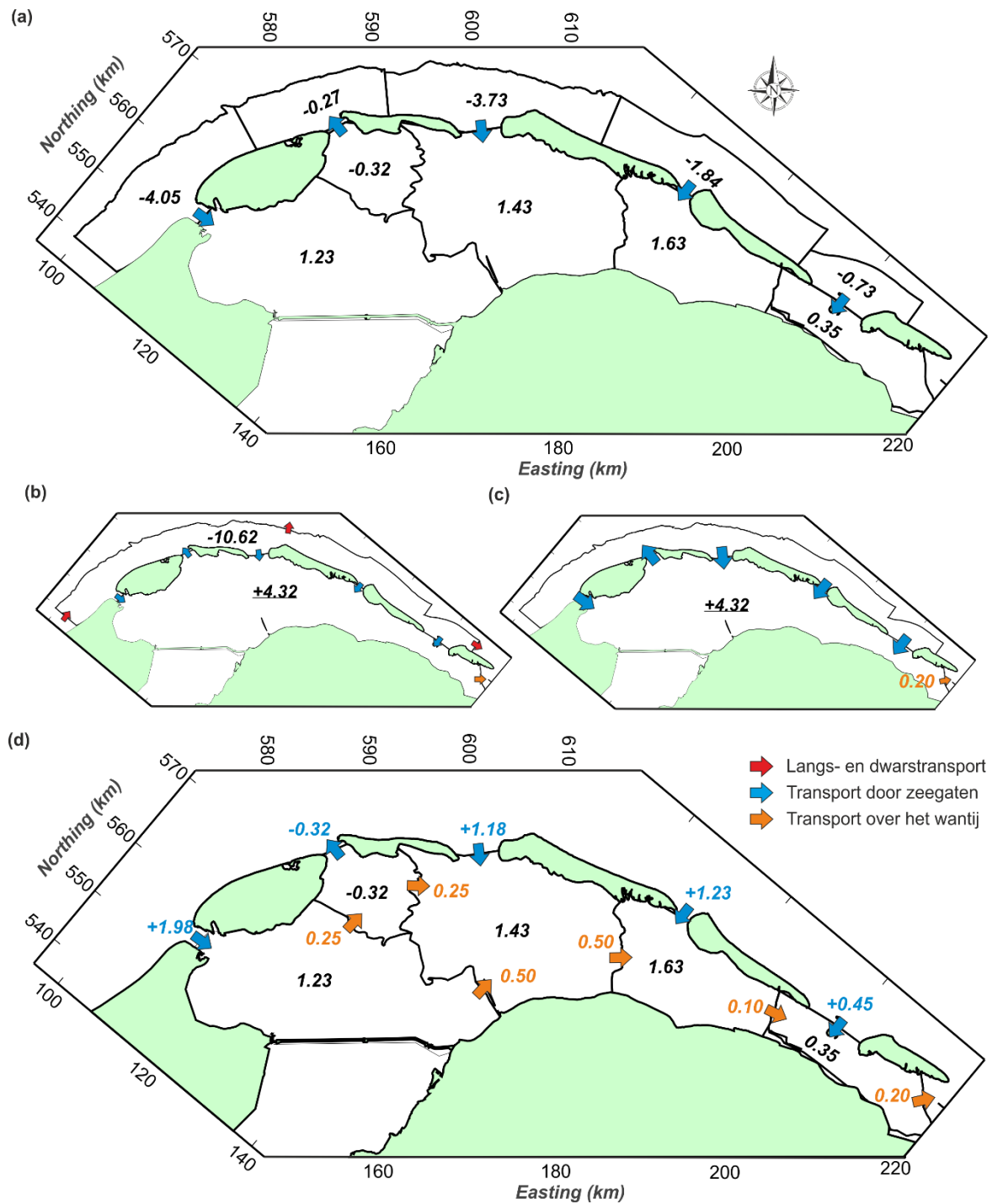
Voor het Technische Advies speelt de niet sluitende kustbalans eigenlijk geen rol. Een betrouwbare schatting voor het zandverlies naar de Waddenzee kan redenerend vanuit het bekken worden gevonden. De volumes zoals berekend vanuit de bodems vertonen hier betrouwbare en coherente trends. Daarnaast is er slecht 1 ongedefinieerde variabele in de vorm van de oostwaartse verliezen over het Groninger Wad. De volumebalans opgesteld voor het bekken van het Waddenzee (Figuur 3.3b) vormt dan ook de basis voor het Technisch Advies (Elias, 2019).

Op basis van de opgetreden bodemveranderingen in de Waddenzee worden de oostwaartse transporten over het Groninger Wad geschat op 0.20 miljoen m³/jaar (Elias, 2019). Uitwerking van de volumebalans geeft dan een totale netto sediment import door alle zeegaten van +4.5 miljoen m³/jaar. Door aannamen te maken van de uitwisseling over de individuele wantijen kunnen we een schatting maken van de bijdrage per zeegat, zie Figuur 3.3d. De aannamen van de transporten over de wantijen zijn gebaseerd op de lokale volumeveranderingen nabij het wantij en expert judgement. Uit deze berekening volgt dat de grootste sedimentimport optreedt door het Zeegat van Texel (+1.98 miljoen m³/jaar). Het Eierlandse Gat is een exporterend systeem (-0.32 miljoen m³/jaar). Transporten door het Zeegat van het Vlie worden geschat op +1.18 miljoen m³/jaar, door het Zeegat van Ameland +1.23 miljoen m³/jaar en door het Friesche Zeegat +0.45 miljoen m³/jaar. In totaal levert dit een sedimenttransport van 4.5 miljoen m³/jaar op.

In de gepresenteerde volumebalans is niet specifiek gekeken naar het aandeel zand versus slib. Schattingen van het slibpercentage in de Waddenzee bodemvolumina liggen tussen de 8 en 37% (Oost et al., 2018). Deze bandbreedte laat wel zien dat er nog een grote onzekerheid bestaat in deze getallen, waarvoor aanvullend onderzoek nodig is. Als we uitgaan van het minimum percentage, dan reduceert de zandimport door de zeegaten tot +4.17 miljoen m³/jaar.

Tabel 3.3 Een overzicht van de zandtransporten door de zeegaten op basis van volumebalansen; onder de aanname van een slibpercentage in het bekken van 0% en 8% van de volumes. Positief = zandimport naar Waddenzee en Negatief= zandexport uit Waddenzee.

Zeegat	Zandtransport [miljoen m³/jaar] 0% slib	Zandtransport [miljoen m³/jaar] 8% slib
Texel	+1.98	+1.88
Eierlandse Gat	-0.32	-0.29
Vlie	+1.18	+1.07
Ameland	+1.23	+1.10
Friesche Zeegat	+0.45	+0.42
Totaal	+4.52	+4.17



Figuur 3.3 Een overzicht van het sedimentbalansmodel representatief voor de huidige trends; (a) berekende volumeveranderingen gecorrigeerd voor ingrepen, (b + c) sedimentbalansmodel op Waddenzee schaal, (d) uitwerking sedimentbalansmodel Waddenzee op schaal van de zeegaten.

3.3 Een schatting van de nauwkeurigheid

Een schatting maken van de nauwkeurigheid van de berekende transporten door de zeegaten is geen triviale zaak. De transporten worden berekend uit de winst en verliesrekening zoals gepresenteerd in Hoofdstuk 3.1 en bestaat uit verschillende termen. Ieder van deze termen heeft een eigen (on)nauwkeurigheid en onzekerheid.

Kijken we naar de verschillende termen dan kunnen we deze onderverdelen in verschillende categorieën.

(1) Termen direct af te leiden uit metingen

- dV_K en dV_B = gemeten volumeverandering van de kustzone respectievelijk het bekken.
- V_{SUB} = subsidence of bodemdaling in het betreffende deel van het kustvak.
- $V_{STORTEN}$ = volumetoename door storten van sediment.
- $V_{SUPPLETIES}$ = volumetoename door uitgevoerde supplementies.
- $V_{BAGGEREN}$ = volumeverlies door baggeren van sediment.
- $V_{ZANDWINNING}$ = volumeverlies door zandwinning.
- $V_{SCHELPEWINNING}$ = volumeverlies door schelpenwinning.

(2) Termen niet direct af te leiden uit metingen, maar gebaseerd op de literatuur.

- $V_{LT,IN/UIT}$ = netto langtransport balansgebied in of uit.
- $V_{DT,IN/UIT}$ = netto dwarstransport balansgebied in of uit.
- $V_{DUIN}, V_{KWELDER}$ = volumeverlies naar de duinen of kwelder.
- $V_{WT,IN/UIT}$ = netto transport (in of uit) over de wantijen.

Een aantal van deze termen speelt geen rol in de uitwerking voor dit Technisch Advies. De term $V_{SUPPLETIES}$ en V_{DUIN} spelen wel een belangrijke rol in de kustzone, maar heeft in het bekken geen belang. Vanwege de onduidelijkheid en onzekerheid in deze termen is er voor gekozen de kustbalans niet mee te nemen in het oplossen van de sedimentvraag van de Waddenzee (zie vorige hoofdstuk). Door alleen te kijken naar het bekken reduceren de termen in de zandbalans tot 4 componenten.

1. *Menselijke ingrepen.* Dit zijn de termen $V_{STORTEN}$, $V_{BAGGEREN}$, $V_{ZANDWINNING}$ en $V_{SCHELPEWINNING}$. Deze zijn nihil in de bepaling van de huidige trends. Deze termen spelen dan ook geen rol in de bepaling van de bandbreedte rond de voorspelling.

2. *Volumeverliezen naar de kwelder ($V_{KWELDER}$).* De volumeverliezen naar de kwelders ($V_{KWELDER}$) geven wel een mate van onzekerheid. De studie van Cleveringa (2018) geeft aan dat de totale sedimentatie in de kwelders en gebieden, die buiten de normale kuberingsgebieden liggen, 0.6 – 1.6 miljoen m^3 /jaar bedraagt. Hiervan is het merendeel slib. De slibsedimentatie is geschat op 0.39-1.17 miljoen m^3 /jaar. Dit betekent dat de zandverliezen 0.2 – 0.4 miljoen m^3 /jaar bedragen. De in onze huidige studie gehanteerde waarde (0.15 miljoen m^3 /jaar) kan dan ook worden beschouwd als de ondergrens.

Tabel 3.4 Een overzicht van de bodemdalingsgegevens voor de huidige trend (1987-2017) en onzekerheidsmarge (gebaseerd op Hijma 2018b, blz. 48, Tabel 3.7)

Zeegat	Periode : 1987-2017 ^(b)		
	miljoen m^3 /jaar	min	max ³
Texel	0.39	0.21	0.57
Eierlandse Gat	0.09	0.05	0.13
het Vlie	0.46	0.28	0.64
Ameland	0.21	0.12	0.29
Friesche Zeegat	0.31	0.23	0.38
Totaal	1.46	0.89	2.01

3. *Bodemdaling (V_{SUB})*. De bodemdalingscomponent vormt een belangrijke bijdrage in de volumebalans. Een afschatting van de nauwkeurigheid van de bodemdaling is gebaseerd op de onzekerheidsmarges gegeven in Hijma (2018b). Voor de bekkens zijn deze waarden samengevat in onderstaande tabel 3.4. De tabel laat zien dat er een grote bandbreedte in de voorspelling ontstaat.

4. *Berekende volumeveranderingen (dV_B)*.

De volumeveranderingen worden rechtstreeks berekend uit de bodemkaarten. De (on)nauwkeurigheid van de bodemmetingen is altijd een bron van discussie en onzekerheid. Door veranderingen in meettechnieken en instrumenten, veranderingen in positie bepaling en uitgevoerde waterstandscorrecties is het zeer lastig de exacte nauwkeurigheid van de bodemdata te bepalen. Theoretische beschouwingen van de foutenbronnen tijdens de inwinning van de gegevens geven foutenmarges van 0.10-0.40 m (Wiegmann et al. 2005; Perluka et al. 2006). Daarbij kan onderscheid gemaakt worden tussen systematische fouten (in de gehele dataset door bijvoorbeeld het type instrument), stochastische fouten (individuele uitschieters in datapunten) en (3) variabele systematische fouten (door fouten in verwerking). Marijs and Parée (2004) geven een gedetailleerd beeld van de mogelijke meetfouten voor data opgenomen in de Westerschelde. Deze auteurs concluderen dat met name de stochastische fout in de loop van de jaren sterk is afgenomen van 0.48 m in de periode 1969-1983, tot 0.36 m over de huidige metingen (sinds 1995).

Een methode voor het meenemen van deze fouten is een theoretische foutenmarge toe te voegen op de berekende volumes. Als we bijvoorbeeld uitgaan van een fout van 10 cm, kun je berekenen wat het volume geweest zou zijn als het gehele oppervlakte 10cm te hoog of te laag zou liggen. Door de grote oppervlaktes, ongeveer 2100 km² zijn deze volumes al gauw groter dan de berekende volumeverschillen. Het aannemen van een constante fout over het gehele gebied en tijdserie is echter niet terecht. De bodemopname van de gehele Waddenzee is opgebouwd uit deelgebieden die over een periode van 6 jaar onafhankelijk van elkaar gelood zijn. Het is dus onwaarschijnlijk dat een gelijke systematische fout over al deze lodingsvakken tegelijk optreedt. Hier werkt de systematische fout eerder door als een stochastische fout, die gedeeltelijk dan ook uitmiddelt. Het effect van fouten in de individuele datasets word verder gereduceerd door de gevolgde methode. De berekende trends worden bepaald vanuit een trendlijnanalyse. Een systematische fout in de gehele tijdserie van opnamen heeft op de trendlijn geen effect. Verder is de trendlijnanalyse is uitgevoerd over een recente periode (ongeveer 1991-1997 tot huidig) waarin de oudste metingen met grootste onzekerheid niet zijn meegenomen. Daarnaast is de analyse uitgevoerd op deelgebieden met coherente trend (Westelijke Waddenzee) of voldoende grote deelgebieden, waardoor individuele meetfouten kunnen worden geïdentificeerd en uitgesloten worden van de analyse (zie Elias 2019, H4 voor een nadere uitleg van de gebruikte methode). Door het toepassen van deze analysetechnieken wordt de theoretische fout verkleind, maar een exacte waarde hiervoor is niet direct te geven, maar door het analyseren van de onzekerheid in de trendlijnen kunnen we, op basis van expert-judgement, wel een schatting maken van de nauwkeurigheid.

Marsdiep. Eierlandse Gat en het Vlie. De studie van Elias (2018) geeft aanvullende analyses en bepalingen van de trendlijnen in de Westelijke Waddenzee. Op basis van de volledige bekken polygonen worden hier de huidige trends geschat op 0.20, -0.40 en 1.0 miljoen m³/jaar voor respectievelijk Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie (H4, Figuur 4.8). De waarde van 0.20 miljoen m³/jaar voor het Marsdiep is beduidend lager dan de gehanteerde waarde van 0.84 miljoen m³/jaar. Deze laatste waarde is over een vaste periode berekend. De studie van Elias (2018) concludeert dat er in een aantal gebieden een sterke afname van de sedimentatie is opgetreden. Deze observatie wordt ook bevestigd in Elias en van der Spek (2018) voor de kustzone. Het is dus aannemelijk dat de waarde van 0.84 miljoen m³/jaar als een maximum waarde kan worden beschouwd.

Ameland. Als schatting voor de betrouwbaarheid van de geobserveerde trend gebruiken we de verschillende schattingen van de trendlijnanalyses zoals gepresenteerd in Elias (2019). Een trendlijnbepaling gebaseerd op het volumeverloop in het gehele bekken geeft als schatting voor de huidige trend 1.22 – 1.25 miljoen m³/jaar sedimentatie. Deze trendlijn vertoont een consistent verloop met slechts geringe, zichtbare, uitschieters in de data. Trendlijnen gebaseerd op gedetailleerde analyse van kleinere morfologische eenheden en over verschillende tijdsperioden geeft schattingen van 1.25 - 1.43 miljoen m³/jaar (Elias 2019; Appendix B, Tabel B.9). Deze waarde, met een aanvullende foutenmarge van 10%, gebruiken we dan ook als schatting van de bandbreedte in de voorspelling.

Friesche Zeegat. Een schatting voor het Friesche Zeegat is gebaseerd op de uitwerking van de individuele trendlijnanalyse zoals gepresenteerd in Elias (2019, Appendix B, Tabel B.13). Op basis van de ongecorrigeerde trendlijnen wordt een schatting verkregen van +0.11 en +0.25 miljoen m³ aanzanding. In de studie van Elias (2018) wordt een significant hogere sedimentatiewaarde gerapporteerd van +0.89 miljoen m³/jaar. Deze waarde is echter bepaald over de periode 1971-2012. Gebruiken we de onderliggende data dan vinden we een afnemende sedimentatiewaarde van +0.18 miljoen m³/jaar over de periode 1989-2012 en een waarde van +0.11 miljoen m³/jaar over de periode 1994-2012. Dit geeft een spreiding in volumeschatting tussen de -0.07 en +0.25 miljoen m³/jaar. In onze afschatting van de bandbreedte gebruiken we hier een aanvullende foutenmarge van 20%.

Tabel 3.5 Een overzicht van de trendlijnwaarden en geschatte nauwkeurigheid.

Zeegat	Periode : 1989/91 – 2012/17 ^(b)		
	miljoen m ³ /jaar	min	max ³
<i>Texel</i>	0.84	0.20	0.84
<i>Eierlandse Gat</i>	-0.41	-0.41	-0.26
<i>het Vlie</i>	0.97	1.00	1.00
<i>Ameland</i>	1.43	1.13	1.57
<i>Friesche Zeegat</i>	-0.07	-0.08	0.30
Totaal	2.76	1.84	3.45

5. Netto transport over de wantijen ($V_{WT_IN/UIT}$)

Dit netto transport kan niet direct worden berekend. Beredenerend vanuit de lokale bodemveranderingen nabij de wantijen van het Friesche Zeegat is dit op basis van expert-judgement geschat op 0.20 miljoen m³/jaar (oostwaarts). Een absoluut minimum is wel met zekerheid aan te geven. Het is onwaarschijnlijk dat deze transporten negatief zijn. Het netto wind- en golfklimaat is oostwaarts gericht dit geeft per definitie een netto oostwaarts transport door de Waddenzee. Als theoretische ondergrens hanteren we hier dan ook 0 miljoen m³/jaar uitwisseling. De bovengrens is lastiger te bepalen. Uitwerking van de gedetailleerde zandbalansen van de Oostelijke Waddenzee (zie Elias 2019; H6) laat zien dat de gehele, huidige netto bodemverandering in het bekken 0.36 miljoen m³/jaar is. Daarnaast geeft uitwerking van de volumebalansen slechts kleine oostwaartse transporten. Transporten over de voorliggende wantijen worden hier geschat op 0.10-0.20 miljoen m³/jaar. In ons gevoeligheidsonderzoek kijken we daarom naar een variatie van de gekozen waarde (0.20 miljoen m³/jaar) en een bandbreedte van 0 – 0.40 miljoen m³/jaar.

Door middel van het zandbalansmodel kan een schatting gemaakt worden van de invloed van deze getallen op het eindantwoord. Daarom is het zandbalansmodel gerund voor alle mogelijke combinaties van de waarden zoals gegeven in Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Samenvatting van de parameterwaarden en geschatte nauwkeurigheid.

Parametert	Periode : 1989/91 – 2012/17 ^(b)		
	miljoen m ³ /jaar	min	max ³
dV_B	2.76	1.84	3.45
V_{DD}	0.04	0	0.10
$V_{KWELDER}$	0.15	0.15	0.40
V_{SUB}	0.89	1.46	2.01
$V_{WT\ UIT}$	0.20	0	0.4

Op basis van deze getallen kunnen we 81 trekkingen maken van het zandbalansmodel. Het meest ongunstige scenario geeft hier een totale zandbehoefte van 6.3 miljoen m³/jaar en het meest gunstige scenario geeft 2.9 miljoen m³/jaar. Het is echter onwaarschijnlijk dat voor alle parameters gelijktijdig het meest ongunstige of het meest gunstige scenario optreedt. Als we kijken naar het gemiddelde van alle trekkingen geeft dit een waarde van $V_{B,Waddenzee} = 4.57$ miljoen m³/jaar met een standaarddeviatie van 0.83 miljoen m³/jaar (18%). Deze standaarddeviatie wordt gehanteerd als schatting van de foutenmarge (zie tabel 3.7).

Tabel 3.7 Een overzicht van de zandtransporten door de zeegaten op basis van volumebalansen inclusief standaarddeviatie van 18%; onder de aanname van een slibpercentage in het bekken van 0% en 8% van de volumes.

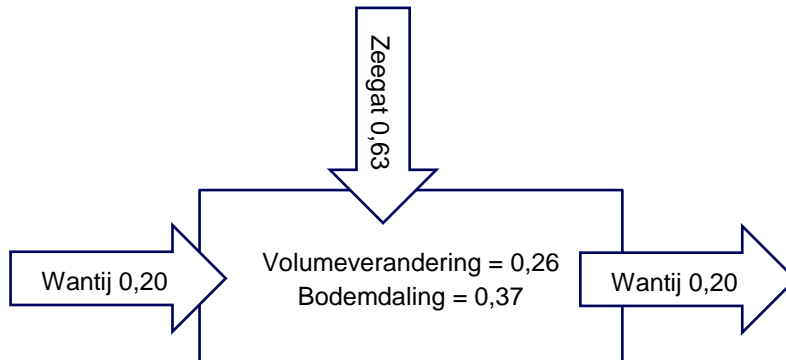
Zeegat	Zand transport [miljoen m ³ /jaar] 0% slib		Zand transport [miljoen m ³ /jaar] 8% slib	
Texel	+1.98	±0.35	+1.88	±0.34
Eierlandse Gat	-0.32	±0.06	-0.29	±0.05
Vlie	+1.18	±0.21	+1.07	±0.19
Ameland	+1.23	±0.22	+1.10	±0.20
Friesche Zeegat	+0.45	±0.08	+0.42	±0.08
Totaal	+4.52	±0.81	+4.17	±0.75

3.4 Een schatting van de volumeverliezen van het Groninger Wad en het Eems-Dollard Estuarium

Groninger Wad

Een schatting van de volumeveranderingen in het Groninger Wad is gebaseerd op bestaande literatuur. De studie van Cleveringa et al. (2008) geeft als schatting voor de accumulatie van sediment in het Groninger Wad een waarde van 0,09 miljoen m³/jaar. De recente studie van Vermaas en Marques (2017) bevestigt de kleine volumeveranderingen die optreden in het Groninger Wad. Op basis van de data over de periode 1990-2014 wordt door Vermaas en Marques (2017) een volumetoename van 6,1 miljoen m³ gevonden overeenkomend met 0,26 miljoen m³/jaar. Deze kleine geobserveerde sedimentatie komt gedeeltelijk door de bodemdaling ten gevolge van gaswinning. De bodemdaling in het gasveld van Slochteren is niet zichtbaar in de Waddenzee, wat tot de conclusie leidt dat deze vrijwel instantaan gevuld wordt met sediment. De totale bodemdaling voor het Groninger Wad en Eems-Dollard wordt over de periode 1987-2017 geschat op 0,74 miljoen m³/jaar (Hijma en Kooi, 2018). Met een aanname dat 50% in het Groninger Wad plaatsvindt, geeft dit een extra volumeverlies van 0,37 miljoen m³/jaar. Met aanname van de recentere schatting van Vermaas en Marques (2017) boven de schatting van Cleveringa et al. (2008) heeft in totaal (0,26 + 0,37 =) 0,63 miljoen m³/jaar aan sedimentatie plaatsgevonden.

Voor de uitwisseling over het wantij tussen het Friesche Zeegat en het Groninger Wad wordt 0,20 miljoen m³/jaar aangenomen (zie Figuur 3.3). Over de uitwisseling tussen Groninger Wad en Eems-Dollard estuarium is weinig bekend. Voor de huidige balans wordt aangenomen dat deze uitwisseling gelijk is aan de uitwisseling over het wantij tussen het Friesche Zeegat en het Groninger Wad, ofwel ook 0,20 miljoen m³/jaar. Na invulling geeft dit een geschatte sedimentimport door de zeegaten van het Groninger Wad van $(0,63 + 0,20 - 0,20 =) 0,63$ miljoen m³/jaar (Figuur 3.4). Gecorrigeerd voor 8% slib is het geschatte zandtransport 0,58 miljoen m³/jaar.



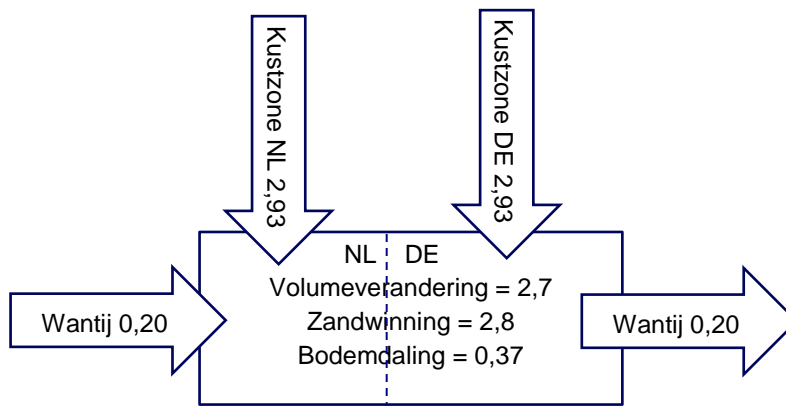
Figuur 3.4 Schematisch boxmodel van het sedimenttransport (in miljoen m³/jaar) van het Groninger Wad.

Eems-Dollard

Voor het Eems-Dollard estuarium wordt gebruik gemaakt van beschikbare literatuurbronnen. Vermaas en Marques (2017) en Cleveringa (2008) concluderen beide dat het Eems estuarium in sedimentvolume is toegenomen. Vermaas en Marques (2017) hebben zes bodemliggingen van 1990 tot 2013 geanalyseerd. Over de gehele periode 1990-2013 vindt een netto sedimentatie van 65 miljoen m³ plaats, ofwel 2,7 miljoen m³/jaar. Omdat in dezelfde periode circa 68 miljoen m³ door zandwinning is onttrokken, moet deze hoeveelheid bij de netto sedimentatie opgeteld worden. Tenslotte wordt conform de aanname voor het Groninger Wad 0,37 miljoen m³/jaar aanvullend sedimenttransport door bodemdaling naar het Eems-Dollard estuarium aangenomen (Hijma en Kooi, 2008). In totaal zou dit een sedimenttransport naar het estuarium van 5,87 miljoen m³/jaar opleveren. Verreweg het grootste deel sedimenteert in de geulen; de volumeverandering van de platen is klein. Er is geen onderscheid gemaakt tussen zand en slib.

Van Maren et al. (2019) heeft hydromorfologische analyses en modelberekeningen in het kader van KRW Eems-Dollard 2050 uitgevoerd. Het totale sedimenttransport van kustfundament naar de Eems-Dollard wordt berekend op 3,0 miljoen m³/jaar, waarvan 0,7 miljoen m³/jaar zand en 2,3 miljoen m³/jaar slib. Van Maren (pers. comm.) geeft aan dat het percentage zand waarschijnlijk onderschat wordt in het model.

Alle literatuurbronnen wijzen derhalve op sedimenttransport van het kustfundament naar de Eems-Dollard. Welk deel van het transport uit het Nederlandse deel van de kustzone, dat onderdeel uitmaakt van het kustfundament, en welk deel uit het Duitse deel van de kustzone afkomstig is, is niet bekend. Uitgaande van de op bodemmetingen, zandwinningsgegevens en bodemdaling gebaseerde waarde van 5,87 miljoen m³/jaar voor sediment en een geschatte verhouding zand:slib van 40%:60% wordt een zandtransport van 2,4 miljoen m³/jaar afgeleid. De aanname is dat er geen netto aanvoer of afvoer over de wantijen is. Aannemend dat 50% daarvan vanuit de Nederlandse kustzone wordt aangevoerd, wordt het zandtransport vanuit het kustfundament naar de Eems-Dollard geschat op 1,2 miljoen m³/jaar. Deze waarde is met grote onzekerheid omgeven.



Figuur 3.5 Schematisch boxmodel van het sedimenttransport (in miljoen m³/jaar) van het Eems-Dollard estuarium. Slibpercentage wordt aangenomen op 60%. Het zandtransport vanuit de Nederlandse kustzone wordt geschat op (40% x 2,93) = 1,2 miljoen m³/jaar.

Tabel 3.8 Overzicht van de zandtransporten door de zeegaten op basis van volumebalansen en aangevuld met Groninger Wad en Eems-Dollard op basis van expert judgement; onder de aanname van een slibpercentage in het bekken van 0% en 8% van de volumes. De standaarddeviatie is 18%. Let op de afwijkende aanname voor de Eems-Dollard.

Zeegat	Zand transport [miljoen m ³ /jaar] 0% slib		Zand transport [miljoen m ³ /jaar] 8% slib	
Texel	+1,98	±0,35	+1,88	±0,34
Eierlandse Gat	-0,32	±0,06	-0,29	±0,05
Vlie	+1,18	±0,21	+1,07	±0,19
Ameland	+1,23	±0,22	+1,10	±0,20
Friesche Zeegat	+0,45	±0,08	+0,42	±0,08
Groninger Wad	+0,63	±0,11	+0,58	±0,10
Totaal	+5,15	±0,93	+4,74	±0,85
Eems-Dollard	-*	-	1,2*	-

* Afwijkende benadering en hoger slibpercentage van 60% (zie tekst)

4 Toekomstige sedimenttransport naar de Waddenzee

Een voorspelling van de toekomstige sedimentbehoefte van de Waddenzee wordt verkregen door toepassing van het ASMITA (Aggregated Scale Morphological Interaction between Tidal basin and Adjacent coast) model (Wang en Lodder, 2019). ASMITA is een geaggregeerd morfodynamisch model voor zeegatsystemen. Het gebruikt de advectie-diffusie vergelijking voor zwevend sedimenttransport, net zoals de (complex) proces-gebaseerde modellen zoals Delft3D, maar dan geaggregeerd in ruimte en tijd. Het verschil met de proces-gebaseerde modellen zit in de formulering voor de sedimentuitwisseling tussen waterkolom en bodem. In plaats van gedetailleerde informatie over hydrodynamica zijn alleen geaggregeerde parameters zoals getijslag en getijprisma beschikbaar. Deze geaggregeerde parameters worden gebruikt om het morfologische evenwicht te bepalen aan de hand van empirische relaties. De sedimentuitwisseling tussen waterkolom en bodem hangt af van het verschil tussen de morfologische toestand en het evenwicht ervan. In proces-gebaseerde modellen wordt voor de uitwisseling een sedimenttransportformule gebruikt, die ook in hoge mate empirisch is. Het essentieel verschil tussen ASMITA en Delft3D is het niveau van aggregatie (in tijd en ruimte) en niet het al dan niet bevatten van empirische elementen. In de modellen die in de huidige studie zijn gebruikt is een zeegatsysteem geschematiseerd in drie morfologische elementen: de buitendelta, de geulen binnen het bekken en de platen in het bekken. De modellen zijn rond de eeuwwisseling opgezet en sindsdien gebruikt in verschillende studies. Meer achtergrond informatie over het modelconcept, de modelformuleringen en de modeltoepassingen voor de zeegaten in de Nederlandse Waddenzee is gegeven door Wang en Lodder (2019).

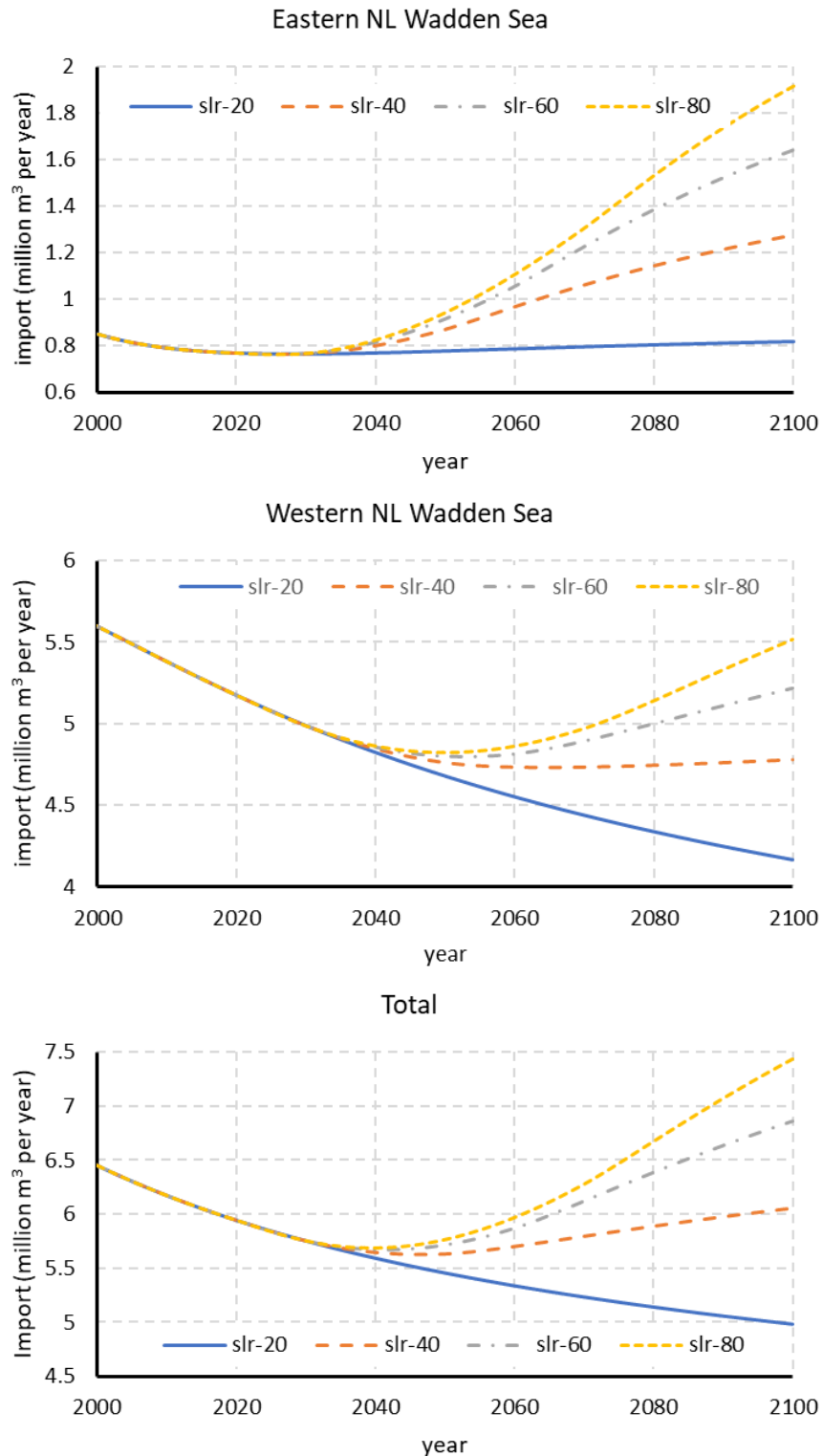
Ten behoeve van deze studie zijn deze modellen geoptimaliseerd volgens de laatste inzichten. Voor ieder van de zeegaten (Marsdiep, Eierlandse Gat, Zeegat van het Vlie, Amelander Zeegat, en de zeegaten Zoutkamplaag en Pinkegat) zijn afzonderlijke ASMITA modelschematisaties gemaakt en afgeregeld. Ten behoeve van de Kustgenese 2.0 studie zijn deze modellen geoptimaliseerd volgens de laatste inzichten uit de sedimentbalansanalyse door Elias (2019). Simulaties met de verbeterde modellen zijn uitgevoerd over de periode 1970-2100 onder vier zeespiegelstijgingsscenario's (ZSS). Deze scenario's representeren een ZSS snelheid in 2100 gelijk aan 2, 4, 6, en 8 mm/j. Het 2 mm/j scenario betreft voortzetting van de huidige ZSS en voor de drie andere scenario's gaat de versnelling vanaf 2020 beginnen. De versnelling is lineair en bereikt de eindsnelheid in respectievelijk 2050, 2060 en 2070. Een uitgebreide beschrijving van de modelresultaten m.b.t. de sedimentuitwisselingen tussen de Noordzee en de Waddenzee door de verschillende zeegaten is gegeven in Wang en Lodder (2019, zie ook Lodder et al., 2019). Samengevat leiden de resultaten van de modellen (zie Figuur 4.1) tot de volgende conclusies:

- Er is een vertraging in de respons van de zeegatsystemen op de verandering van ZSS. De vertraging is groter voor de zeegaten met grotere bekkens, en die met een sedimenttekort in de bekkens door ingrepen in het verleden. De verschillen in ZSS tussen de scenario's beginnen in 2020, maar de verschillen in sedimenttransport door de zeegaten worden pas merkbaar in 2030 voor het Pinkegat en Eierlandse Gat, en pas aan het eind van de eeuw voor Marsdiep.
- De verschillen in de sedimentimport naar de Waddenzee tussen de verschillende scenario's zijn relatief klein. De ZSS snelheid in 2100 verschilt een factor 4 tussen de scenario's, maar de berekende totale sedimentimport naar de Waddenzee tussen de hoogste (ongeveer 7.5 miljoen m³ per jaar) en de laagste (ongeveer 5 miljoen m³ per jaar) scenario's is ongeveer 2.5 miljoen m³ per jaar in 2100 (zie Figuur 4.1). Tot 2060 zijn de verschillen niet significant.
- De veranderingen van de sedimentimport in de toekomst t.o.v. de huidige situatie zijn niet erg groot. Voor alle scenario's neemt de totale sedimentimport eerst af in de tijd door het

dempen van de verstoringen door de ingrepen in het verleden. De versnelling van ZSS buigt deze afnemende trend om, maar niet vóór 2050 in alle beschouwde scenario's. Voor de hoogste ZSS scenario (8 mm/j) zal de import (ongeveer 7.5 miljoen m³ per jaar) ongeveer 1.5 miljoen m³ per jaar toenemen in 2100 t.o.v. de huidige situatie (ongeveer 6 miljoen m³ per jaar), zie Figuur 4.1.

Naast deze scenario's is ook een theoretische analyse uitgevoerd met een verder geaggregeerd model. Dit geaggregeerd model beschouwt het hele bekken als één element, waarin de gemiddelde diepte van het bekken onder hoogwater gebruikt wordt als morfologische toestandsvariabele. Zonder ZSS kan er vanuit bestaande empirische relaties een theoretische evenwichtsdiepte worden berekend. Deze analyse verschaft ons essentieel inzicht in het gedrag van de bekkens onder ZSS, waardoor we de resultaten van de volledige ASMITA berekeningen beter kunnen begrijpen en interpreteren. De belangrijkste aanvullende bevindingen van deze analyse zijn (zie ook Lodder et al., 2019):

- ZSS veroorzaakt een verstoring van het evenwicht waardoor de waterdiepte groter wordt.
- Bij constante snelheid van ZSS ontwikkelt de diepte op den duur naar een dynamische evenwichtswaarde, als de ZSS snelheid onder een kritische limiet blijft. De dynamische evenwichtsdiepte neemt niet-lineair toe met de toenemende ZSS snelheid, en gaat naar oneindig groot (verdrinking) als de kritische ZSS snelheid wordt benaderd. Boven de kritische ZSS snelheid is er dus geen eindige dynamische evenwichtsdiepte te definiëren.
- De kritische ZSS snelheid is berekend per zeegat (Wang et al., 2018; Lodder et al., 2019) en varieert tussen 6.3 mm/jaar voor Vlie tot 32.7 mm/jaar voor Pinkegat. Het is de verhouding tussen de ZSS snelheid en de kritische waarde ervan die het gedrag van een zeegatsysteem bepaalt als de ZSS versnelt. De verschillende zeegatsystemen zullen dus heel anders reageren op versnelling van ZSS die dezelfde is voor alle zeegatsystemen omdat de kritische ZSS snelheid heel verschillend zijn.
- De kritische ZSS snelheid is gelijk aan de evenwichtsdiepte (zonder ZSS) gedeeld door een tijdschaal. Verrassend is dat deze tijdschaal niet gelijk aan de morfologische tijdschaal t.o.v. het morfologische evenwicht is, maar gelijk aan de morfologische tijdschaal maal de macht in de modelformulering voor evenwichtssedimentconcentratie. Dit betekent dat het type sediment invloed heeft op de kritische ZSS snelheid. Voor systemen met dezelfde evenwichtsdiepte en dezelfde morfologische tijdschaal is de kritische ZSS snelheid groter voor de systemen met fijner sediment.
- Het tijdproces voor het bereiken van het dynamische evenwicht hangt sterk af van de snelheid van ZSS. De morfologische tijdschaal t.o.v. het dynamische evenwicht neemt niet-lineair toe met de ZSS snelheid, het wordt oneindig groot als de ZSS snelheid de kritische limiet voor verdrinking nadert. Het niet-lineaire gedrag van het dynamische evenwicht en de bijbehorende morfologische tijdschaal heeft als gevolg dat de respons van een bekken op ZSS van relatieve hoge snelheid dezelfde lijkt ongeacht of de snelheid (niet ver) onder, gelijk of boven de kritische limiet is. De verschillende zeegatsystemen in de Waddenzee kunnen heel anders reageren op ZSS (van dezelfde snelheid) omdat de respons van een systeem wordt bepaald door de verhouding tussen de ZSS snelheid en de kritische snelheid.
- Uit de theoretische analyse blijkt ook dat het bijna onmogelijk is om te identificeren of een systeem aan het verdrinken is ten gevolge van een toename in ZSS. Onder hoge ZSS gedraagt het systeem zich identiek, ongeacht of dat systeem zich onder, gelijk aan of boven de kritische snelheid bevindt.



Figuur 4.1 Berekende sedimentimporten voor de Westelijke Waddenzee, de Oostelijke Waddenzee en de totale Waddenzee voor de 4 ZSS scenario's

Figuur 4.1 geeft de resultaten van de ASMITA modellering weer voor de verschillende kombergingsgebieden. Getoond wordt het sedimenttransport door zes zeegaten alsmede de optellingen voor de westelijke Waddenzee, de oostelijke Waddenzee en tenslotte de Waddenzee als geheel.

De eerste periode 2000-2020 kan vergeleken worden met de sedimenttransporten uit het sedimentbalansmodel van de vorige paragraaf, met de kanttekening dat ASMITA geen transport over het wantij in beschouwing neemt. Een directe vergelijking is derhalve niet mogelijk. Uit een relatieve vergelijking blijkt dat de ASMITA-modellering het sedimenttransport voor het zeegat van Texel ruim overschat (factor twee), voor de Vlie licht overschat (50%) en voor het zeegat van Ameland onderschat (70%). Voor de overige drie zeegaten, waar de sedimenttransporten kleiner zijn, is de overeenkomst redelijk. Omdat het sedimenttransport op basis van de gemeten volumeverandering en afgeleid met het sedimentbalans als betrouwbaarder wordt gezien, wordt deze waarde als uitgangspunt genomen voor de huidige situatie. Uit het ASMITA model wordt daarom alleen het verschil van verandering overgenomen. Deze wordt op basis van de in het model ingebrachte systeemkennis als betrouwbaar gezien.

In Tabel 4.1 worden de geschatte zandtransporten door de zeegaten in 2100 gepresenteerd voor de vier zeespiegelstijgingsscenario's. Deze getalswaarden zijn als volgt bepaald:

- Voor alle zeegaten behalve het zeegat van Texel is in de grafiek het verschil tussen de beginwaarde in 2000 en de eindwaarde in 2100 bepaald. Dit verschil is opgeteld bij of afgetrokken van het zandtransport in de huidige trend (Tabel 3.7).
 - Voorbeeld: Voor het Ameland Zeegat is de beginwaarde in de grafiek 0,45 miljoen m³/jaar en de eindwaarde in 2100 voor het 4 mm/j scenario 0,75 miljoen m³/jaar. Het verschil is dus +0,3 miljoen m³/j. Dit verschil is opgeteld bij de huidige waarde van 1,1 miljoen m³/jaar wat een zandimport van 1,4 miljoen m³/jaar in 2100 door het Ameland Zeegat oplevert.
- Voor het zeegat van Texel is dezelfde werkwijze gehanteerd, met als verschil dat eerst de grafiek met een factor 2 is geschaald als correctie van de factor 2 overschrijding. De beginwaarde in de grafiek is dus niet 3,8 miljoen m³/j maar 1,9 miljoen m³/j.

Tabel 4.1 Overzicht van de zandtransporten door de zeegaten (in miljoen m³/j) in 2100 voor verschillende zeespiegelstijgingsscenario's gebaseerd op de door ASMITA berekende trend en de huidige trend uit de sedimentbalans. Positief = sedimentimport naar de Waddenzee en Negatief = sedimentexport naar de kustzone.

Zeegat	Netto Zandtransport door zeegaten in 2100 – [miljoen m ³ /jaar]				
	Huidig	2 mm/j	4 mm/j	6 mm/j	8 mm/j
Texel	1,9	1,3	1,4	1,5	1,6
Eierlandse Gat	-0,3	-0,4	-0,1	0,1	0,3
VLIE	1,1	0,8	1,1	1,2	1,3
Ameland	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7
Friesche Zeegat (Pinkegat + Zoutkamp)	0,4	0,4	0,5	0,7	0,9
Totaal	4,2	3,3	4,3	5,1	5,8

Uit Figuur 4.1 en Tabel 4.1 blijkt dat het zandtransport door de zeegaten relatief weinig verschilt tussen de zeespiegelstijgingsscenario's. Bij gelijkblijvende zeespiegelstijging wordt verwacht dat de import licht daalt van 4,2 miljoen m³/jaar naar 3,3 miljoen m³/jaar. Bij het hoogste zeespiegelstijgingsscenario van 8 mm/j wordt een toename van 40% verwacht tot 5,8 miljoen m³/jaar.

Een zeegatsysteem reageert vertraagd op de verandering van zeespiegelstijging. De vertraging is groter voor de zeegaten met grotere bekkens, en die met een sedimenttekort in de bekkens door ingrepen in het verleden. De verschillen in zeespiegelstijging tussen de scenario's beginnen in 2020,

maar de verschillen in sedimenttransport door de zeegaten worden pas merkbaar in 2030 in de kleine systemen van het Pinkegat en Eierlandse Gat, en pas aan het eind van de eeuw in het grote zeegatsysteem van het Marsdiep waarvan bekend is dat de sedimentimport transport gelimiteerd is.

De veranderingen van de sedimentimport ten opzichte van de huidige situatie zijn relatief klein. Voor alle scenario's neemt de totale sedimentimport eerst af in de tijd door het dempen van de verstoringen door de ingrepen in het verleden. De versnelling van zeespiegelstijging buigt deze afnemende trend om, maar niet vóór 2050. Tot 2060 zijn de verschillen niet significant.

Geconcludeerd wordt dat een significante (>25%) toename van de huidige transporten van zand naar de Waddenzee, op basis van de verkenning met het ASMITA-model, pas op lijken te treden bij snelheden van zeespiegelstijging ordegrrootte 4 keer zo groot als de huidige.

5 Referenties

Cleveringa, J. (2008). Ontwikkeling sedimentvolume Eems-Dollard en het Groninger Wad. Overzicht van de beschikbare kennis en gegevens. Alkyon, rapport A2269R1r3.

Deltares (2020): Technisch advies sedimentbehoefte kustfundament; ten behoeve van het beleidsadvies voor Kustgenese 2.0, auteurs Arno Nolte, Claire van Oeveren, Edwin Elias, Jebbe van der Werf, Pieter Koen Tonnon, Bart Grasmeijer, Heleen Vreugdenhil, Zheng Wang en Ad van der Spek, Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0004, in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, februari 2020.

Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., Wang Z.B. en 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*, 91–3: 293-310.

Elias, E.P.L., (2019). Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Rapport 11203683-002, Deltares, Delft.

Hijma, M., Kooi, H., (2018). Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2). Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden door geologische processen en menselijke activiteiten. Rapport 11202190-001. Deltares, Delft, 59 pp.

Oost, A.P., van der Spek, A.J.F., van Oeveren – Theeuwes, C., Tonnon, P.K. (2018). The contribution of mud to the net yearly sedimentation volume in the Dutch Wadden Sea. Rapport 1220339-006-ZKS-009, Deltares, Delft.

Stive, M.J.F. & Eysink, W.D., (1989). Voorspelling Ontwikkeling Kustlijn 1990-2090. Fase3. Deelrapport 3.1: Dynamisch Model van het Nederlandse Kuststelsel. Rapport H825, Waterloopkundig Laboratorium, Delft, 66 pp.

Van Maren, Bas, Reinier Schrijvershof en Julia Vroom, 2019. Hydromorfologische ontwikkeling Eems-Dollard, Optimalisatie morfologisch model en voorspelling autonome ontwikkeling Eems-estuarium ihkv ED2050. Rapport 11202245-000-ZKS-0011, Deltares, Delft.

Vermaas, T, Marges, V., (2017). Volumeanalyse oostelijke Waddenzee. Rapport Deltares 1230043-003, Deltares, Delft, 47 pp.

Walburg, L., (2001). De Zandbalans van het Zeegat van Texel bepaald met Verschillende Buitendelta-Definities. Rapport RIKZ/OS 2001. Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ, Den Haag, 51 pp.

Wang, Z.B., Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F. & Lodder, Q.L., 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea - impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences*, 97-3: 183-214.

Wang, Z.B., Lodder Q.J. (2019). Sediment exchange between the Wadden Sea and North Sea Coast. Modelling based on ASMITA. Rapport 1220339-008-ZKS-006, Deltares, Delft.