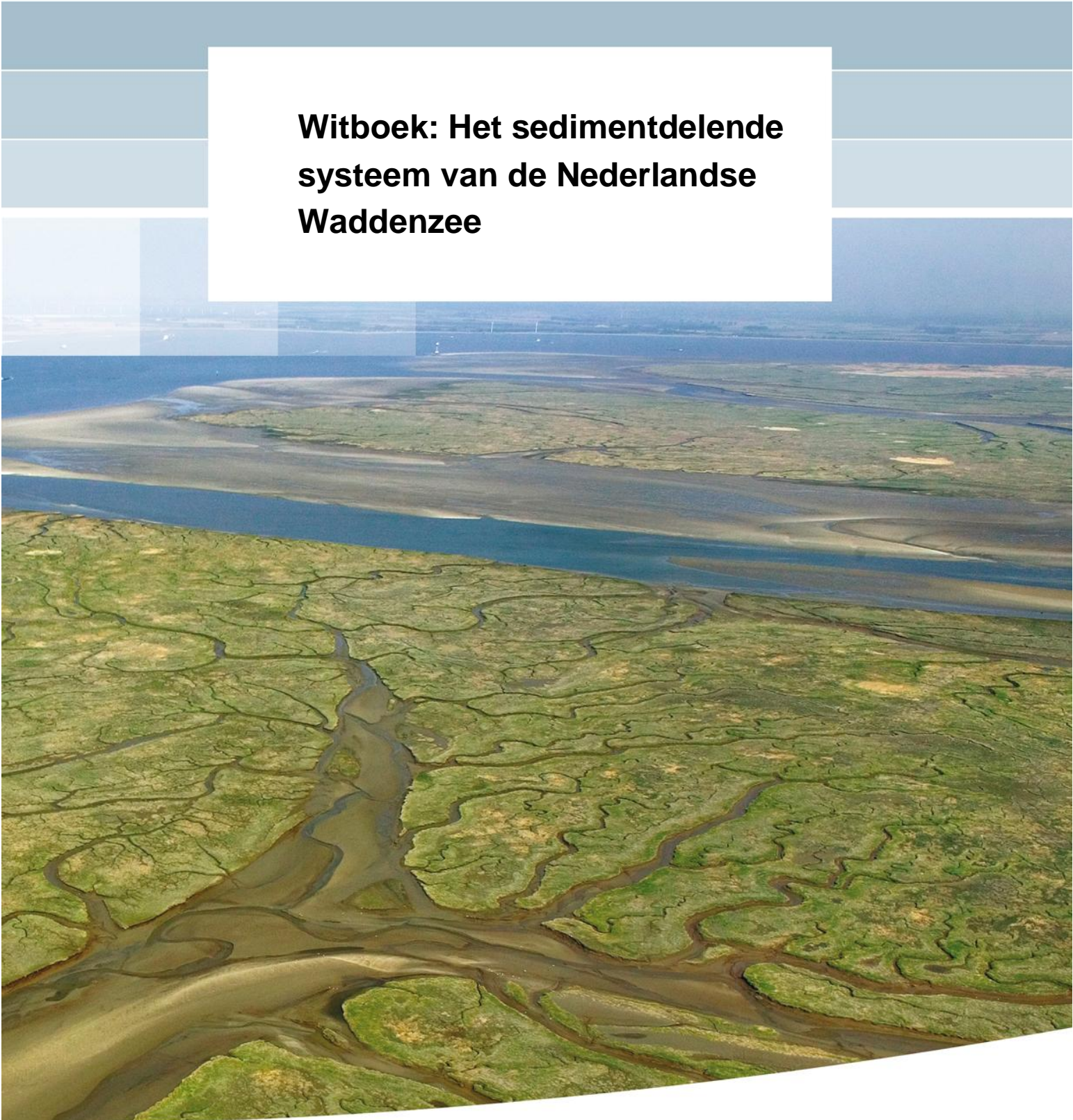


**Witboek: Het sedimentdelende
systeem van de Nederlandse
Waddenzee**



**Witboek: Het sedimentdelende
systeem van de Nederlandse
Waddenzee**

11202177-000

Titel

Witboek: Het sedimentdelende systeem van de Nederlandse Waddenzee

Project
11202177-000

Kenmerk
11202177-000-ZKS-0009

Pagina's
24

Trefwoorden



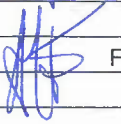

Nederlandse Waddenzee; Morfodynamica; Sedimenttransport; Relatieve zeespiegelstijging; Getijasymmetrie.

Samenvatting

Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee laten sinds begin 2017 onderzoek doen naar zowel de kennis als de kennishuishouding van de morfologie van de Nederlandse Waddenzee. Het eerste doel is om kennis en begrip van de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee op een structurele manier te verzamelen, te ordenen en te borgen. Het tweede doel is om te onderzoeken hoe deze kennis gebruikt wordt in beleid en beheer op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, gebruik en natuur(lijkheid). De doelgroepen van beide soorten kennis zijn zowel beleidsmakers, beheerders als wetenschappers. Dit rapport wordt uitgebracht als onderdeel van het onderzoek.

Het doel van dit 'witboek' is om de meest relevante beschikbare wetenschappelijke (objectieve) kennis en/of hypothesen over hoe de Nederlandse Waddenzee morfologisch werkt te structureren en met beheerders en beleidsmakers te kunnen delen. De focus hierbij is op de grootschalige morfologische processen. Het doel wordt nagestreefd door de volgende vragen te beantwoorden:

- 1 Wat zijn de belangrijkste hypothesen over de invloed van de afsluiting van de Zuiderzee en welke data kunnen deze bevestigen?
- 2 Wat is het verschil tussen het westelijke deel en oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee?
- 3 Wat zijn de mechanismen voor import of export van sediment, hoe werken ze en kunnen ze de opgetreden veranderingen verklaren?
- 4 Wat is het effect van relatieve zeespiegelstijging hierop?

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
v0.1	aug.2018	Zheng Wang		Ad van der Spek		Frank Hoozemans	
		Kees Nederhoff		Peter Herman			
v1.0	nov. 2018	Zheng Wang		Ad van der Spek		Frank Hoozemans	
		Kees Nederhoff		Peter Herman			

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond en probleemstelling	1
1.2 Doelstelling	1
2 Effecten afsluiting van de Zuiderzee op de westelijke Waddenzee	3
2.1 De afsluiting van de Zuiderzee heeft de getijvoortplanting in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee veranderd.	3
2.2 Door de verandering van de getijvoortplanting is de morfologische situatie van de Westelijke Waddenzee sterk veranderd	5
2.3 Het herstel van het morfologische evenwicht heeft geleid tot sedimenttransport van buiten (buitendelta's en kusten) naar binnen (bekken).	5
2.4 Hypothese: Het morfologische evenwicht van de Westelijke Waddenzee is nog (lang) niet hersteld.	5
2.5 Hypothese: Hoe het uiteindelijk morfologische evenwicht eruit ziet is afhankelijk van de bewegingen van de wantijen.	6
2.6 Er zijn verschillende toekomstscenario's.	6
3 Verschil tussen de westelijke en oostelijke Waddenzee	9
3.1 Verschil in vorm en grootte van bekkens	9
3.2 Verschil in afwijking t.o.v. morfologische evenwicht	9
3.3 Verschil in beperkende factor voor import	10
4 Mechanismen voor import en export van sediment	11
4.1 Inventarisatie van de mechanismen	11
4.2 Getijasymmetrie en netto sedimenttransport	13
5 Effecten van versnelde relatieve zeespiegelstijging	17
5.1 Een conceptueel model	17
5.2 Onderbouwing conceptueel model	18
5.3 Huidige toestand Nederlandse Waddenzee	19
6 Referenties	21

1 Inleiding

Rijkswaterstaat en Programma naar een Rijke Waddenzee laten sinds begin 2017 onderzoek doen naar zowel de kennis als de kennishuishouding van de morfologie van de Nederlandse Waddenzee. Het eerste doel is om kennis en begrip van de morfologische ontwikkeling van de Waddenzee op een structurele manier te verzamelen, te ordenen en te borgen. Het tweede doel is om te onderzoeken hoe deze kennis gebruikt wordt in beleid en beheer op het gebied van veiligheid, bereikbaarheid, gebruik en natuur(lijkheid). De doelgroepen van beide soorten kennis zijn zowel beleidsmakers, beheerders als wetenschappers. Dit rapport wordt uitgebracht als onderdeel van het onderzoek.

1.1 Achtergrond en probleemstelling

De Waddenzee wordt gekenmerkt door enerzijds grootschalig menselijk ingrijpen (b.v. afsluiting Zuiderzee en Lauwerszee) en anderzijds door autonome natuurlijke morfologische ontwikkelingen. Vanuit het beheer en beleid bestaat de behoefte om meer inzicht te krijgen in deze ontwikkelingen en hoe deze kunnen doorwerken op onder andere de veiligheid, nautische bereikbaarheid en natuurlijkheid van het systeem. Gelukkig is er veel wetenschappelijke kennis en/of hypothesen over hoe de Waddenzee zich als geheel gedraagt beschikbaar. Er zijn bijvoorbeeld verschillende theorieën over de relatie tussen getijasymmetrie en de morfologie in een getijdebekken (b.v. Dronkers, 1986; Friedrichs en Aubrey, 1988). Dit betekent echter niet dat al deze kennis gemeengoed is, omdat deze kennis niet erg toegankelijk is (b.v. theorieën zijn erg ingewikkeld en/of in het Engels zijn opgeschreven). Hierdoor bestaat het risico dat de kennis onvoldoende benut wordt bij het beheer en beleid wat resulteert in suboptimale besluiten.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit 'witboek' is om de meest relevante beschikbare wetenschappelijke (objectieve) kennis en/of hypothesen over hoe de Nederlandse Waddenzee morfologisch werkt te structureren en met beheerders en beleidsmakers te kunnen delen. De focus hierbij is op de grootschalige morfologische processen. De belangrijkste vragen die hierin aan bod komen zijn:

- 1 Wat zijn de belangrijkste hypothesen over de invloed van de afsluiting van de Zuiderzee en welke data kunnen deze bevestigen?
- 2 Wat is het verschil tussen het westelijke deel en oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee?
- 3 Wat zijn de mechanismen voor import of export van sediment, hoe werken ze en kunnen ze de opgetreden veranderingen verklaren?
- 4 Wat is het effect van relatieve zeespiegelstijging hierop?

Deze vragen zijn vastgesteld in een bespreking samen met diverse stakeholders waaronder Rijkswaterstaat, Arcadis en Deltares. De eerste 2 vragen behandelen de belangrijkste grootschalige morfologische fenomenen in de Waddenzee. De derde vraag gaat dieper in op de onderliggende processen. Met deze inzichten wordt het vraagstuk van zeespiegelstijging behandeld. Na de inleiding van dit rapport (Hoofdstuk 1) valt dit rapport uiteen in vier verschillende onderdelen die gerelateerd zijn aan de vragen uit de doelstelling. In Hoofdstuk 2 wordt het effect van de afsluiting van de Zuiderzee beschreven. In Hoofdstuk 3 wordt het verschil tussen de westelijke en oostelijke Waddenzee behandeld. Hoofdstuk 4 beschrijft de verschillende mechanismen voor import en export van sediment met specifieke aandacht voor getijasymmetrie. Relatieve zeespiegelstijging wordt behandeld in Hoofdstuk 5.

2 Effecten afsluiting van de Zuiderzee op de westelijke Waddenzee

De te beantwoorden vraag luidt: *Wat zijn de belangrijkste hypothesen over de invloed van de afsluiting van de Zuiderzee en welke data kunnen deze bevestigen?* In dit rapport beschrijven we 6 onderdelen over de invloed van de afsluiting van de Zuiderzee:

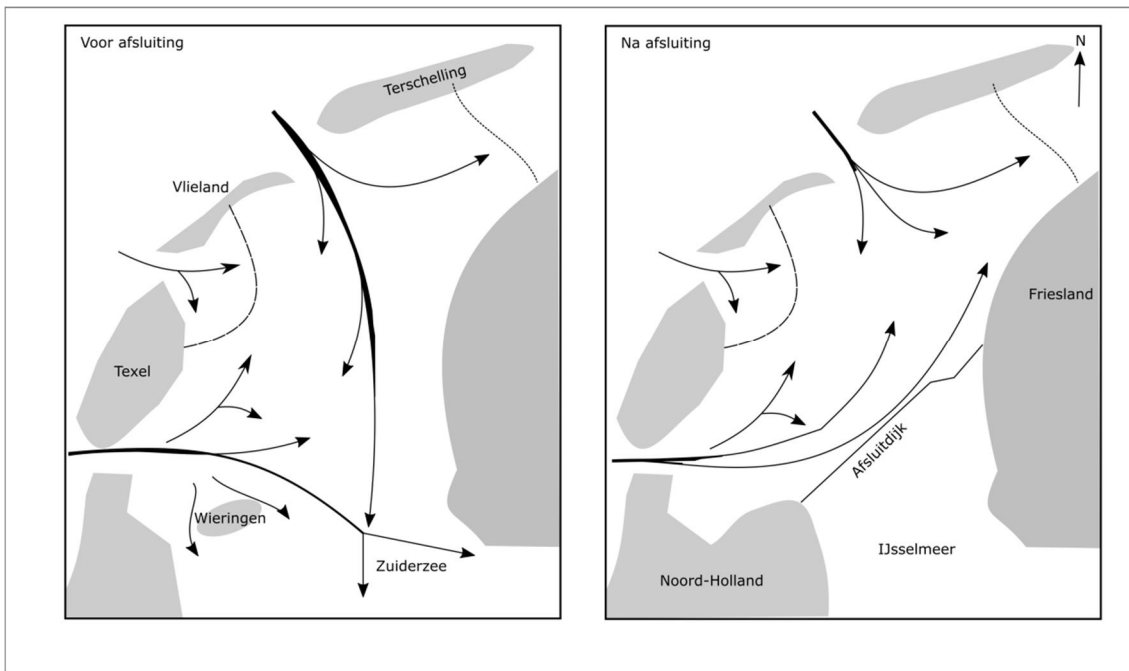
- 1 De afsluiting van de Zuiderzee heeft de getijvoortplanting in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee veranderd.
- 2 Door de verandering van de getijvoortplanting is de morfologische situatie van de Westelijke Waddenzee sterk veranderd
- 3 Het herstel van het morfologische evenwicht heeft geleid tot sedimenttransport van buiten (buitendelta's en kusten) naar binnen (bekken).
- 4 Hypothese: Het morfologische evenwicht van de Westelijke Waddenzee is nog (lang) niet hersteld.
- 5 Hypothese: Hoe het uiteindelijk morfologische evenwicht eruit ziet is afhankelijk van de bewegingen van de wantijen.
- 6 Er zijn verschillende mogelijke toekomstscenario's.

2.1 De afsluiting van de Zuiderzee heeft de getijvoortplanting in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee veranderd.

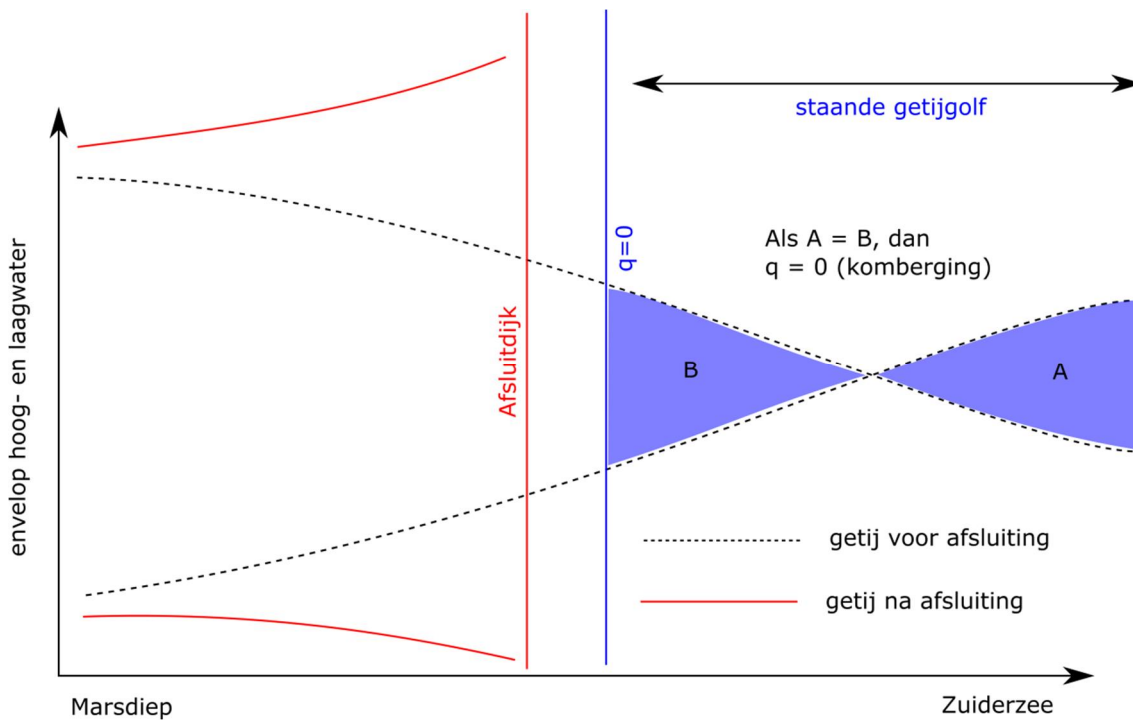
Voor de voltooiing van de Afsluitdijk propageerde het getij door de gehele Zuiderzee. De invloed van het getij was dus voelbaar van Den Helder tot en met Amsterdam. Na de afsluiting van de Zuiderzee met de Afsluitdijk is het getijstromingspatroon veranderd. Figuur 2.1 laat de verandering van de getij-indringing in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee voor en na afsluiting van de Zuiderzee zien. De verandering van het getij is voornamelijk opgetreden in de kombergingsgebieden van Marsdiep en Vlie. Daarnaast is de stroming in het gebied langs de Afsluitdijk sterk van richting en grootte veranderd.

De afsluiting van de Zuiderzee heeft de getijslag (i.e. het verschil tussen hoog- en laagwater) vergroot in het overgebleven deel van de westelijke Waddenzeebekkens (+/- 15 cm bij Den Helder). In Figuur 2.2 is dit weergegeven door de envelop van hoog- en laagwater vóór (zwarte stippellijn) en na de afsluiting (rode doorgetrokken lijn) in een ééndimensionale schematisatie weer te geven. Zoals de figuur laat zien is de Afsluitdijk iets zeewaarts geplaatst van de buik van de getijgolf (weergegeven met de blauwe verticale lijn). Als de envelop niet zou veranderen en de afsluiting precies ter hoogte van de buik zou plaatsvinden, dan zou het getijprisma, het volume water dat tijdens vloed via het zeegat naar binnen stroomt, ook niet veranderen. Door de reflectie van de getijgolf tegen de Afsluitdijk wordt de getijslag echter wél groter. Om het effect van de vergrote getijslag te compenseren is de Afsluitdijk iets meer zeewaarts geplaatst (rode verticale lijn) dan de buik van de oorspronkelijke getijgolf (blauwe verticale lijn), zodat het getijprisma niet teveel wordt beïnvloed door de afsluiting van de Zuiderzee. Het getijprisma is na de afsluiting echter met ongeveer 25% toegenomen (Rietveld, 1962, Thijsse, 1972, Elias e.a. 2006).

De vergroting van de getijslag door de afsluiting wordt bevestigd door de waterstandsgegevens gemeten bij de getijstations (b.v. Rietveld, 1962, maar zie ook Figuur 2.1). De veranderingen van het stromingspatroon worden bevestigd door metingen (b.v. Kolk & Schalkers, 1980) en resultaten van getijstromingssimulaties (b.v. Vroom e.a., 2012).



Figuur 2.1 Schematische weergave van de getijndringing in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee vóór (links) en na (rechts) de afsluiting van de Zuiderzee (gebaseerd op Elias et al. 2003).



Figuur 2.2 Schematische weergave envelop van hoog- en laagwater in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee vóór (gestippelde lijnen) en na (getrokken lijnen) de afsluiting van de Zuiderzee (gebaseerd op Elias et al. 2003). De lijn aangeduid met $q=0$ geeft de positie van de buik van het getijgolf aan. Doordat de kombergingsvolumes aangeduid met A en B gelijk zijn, is er geen getijstrooming bij de buik.

2.2 Door de verandering van de getijvoortplanting is de morfologische situatie van de Westelijke Waddenzee sterk veranderd

Naast aanpassing van het getijprima door de zeegaten Marsdiep en Vlie, geldt dat de getijstroming door de geulen in het binnenste deel van de Waddenzeebekkens Marsdiep en Vlie sterk gereduceerd / aangepast zijn. De Afsluitdijk blokkeert bijvoorbeeld de getijstroming. Ofwel het getijdebiet loodrecht op de dijk is gereduceerd tot nul. Het gevolg is een vloedstroming die (lokaal) is verzwakt en die niet langer zuidwaarts is gericht. Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.1 door het verloop van de dikte en richting van de lijnen.

Vanwege de relatie tussen de grootte van een geul en de sterkte van de getijstroming zijn de bestaande geulen te groot of te klein geworden afhankelijk van de verandering van de getijstroming. De geulen in het landwaartse deel van de Waddenzee zijn te ruim t.o.v. het morfologische evenwicht (Figuur 2.1). Sedimentatie is nodig om het morfologische evenwicht te herstellen. Met andere woorden, er is sedimentvraag (ook wel sedimenthonger genoemd) ontstaan in de bekkens. Hoeveel sedimentvraag er is, hangt af van hoe erg het morfologische evenwicht verstoord is. Dicht bij de Afsluitdijk hebben doodlopende geulen helemaal hun functie verloren en sedimenteren daardoor sterk. In andere delen van de Westelijke Waddenzee is de stroomsnelheid door toename van de debieten initieel toegenomen, daardoor verruimden de geulen. Er waren bijvoorbeeld vóór de afsluiting van de Zuiderzee geen grote geulen die west-oost lopen en die zijn na de afsluiting wel ontstaan. Alles bij elkaar is het volume van de geulen in Marsdiep en van die in Vlie te groot voor de getijstroming na de afsluiting van de Zuiderzee. Er is dus sedimentvraag in deze bekkens ontstaan.

De sedimentvraag in de bekkens door de afsluiting kan naast bovenstaande verklaring ook worden geschat aan de hand van empirische relaties voor het morfologisch evenwicht. Volgens deze relaties is het plaatareaal in een bekken bijvoorbeeld een functie van de totale bekkenoppervlakte. Hoe kleiner het bekken, hoe groter de fractie van het totale plaatoppervlakte plaat moet zijn. Een andere empirische relatie is dat de gemiddelde plaathoogte (gemeten vanaf het laagwater) evenredig is met de getijslag. Met de bekkenoppervlakte en de getijslag kunnen dus plaatoppervlakte en -volume boven laagwater berekend worden. Uit data blijkt ook dat het totale volume van de geulen in een bekken ongeveer evenredig is met het getijprisma tot de macht 1,5. Met deze relaties is het mogelijk het watervolume bij hoogwater in een bekken uit te drukken als een functie van de totale bekkenoppervlakte en de getijslag. Door het berekende evenwichtsvolume te vergelijken met het werkelijke gemeten volume kan de sedimentvraag worden berekend (in de orde van 1 miljard m³).

2.3 Het herstel van het morfologische evenwicht heeft geleid tot sedimenttransport van buiten (buitendelta's en kusten) naar binnen (bekken).

Diverse studies hebben aangetoond, op basis van gemeten bodemhoogtes, dat er sedimentatie is opgetreden in alle bekkens met uitzondering van Eierlandse Gat (b.v. Elias e.a., 2012; Nederhoff e.a., 2017; Wang et al., 2018). Deze studies laten zien dat erosie optreedt buiten de zeegaten en sedimentatie in de bekkens. De analyse van Elias e.a. (2012) laat ook zien dat er erosie op de buitendelta's en langs de Waddeneilanden is opgetreden. De hoeveelheid erosie buiten de zeegaten is ongeveer even groot als de hoeveelheid sedimentatie in de bekkens. Er is dus sediment geïmporteerd van buiten naar binnen via de zeegaten.

2.4 Hypothese: Het morfologische evenwicht van de Westelijke Waddenzee is nog (lang) niet hersteld.

Door de huidige morfologie met de evenwichtsmorfologie op basis van de empirische relaties (zie paragraaf 2.2) te vergelijken, wordt de sedimentvraag in de bekkens Marsdiep en Vlie

geschat op orde 1 miljard m³. Dit is veel groter dan de totale hoeveelheid sediment die sinds de afsluiting van de Zuiderzee is geïmporteerd, namelijk 573 miljoen m³ tussen 1935-2015 (Elias et al., 2012). Het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee is dus nog ver van het morfologische evenwicht volgens de empirische relaties. Een andere waarneming die deze hypothese bevestigt, is dat de sedimentatie binnen en de erosie buiten een min of meer doorgaande lineaire trend laten zien. De lineaire trend kan echter wel ter discussie worden gesteld. Op basis van de meest recente resultaten van de data analyse zou men ook kunnen zeggen dat de sedimentatiesnelheid in het westelijke deel van de Waddenzee aan het afnemen is. Verder kan men zich ook afvragen in hoeverre de empirische relaties voor morfologisch evenwicht geldig zijn, gegeven de onzekerheid m.b.t. de toekomstscenario's (zie paragraaf 2.6).

2.5 Hypothese: Hoe het uiteindelijk morfologische evenwicht eruit ziet is afhankelijk van de bewegingen van de wantijen.

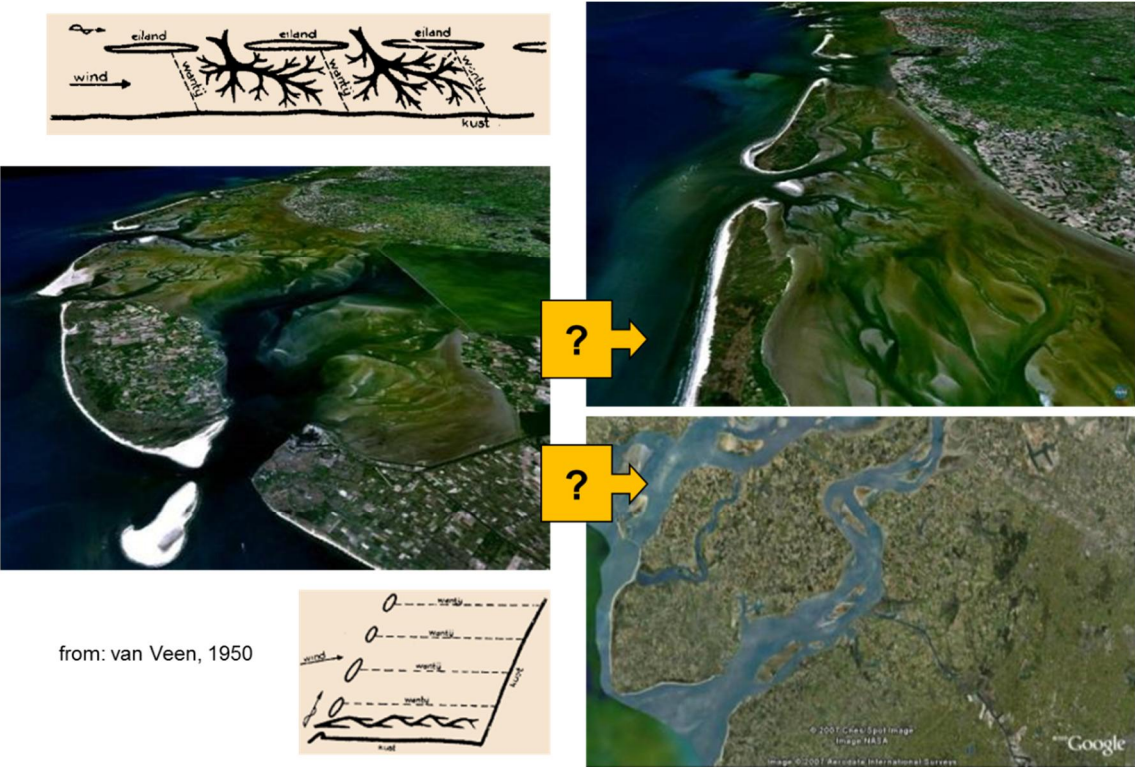
De wantijen vormen grenzen tussen de verschillende bekkens binnen de Waddenzee. De posities van de wantijen bepalen dus de verdeling van de bekkenoppervlaktes behorend bij de zeegaten. De wantijen in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee hebben zich sinds de afsluiting van de Zuiderzee verplaatst zodat de bekkens Marsdiep en Eierlandsegat groter zijn geworden en het bekken van Vlie kleiner.

In paragraaf 2.2 werd aangegeven dat het watervolume onder hoogwater afhankelijk is van de bekkenoppervlakte en getijslag (dit is dus niet hetzelfde als getijprisma, aangezien geulen hierin dus wel worden meegenomen). Volgens deze relatie geldt dat hoe groter een bekken is des te dieper het bekken gemiddeld is. Deze regel kan men ook constateren door op een bathymetrie kaart van de hele Waddenzee te kijken (of over de tijd te bekijken). Op basis van bodemkaarten uit 1997 blijkt bijvoorbeeld het relatief grote Marsdiep een gemiddelde diepte van 4.7 meter te hebben ten opzichte van 4.0 meter voor het Amelander Zeegat en 3.0 voor het Eierlandse Gat. Daarom hebben de bewegingen van de wantijen invloed op het uiteindelijk morfologische evenwicht van het systeem bestaande uit meerdere bekkens (zie Wang e.a., 2013).

2.6 Er zijn verschillende toekomstscenario's.

De schatting van de sedimentvraag in de bekkens zoals hierboven is genoemd is gebaseerd op de aanname dat de bekkens kort (t.o.v. getijgolf lengte die honderden km is) zijn. Het is echter de vraag of deze aanname geldt in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee. Daarnaast heeft het westelijke deel van de Waddenzee een zeer grote sedimentvraag volgens de empirische relaties geldende voor korte bekkens (waarvoor het getijvolume kan eenvoudig worden bepaald aan de hand van de kombergingsbeschouwing). Het is daarom zeer de vraag of deze grote sedimentvraag ooit wordt weggewerkt door import van sediment. Een mogelijk toekomstig scenario is dat de morfologie van het Marsdiep zich ontwikkelt tot een relatief lange bekken dat op de Westerschelde lijkt. Korte en lange bekkens hebben een hele andere plaat-geul configuratie (van Veen, 1950). De twee genoemde plaat-geul configuraties zijn weergegeven in Figuur 2.3. Afhankelijk van naar welke configuratie de westelijke Waddenzee zich ontwikkelt, wat op dit moment nog moeilijk te zeggen is, kan de uiteindelijk sedimentvraag erg verschillend zijn.

Verder is ook de ontwikkeling van het wantij tussen de twee bekkens een onzekere factor. Niet alleen de positie daarvan is onzeker, ook is het de vraag of het wantij hoog genoeg zal zijn. Met andere woorden, er is ook een mogelijkheid dat de twee zeegaten Marsdiep en Vlie samen een bekken delen zonder een duidelijke scheiding. Volgens de analyse van Van de Kreeke e.a. (2008) is zo een systeem instabiel (er zou dan uiteindelijk maar een zeegat open blijven).



Figuur 2.3 De twee toekomstige scenario's van het Marsdiep.

3 Verschil tussen de westelijke en oostelijke Waddenzee

De te beantwoorden vraag luidt: “*Wat is het verschil tussen de morfologie van het westelijke deel en oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee?*”. Samengevat zijn de volgende verschillen tussen de twee delen te noemen:

- 1 Verschil in vorm en grootte van de bekkens: westelijk deel breder en groter dan oostelijk deel.
- 2 Verschil in de afwijking t.o.v. morfologisch evenwicht: westelijk deel ver van evenwicht, oostelijk deel dicht bij evenwicht.
- 3 Verschil in beperkende factor voor netto import: westelijk deel transportcapaciteit, oostelijk deel sedimentvraag.

Hieronder worden deze verschillen nader toegelicht met de ondersteunende data.

3.1 Verschil in vorm en grootte van bekkens

Het eerste opvallende verschil tussen het westelijke deel (i.e. Marsdiep, Eierlandse Gat en Vlie) en het oostelijke deel (i.e. Ameland Zeegat, Friesche Zeegat en Lauwers/Groninger Wad) van de Nederlandse Waddenzee betreft de vorm en de grootte van de bekkens (Figuur 3.1 & Tabel 3.1). Dit kan men al duidelijk zien op een simpele kaart (b.v. Figuur 3.1). De afstand tussen de Waddeneilanden en het vasteland is groter in het westelijke deel dan in het oostelijke deel van de Waddenzee. Dit heeft tot gevolg dat de bekkens Marsdiep en Vlie groter zijn dan de bekkens in het oostelijke deel. Het kleinere bekken Eierlandse Gat is een uitzondering en het enige Waddenzeebekken dat niet aan vasteland grenst. Verder heeft het huidige Marsdiep ook een afwijkende vorm t.o.v. de andere bekkens. Het Marsdiep is langgerekt, wat ook de vraag oproept of het zich niet tot een estuarium zoals de Westerschelde ontwikkelt i.p.v. tot een kort bekken zoals de overige Waddenzeebekkens (zie ook paragraaf 2.6).

Tabel 3.1 De belangrijkste karakteristieken per bekken (Elias et al., 2006)

Kombering	Gemiddelde getijprisma [miljoen m ³]	Oppervlakte tijdens MHW [km ²]	Oppervlakte platen tijdens MLW [km ²]
Marsdiep	1054	712	121
Eierlandse Gat	207	153	106
Vlie	1078	668	323
Ameland Inlet	478	309	165
Friesche Zeegat	300	195	124
Eems-Dollar Zeegat	1000	520	214

3.2 Verschil in afwijking t.o.v. morfologische evenwicht

De afsluiting van de Zuiderzee heeft een grote verstoring van het morfologische evenwicht in het westelijke deel van de Waddenzee veroorzaakt. Er is een grote sedimentvraag in de bekkens Marsdiep en Vlie ontstaan. De afwijking t.o.v. het morfologische evenwicht is nog lang niet weggewerkt. Er is al een grote hoeveelheid sediment (orde 500 miljoen m³) naar deze bekkens geïmporteerd sinds de afsluiting van de Zuiderzee, maar er is nog een substantiële resterende sedimentvraag (orde 1 miljard m³). Merk wel op dat er nog onzekerheden zijn m.b.t. het uiteindelijke morfologische evenwicht en de toekomstige ontwikkelingen (zie discussies in 2.4 en 2.6). Het oostelijke deel is daartegen veel dichter bij

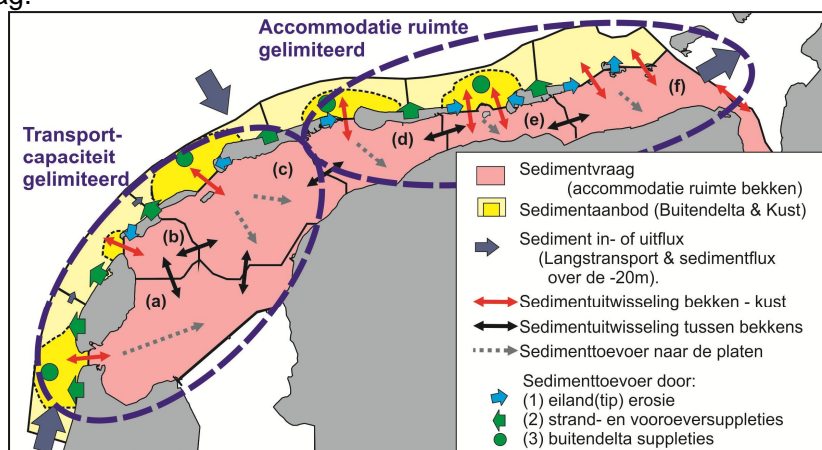
morfologisch evenwicht. Bijvoorbeeld is de ontwikkeling van het Friesche Zeegat ook beïnvloed geweest door de afsluiting van de Lauwerszee in 1969. Hierdoor ontstond er een sedimentvraag in met name de Zoutkamperlaag. Deze verstoring is echter veel sneller weggewerkt om twee redenen. Ten eerste, het betreft hier een veel kleiner systeem, en in het algemeen geldt dat hoe groter het systeem hoe groter de morfologische tijdschaal (tijd voor herstel van morfologisch evenwicht). Ten tweede, deze afsluiting heeft wèl een afname van het getijprisma (orde 1/3) van het Friesche Zeegat veroorzaakt (in tegenstelling tot de zeegaten Marsdiep en Vlie waar het getijprisma juist iets groter werden door de afsluiting van de Zuiderzee). Daardoor is er naast de sedimentvraag in het bekken ook een sedimentoverschot in de buitendelta ontstaan. Sedimenttransport van de buitendelta naar de geulen in het bekken leidde tot herstel van evenwicht in deze beide morfologische elementen.

3.3 Verschil in beperkende factor voor import

Het hierboven beschreven verschil in afwijking t.o.v. morfologisch evenwicht heeft als gevolg dat de beperkende factor voor sedimentimport naar de Waddenzeebekkens in de twee delen verschillend zijn. In het westelijke deel is het systeem ver van evenwicht en er is een grote sedimentvraag in de bekkens. Er is ook voldoende sediment buiten de zeegaten aanwezig. Er is immers voldoende zand beschikbaar in het gehele kustfundament. Toch blijft de netto import van sediment naar het westelijke deel van de Waddenzee beperkt, tot ongeveer 6 miljoen m³ per jaar. Blijkbaar is er een limiet aan de sedimenttransportcapaciteit door de zeegaten. In het westelijke deel van de NL Waddenzee wordt de sedimentimport dus beperkt door de transportcapaciteit.

Het oostelijke deel is veel dicht bij het morfologische evenwicht en de sedimentvraag ontstaat voornamelijk door relatieve zeespiegelstijging. Het feit dat er geen daling van het wadoppervlak als gevolg van bodemdaling door gaswinning kan worden teruggevonden in de Waddenzee wijst erop dat de extra sedimentvraag snel kan worden aangevuld (b.v. Schrijvershof e.a., 2017). Er is dus blijkbaar geen beperking door de sedimenttransportcapaciteit of aanbod. De sedimentimport naar de bekkens is beperkt door sedimentvraag.

Figuur 3.1 vat het gehanteerde conceptuele model samen: sedimentimport naar de Waddenzeebekkens wordt gestuurd door sedimentvraag en beperkt door sedimenttransportcapaciteit in de zeegaten. Sedimentatie in de Waddenzee wordt in het westelijke deel gestuurd door de transportcapaciteit en in het oostelijke deel door de sedimentvraag.



Figuur 3.1 Het sediment-delende systeem van de Nederlandse Waddenzee en het verschil tussen het oostelijke en westelijke deel (uit Wang e.a., 2018).

4 Mechanismen voor import en export van sediment

4.1 Inventarisatie van de mechanismen

Er stroomt gedurende ieder getij water via de zeegaten de Waddenzee in tijdens vloed en de Waddenzee uit tijdens eb. De hoeveelheden water die in- en uitstromen zijn bijna gelijk aan elkaar. Hoe kan er dan toch sediment worden geïmporteerd in de Waddenzeebekkens en waarom neemt de import toe door de afsluitingen van de Zuiderzee en de Lauwerszee? In dit hoofdstuk wordt er eerst (Hoofdstuk 4.1) een inventarisatie van fysische mechanismen die netto sedimenttransport veroorzaken gegeven. Daarna, in paragraaf 4.2, wordt één categorie van deze mechanismen, getijasymmetrie, nader toegelicht omdat deze categorie het meest wordt beïnvloed door menselijke ingrepen zoals de afsluiting van een deel van een Waddenzeebekken. Tenslotte worden de invloeden van menselijke ingrepen en zeespiegelstijging besproken (paragraaf 4.3).

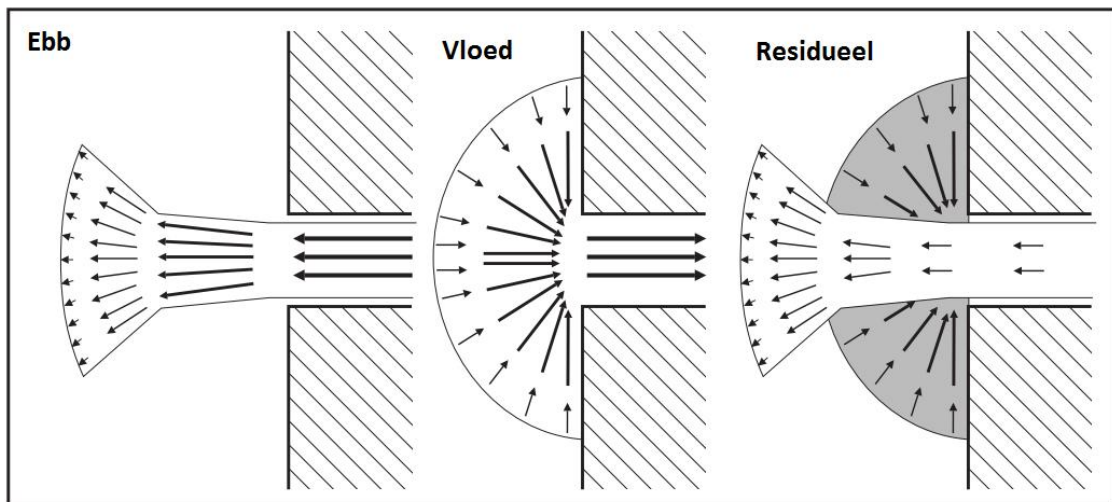
Er is veel literatuur over de processen en mechanismen van netto sedimenttransport in getijgebieden in het algemeen en over sedimentimport naar de Waddenzee in het bijzonder. Elke publicatie concentreert zich echter vaak op één of enkele mechanismen. Bovendien worden sommige mechanismen door verschillende experts anders genoemd of uitgelegd. Zo legt de ene onderzoeker de importmechanismen uit door een zandkorrel te volgen en anderen door op een vaste locatie te monitoren wat er gebeurt (Lagrangiaanse versus Euleriaanse benadering). In dit rapport wordt de Euleriaanse manier gehanteerd omdat dit een overzichtelijkere inventarisatie geeft van de mechanismen die netto sedimenttransport (dus import of export) door een zeegat veroorzaken.

Hieronder volgt een overzicht van de meest relevante mechanismen.

- **Reststroming.** Een puur symmetrische getijstroming betekent dat de stroomsnelheid door een zeegat als een sinusfunctie kan worden beschreven. Dit veroorzaakt dan geen netto sedimenttransport. Als er echter bovenop de symmetrische getijstroming nog een netto stroming is, oftewel als het gemiddelde van de stroomsnelheid over een getijperiode niet nul is, dan ontstaat er wel een netto sedimenttransport in dezelfde richting als de gemiddelde stroomsnelheid. Een reststroming kan op verschillende manieren ontstaan:
 - Zoetwatertoevoer. De toevoer van zoetwater in de Waddenzee veroorzaakt een netto zeewaartse stroming. Dit speelt vooral in het Marsdiep door de afvoer van het IJsselmeer via de Stevin- en Lorentzsluizen, maar ook in de Zoutkamperlaag als gevolg van lozingen vanuit het Lauwersmeer.
 - Compensatiestroming van Stoke's drift. Deze vorm van reststroming treedt op als vloed- en ebstroming niet op gelijk waterniveau optreden. Aangezien de Waddenzee achterin gesloten is moet het getijgemiddelde debiet door een zeegat gelijk aan nul zijn. De vloedstroming treedt op bij hogere waterstand (dus grotere waterdiepte en dwarsdoorsnede van het zeegat) dan de ebstroming. Daardoor is de getijgemiddelde stroomsnelheid niet gelijk aan nul en moet er een naar buiten gerichte reststroomsnelheid zijn.
 - Windgedreven stroming. Wind kan netto stroming veroorzaken, zowel in de vorm van een gemiddelde stroomsnelheid als in de vorm van netto debieten door de zeegaten als gevolg van rondstroming (dus via één zeegat naar binnen en via een ander naar buiten).

- **Getijasymmetrie¹**. In werkelijkheid is het getij niet puur symmetrisch en de waterstand en/of de stroomsnelheid op een bepaalde locatie kan zeker niet worden beschreven door een enkele sinus- of cosinusfunctie in de tijd. De volgende twee typen asymmetrie van het getij veroorzaken netto sedimenttransport:
 - Asymmetrie in piekstroomsnelheid tijdens vloed en eb, in samenhang met asymmetrie in vloed- en ebduur.
 - Asymmetrie in de duur van kentering tijdens laag- en hoogwater.
 - Asymmetrie in hoog en laagwater: Tijdens hoogwater is de gemiddelde waterdiepte boven de platen klein. Hierdoor zal een aanzienlijk groter deel van het sediment dat in suspensie is de bodem bereiken. Ook heeft het van de platen afstromende water een veel lagere snelheid waardoor het grootste deel van het afgezette materiaal ook nog eens blijft liggen.
- **Lokale asymmetrie rondom een zeegat**. Het lokale stromingsveld rondom een zeegat bevat een paar asymmetrische kenmerken die in samenhang met de ruimtelijke variatie van de fysische processen van sedimentbeweging netto sedimentimport of –export kunnen veroorzaken.
 - Asymmetrie in stroming van en naar een zeegat. De keel van een zeegat vormt een vernauwing voor de uitwisselingsstroming tussen de Noordzee en de Waddenzee. De stroming vanaf een vernauwing lijkt op een straalstroming, terwijl de stroming naar een vernauwing meer lijkt op een potentiaalstroming. Een straalstroming is meer geconcentreerd en heeft een grotere sterkte dan een potentiaalstroming. Tijdens vloed lijkt de stroming buiten het zeegat dus op een potentiaalstroming terwijl die binnen het zeegat op een straalstroming lijkt. Tijdens eb is het omgekeerd. Als de andere condities (zoals sedimentconcentraties, golven, etc.) uniform zouden zijn dan zou deze asymmetrie niet tot netto sedimenttransport door het zeegat leiden. Aan beide kanten zou er een netto sedimenttransport vanaf de keel van het zeegat zijn, aan de buitenkant naar de buitendelta en aan de binnenkant naar het bekken. In de werkelijkheid zijn de golven op de buitendelta echter sterker dan in het bekken. Dit zorgt voor meer opwoeling van sediment en dus een hogere sedimentconcentratie. Hierdoor neemt de potentiaalstroming buiten de zeegaten tijdens vloed meer sediment mee dan de potentiaalstroming binnen de zeegaten tijdens eb. Zo kan er dus netto sedimentimport optreden.
 - Figuur 4.1 schetst de eb, vloed en residuele stroming. In werkelijkheid is het stromingspatroon gecompliceerder door de variatie in morfologie en de voortplanting van de getijgolf langs de kust. Belangrijk is wel dat er een horizontale circulatie ontstaat in de netto stroming. Zo kan de netto stroming aan de ene kant van het zeegat naar binnen gericht zijn en aan de andere kant naar buiten. Dit in combinatie met de ruimtelijke variatie in bijvoorbeeld de opwoeling van sediment door golven kan netto sedimenttransport door het zeegat veroorzaken.

¹ In de volgende paragraaf wordt getijasymmetrie meer in detail uitgelegd.



Figuur 4.1

Patroon van netto stroming t.g.v. vernauwing zeegat (Elias et al., 2006)

- **Dispersie.** Dispersie is het mechanisme waarbij transport van gebieden met een hogere concentratie naar gebied met lagere concentratie optreedt door menging van watermassa's. Met menging wordt bedoeld een waterbeweging die geen netto waterflux op grote tijd- en ruimteschaal tot gevolg heeft. Het relevante mengingsmechanisme hangt af van hoe de tijd- en ruimteschaal worden gedefinieerd. Wanneer je aggregereert over de breedte van het hele zeegat en dit getijgemiddeld beschouwt dan kan de getijstrooming inclusief de verschijnselen die bij het vorige twee mechanismen zijn beschreven als het mengingsmechanisme worden beschouwd. Dit is analoog aan de sedimentatie in een havenbekken: hogere sedimentconcentratie buiten de haven zorgen voor depositie binnen. Het netto sedimenttransport door het zeegat wordt bepaald door het uitgewisselde volumewater in een getijperiode en het verschil in sedimentconcentratie tussen inkomend en uitgaand water.
- **Dichtheidsstroming.** Een bijzondere vorm van wateruitwisseling tussen binnen en buiten een zeegat is dichtheidstroming. Door een gradiënt in waterdichtheid als gevolg van bijvoorbeeld een gradiënt in zoutgehalte of temperatuur van het water kan er een circulatie ontstaan waarbij het water bij de bodem naar binnen stroomt en naar buiten bij het wateroppervlak. Dit wordt ook wel estuariene circulatie genoemd. De sedimentconcentratie bij de bodem is hoger dan bij het wateroppervlak waardoor deze estuariene circulatie sedimentimport veroorzaakt.

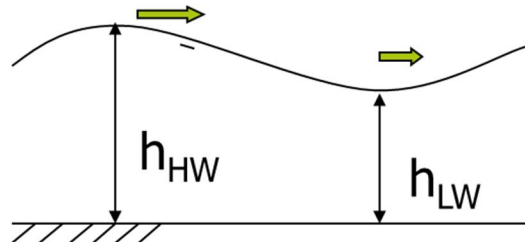
4.2 Getijasymmetrie en netto sedimenttransport

In deze paragraaf wordt het mechanisme getijasymmetrie voor netto sedimenttransport nader toegelicht door een aantal vragen te beantwoorden.

1. Hoe ontstaat getijasymmetrie?

Getijasymmetrie ontstaat door vervorming van de getijgolf tijdens voortplanting in ondiep water. Dit is het eenvoudigst te begrijpen door de voortplanting in openwater zoals de Noordzee te beschouwen (Figuur 4.2). De voortplantingssnelheid van de getijgolf hangt af van de waterdiepte, hoe dieper het water hoe sneller de golfvoortplanting. In ondiep water ondervindt de getijgolf een merkbare variatie van de waterdiepte. Bij de top van de getijgolf (hoogwater) is de waterdiepte groter dan bij het dal (laagwater). Hierdoor is de voortplanting van de top sneller dan die van het dal. Dit heeft tot gevolg dat een in het begin symmetrische

(bijv. sinusvormige) golf wordt vervormd tot een asymmetrische golf. Dit gebeurt zodanig dat de voorkant van de golf korter en steiler wordt en de achterkant langer en flauwer. Als de waterstandsvariatie op een bepaalde locatie wordt gemeten, dan zal opvallen dat de fase van stijgend water (passeren van de voorkant van de golf) korter duurt dan die van dalend water.



Figuur 4.2 Voortplanting van een getijgolf in ondiep water.

Een dergelijk asymmetrisch getij heet vloeddominant. Dit heeft te maken met de relatie tussen het verticale getij (de variërende waterstand) en het horizontale getij (de stroming). In een relatief kort bekken zal de tijdspanne tussen hoogwater in het zeegat en aan de rand van het bekken klein zijn. Dan is de stand van het wateroppervlak in het bekken bijna horizontaal (omdat het bekken, in de orde van enkele kilometers lang, veel korter is dan de getijgolf, die in de orde van honderden kilometers). De getijstroming door het zeegat, het horizontaal getij, kan dan worden gerelateerd aan de waterstandsverandering in het bekken, het verticaal getij, via een kombergingsbeschouwing. Dat betekent dat het debiet door het zeegat gelijk is aan de oppervlakte van het water in het bekken maal de snelheid van de waterstandvariatie in het bekken. Als de periode van stijgend water korter duurt is de stijging van de waterstand sneller dan de daling. Bij zeegaten is de vloedstroming korter en sterker dan de ebstroming. Dit betekent dus dat zeegaten vloeddominant zijn.

Anders dan in open water is de voortplanting in een bekken zoals de Waddenzee niet altijd vloeddominant. Dit komt door de aanwezigheid van intergetijdengebieden zoals de wadplaten. De voortplantingssnelheid van een getijgolf door een geul wordt bepaald door de gemiddelde diepte onder het wateroppervlak. Door de aanwezigheid van intergetijdengebied kan het zijn dat tijdens hoog water (wanneer de platen onder water staan) de gemiddelde waterdiepte kleiner is dan tijdens laag water. Het getij kan dus ook ebdominant worden.

2. Waar hangt de getijasymmetrie in de Waddenzee van af?

Uit het antwoord op de vorige vraag kan je al concluderen dat de vervorming van de getijgolf in een Waddenzeebekken van zowel de inkomende getijgolf als van de morfologie van het bekken afhangt. Van de getijgolf zelf is de amplitude van het getij belangrijk. De (gemiddelde) diepte en het relatieve oppervlak intergetijdengebied zijn de relevante morfologische kenmerken van een bekken. Friedrichs en Aubrey (1988) combineren deze hydromorfologische kenmerken in twee dimensieloze indicatoren: 1) de verhouding van de getijamplitude en de diepte van de geulen in het bekken en 2) de verhouding tussen het watervolume tussen HW en de bodem van het intergetijdegebied en het volume van de geulen. Globaal geldt dat hoe dieper en hoe meer intergetijdengebied in het bekken, hoe ebdominanter het getij wordt.

Hierbij moet worden opgemerkt dat de getijasymmetrie in de Waddenzee niet alleen door de vervorming van de getijgolf binnen de Waddenzee zelf wordt bepaald, maar dat het getij langs de Noordzeekust al asymmetrisch is als gevolg van de voortplanting in ondiep water

(zie punt 1.). Het hangt dus ook af van hoe asymmetrisch het getij al is voordat het zich binnen de Waddenzee voortplant.

Verder moet ook opgemerkt worden dat de uitleg hierboven voornamelijk over de asymmetrie in pieksnelheid in samenhang met de asymmetrie in vloed- en ebduur gaat. De vervorming van de getijgolf tijdens de voortplanting kan ook tot gevolg hebben dat de duur van de stroomkenteringen bij hoogwater en laagwater verschillend wordt. Met de kenteringsduur wordt bedoeld de periode waarin de stroomsnelheid laag is rondom hoog- en laagwater (bijvoorbeeld lager dan de kritische grens voor begin van beweging van sedimentkorrels). Beide vormen van getijasymmetrie kunnen netto sedimenttransport veroorzaken zoals in de vorige paragraaf al is genoemd en hieronder wordt toegelicht.

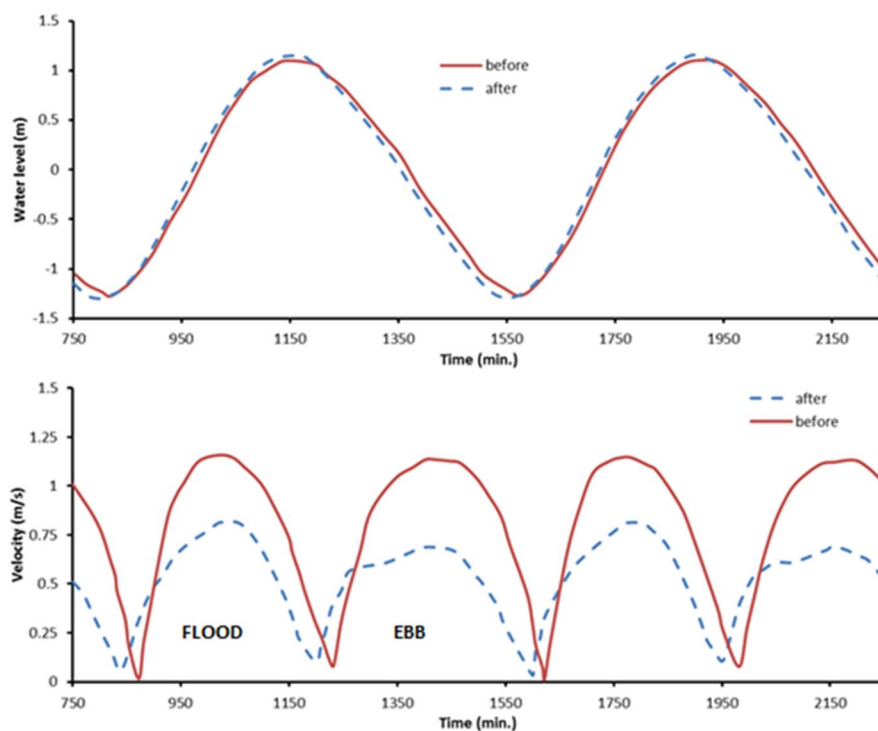
3. Hoe veroorzaakt getijasymmetrie netto sedimenttransport?

De relatie tussen stroomsnelheid en sedimenttransport is sterk niet-lineair. Bijvoorbeeld volgens de sedimenttransportformule van Engelund-Hansen is het sedimenttransport evenredig met de stroomsnelheid tot de macht 5. Dit is dan meteen de reden waarom een sterkere stroming in een evenredig kortere periode meer sediment transporteert. Vloeddominant getij in de zin van een kortere vloedduur en hogere pieksnelheid bij vloed dan bij eb, leidt dus tot import van sediment naar de Waddenzee en ebdominant getij leidt tot export.

De asymmetrie van de kenteringsduur bij hoog- en laagwater heeft alleen invloed op zwevend transport van sediment. Anders dan bodemtransport vindt zwevend sedimenttransport niet alleen bij de bodem plaats maar over de hele waterkolom. Zowel het opnemen van sediment van de bodem naar de waterkolom bij versnellende stroming als het uitzakken van sediment van de waterkolom naar de bodem bij vertragende stroming heeft tijd nodig. Door deze vertragingstijd is het werkelijke zwevend sedimenttransport niet gelijk aan de transportcapaciteit die alleen door de sterkte van de lokale en momentane stroming wordt bepaald. Als de hoogwaterkentering langer dan de laagwaterkentering is, heeft sediment meer tijd om uit te zakken tijdens hoogwater in het bekken. Daardoor bevat het terugstromend water bij eb minder sediment dan het water dat naar binnen stroomt tijdens vloed. Het resultaat hiervan is dus import van (fijn) sediment naar de Waddenzee.

4. Hoe wordt getijasymmetrie beïnvloed door ingrepen, waardoor er import/export wordt veroorzaakt?

Een ingreep in een bekken beïnvloedt de relevante morfologische kenmerken van het bekken en daardoor kan de getijasymmetrie in het bekken veranderen. Dit heeft tot gevolg dat het netto sedimenttransport door het zeegat verandert. Een voorbeeld hiervan is de afsluiting van de Lauwerszee, waardoor het overgebleven bekken in verhouding minder intergetijdengebied bevatte dan daarvóór omdat het afgesloten deel relatief meer wadplaten bevatte. Dit heeft tot gevolg dat de stroming door het zeegat na de afsluiting vloeddominanter werd (zie Figuur 4.3). Dit is één van de oorzaken dat er na de afsluiting meer sediment is geïmporteerd en sedimentatie in het overgebleven bekken is opgetreden.



Figuur 4.3 Gemodelleerde waterstand (boven) en stroomsnelheid bij de keel van Zoutkamperlaag vóór en na de afsluiting van de Lauwerszee (modelresultaten uit Wang e.a., 1995). In de bovenste figuur is te zien dat het stijgende deel van de waterstandscurve iets steiler is geworden terwijl het dalende deel iets vlakker werd. Dit resulteerde in een groter verschil tussen de maximale vloedsnelheid en de maximale ebsnelheid, zie de onderste figuur.

5 Effecten van versnelde relatieve zeespiegelstijging

5.1 Een conceptueel model

Hoe de Waddenzee reageert op (versnellende) zeespiegelstijging en bodemdaling door bijvoorbeeld gas- en zoutwinning (gecombineerd heet dit relatieve zeespiegelstijging) is een belangrijke beheervraag omdat het afwegen (vergunnen) van particuliere initiatieven in het gebied en het besluiten tot de juiste maatregelen door de overheid hier rekening mee dient te houden. Het beter kunnen beantwoorden van deze vraag is dus een belangrijke motivering van de behoefte aan meer kennis over het sedimentdelende systeem van het Waddenzeegebied.

Het simpele conceptuele model is dat de Waddenzee een dynamisch evenwicht nastreeft waarbij de extra import van sediment gelijk is aan de toename van het watervolume door de relatieve zeespiegelstijging. Dit betekent dat de bodem even snel stijgt als de waterspiegel en hierdoor blijft de waterdiepte dan gelijk. Bij een dergelijk dynamisch evenwicht geldt dat hoe sneller de zeespiegelstijging is, hoe groter de sedimentimport moet zijn. Het dynamische evenwicht moet dan afhankelijk zijn van de snelheid van zeespiegelstijging. Er ontstaat een over-diepte die groter wordt bij snellere zeespiegelstijging. Dit kan uitgelegd worden aan de hand van een gelineariseerde 1-element model waarin de verandering van het watervolume onder HW in een bekken evenredig is met de afwijking t.o.v. het evenwicht (zie Vergelijking 1)

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_e - V}{T} + S \cdot R \quad (1)$$

hierin

- V = Watervolume onder HW in het bekken
- t = Tijd
- V_e = Evenwichtswaarde van V
- T = Morfologische tijdschaal
- S = Horizontaal oppervlak van het bekken
- R = Snelheid van relatieve zeespiegelstijging

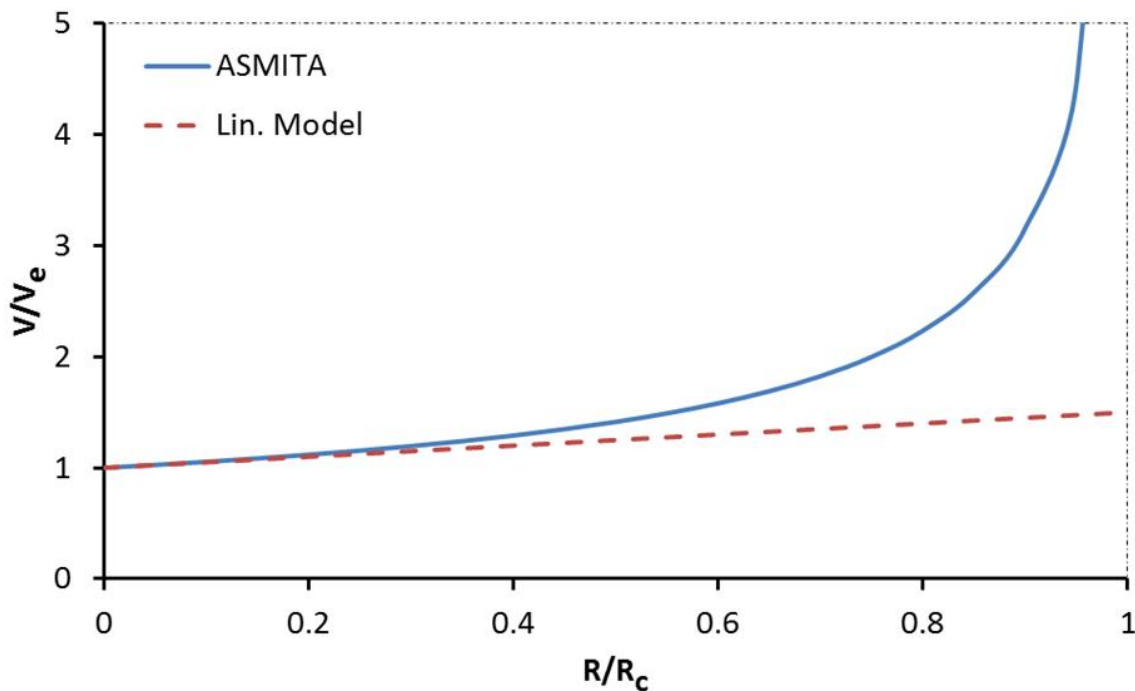
Een dynamisch evenwicht bij een constante snelheid van ZSS wordt bereikt als het volume niet meer verandert, dus:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{V_e - V}{T} + S \cdot R = 0 \quad (2)$$

Dit leidt tot

$$V = V_e + S \cdot R \cdot T \quad (3)$$

Deze relatie is weergegeven in Figuur 5.1 waarin ook het dynamische evenwicht volgens het niet-lineaire ASMITA model (wat beter is bij grotere snelheid van zeespiegelstijging en ook een kritische waarde van R voor verdrinking, R_c voorspelt) is weergegeven.



Figuur 5.1 Dynamisch morfologisch evenwicht horende bij relatieve ZSS met constante snelheid. Het 1-element model werkt met het watervolume V onder HW als systeemvariabele. Op de horizontale as is de zeespiegelstijgingssnelheid R genormaliseerd met de kritische waarde voor verdrinking R_c .

Bij dit conceptueel model zijn er twee dingen belangrijk. Ten eerste, bij versnelling van zeespiegelstijging heeft het systeem een aanpassingstijd nodig voordat het dynamische evenwicht horende bij de snellere zeespiegelstijging bereikt wordt. Ten tweede, er is een kritische waarde van de snelheid van de relatieve zeespiegelstijging. Immers, er is geen oneindige transportcapaciteit om materiaal aan te voeren. Als deze kritische snelheid overschreden wordt, is er geen dynamisch evenwicht meer mogelijk en de Waddenzee gaat dan verdrinken. Opgemerkt wordt dat bij overschrijding van de kritische snelheid het een tijd duurt voordat de volledige verdrinking optreedt. Deze periode kan eeuwen of nog langer zijn afhankelijk van de snelheid van zeespiegelstijging. Een andere opmerking is dat ook als de kritische snelheid niet overschreden wordt, er een over-diepte ontstaat.

5.2 Onderbouwing conceptueel model

Bij het hierboven beschreven conceptueel model is er impliciet aangenomen dat een toename van de (over-) diepte in de Waddenzee tot verhoging van sedimentimport leidt. Dat dit inderdaad het geval is kan onderbouwd worden vanuit de fysische mechanismen voor het netto sedimenttransport of vanuit de ontwikkeling van sedimentvraag op basis van empirische relaties voor het morfologisch evenwicht. Vanuit de fysische mechanismen geredeneerd, moet bij grotere (over-)diepte het netto sedimenttransport naar binnen toenemen. Vanuit het morfologisch evenwicht geredeneerd, moet de sedimentvraag bij toename van over-diepte toenemen. Beiden zijn niet vanzelfsprekend en worden hieronder nader toegelicht.

Vanuit de fysische processen en mechanismen beschouwd zijn de volgende redenen te noemen waarom de sedimentimport naar de Waddenzee toeneemt bij grotere over-diepte door zeespiegelstijging:

- **Verhoging van de stroomsnelheid door de zeegaten.** Als het asymmetrische karakter van het getij niet verandert, zal een verhoging van de stroomsnelheden (bij

zowel vloed als eb) de grootte van het netto sedimenttransport doen toenemen. Toename van over-diepte heeft twee tegengestelde effecten op de sterkte van de getijstroming door de zeegaten. Ten eerste, het getijprisma neemt toe wat een verhogend effect heeft op de sterkte van de stroming. Ten tweede, de oppervlakte van het dwarsprofiel van een zeegat neemt toe, wat een verlagend effect heeft. Theoretisch kan er zowel een netto verhoging als verlaging zijn. Bij een relatief nauw zeegat wint de verhoging en bij een relatief breed zeegat de verlaging. Voor de zeegaten in de Waddenzee is het een verhoging. Daarnaast zorgt deze verandering ervoor dat zeegaten uitscheuren.

- **Verlaging van de zeewaarts gerichte reststroming.** Door de grotere diepte bij het zeegat zal de (diepte-gemiddelde) reststroming door bijvoorbeeld zoetwatertoevoer verzwakken als de hoeveelheid zoetwatertoevoer niet verandert. Het effect hiervan is een toename van sedimentexport.
- **Verandering van getijasymmetrie.** Een verhoging van de waterstand veroorzaakt veranderingen van de morfologische kenmerken die de getijasymmetrie in een getijdebekken beïnvloeden. Theoretisch kunnen de veranderingen de getijasymmetrie in beide richtingen doen veranderen afhankelijk van de morfologie van het bekken. In de Waddenzeebekkens is de verandering in de richting van meer vloeddominantie.
- **Verandering dispersie.** Verhoging van de waterstand kan bijvoorbeeld meer luwe gebieden in de Waddenzee creëren waarin fijn sediment kan sedimenteren. Meer sedimentatie in de Waddenzee kan de sedimentconcentratie in de Waddenzee en daarmee de gradiënt van de sedimentconcentratie veranderen. Dit resulteert in een netto sedimenttransport naar binnen (cq. minder naar buiten) door dispersie.

Hoewel bij sommige veranderingen in de fysische mechanismen door versnelling van zeespiegelstijging de sedimentimport ook kan afnemen hebben verschillende modelstudies (b.v. Dissanayake e.a., 2009) laten zien dat versnelling van zeespiegelstijging een verhogend effect op de sedimentimport voor de Waddenzee heeft.

Vanuit morfologisch evenwicht beschouwd, veroorzaakt een over-diepte afwijkingen t.o.v. het evenwicht zowel voor de platen als voor de geulen. Voor de platen betekent de afwijking door over-diepte een sedimentvraag. Dit is omdat de verhoging van laagwater in een afname van de plaathoogte (en plaatareaal) resulteert en omdat de verhoging van hoogwater geen extra plaat toevoegt. Voor de geulen verhoogt een over-diepte zowel, door toename van het getijprisma, het actuele als het evenwichtsvolume van de geulen waardoor het netto effect niet eenduidig hoeft te zijn. In de geulen kunnen er bij versnelde zeespiegelstijging dus zowel een sedimentvraag als –overschot ontstaan. Het totale effect in de Waddenzeebekkens is een toename van sedimentvraag bij versnelde zeespiegelstijging.

5.3 Huidige toestand Nederlandse Waddenzee

Zoals in hoofdstuk 3 is uitgelegd kan de Nederlandse Waddenzee verdeeld worden in een oostelijk en een westelijk deel. De in hoofdstuk 3 genoemde verschillen tussen deze twee delen hebben consequenties op de morfologische reactie op versnelde relatieve zeespiegelstijging.

Het oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee is relatief dichtbij het morfologische evenwicht. De sedimentimport naar dit deel wordt beperkt door gebrek aan sedimentvraag in de bekkens. Dit betekent dat een versnelde relatieve zeespiegelstijging zal resulteren in meer vraag en dus meer sedimentimport. Het westelijke deel daarentegen is ver van morfologisch evenwicht en daardoor is er al een grote sedimentvraag in de bekkens. De sedimentimport wordt beperkt door de sedimenttransportcapaciteit. Dit betekent dat een verdere toename van

sedimentvraag in de bekkens, door versnelde zeespiegelstijging, geen wezenlijke toename van de sedimentimport zal veroorzaken.

Het verschil in reactie op een versnelde relatieve zeespiegelstijging tussen het westelijke en het oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee maakt het niet-lineair gedrag van het systeem duidelijk: het is gevoelig voor veranderingen in de afwijking t.o.v. evenwicht alleen als de afwijking relatief klein blijft. Als de afwijking groter wordt, reageert het systeem minder op de verandering ervan. Dit gedrag kan consequenties hebben voor het beheer van het systeem met betrekking tot bijvoorbeeld bodemdaling door gas- en zoutwinning, waarbij het "Hand aan de kraan"principe wordt gehanteerd. In dit principe is de bepaling van de maximale snelheid van totale relatieve zeespiegelstijging (meegroeivermogen) een belangrijke kwestie. In het oostelijke deel, waar de afwijking nog klein is, wordt aanbevolen de snelheid van bodemdaling te beperken zodat de totale relatieve zeespiegelstijging de afwijking niet de limiet overschrijdt waarboven het systeem minder gevoelig wordt. Met andere woorden, de toename van sedimentatiesnelheid moet evenredig met de toename van afwijking blijven (Wang e.a., 2017; 2018). In het westelijke deel, waar de afwijking al ver boven deze limiet is, wordt voorgesteld de waargenomen sedimentatiesnelheid in het betreffende bekken te hanteren als limiet voor de snelheid van de totale relatieve zeespiegelstijging (Wang e.a., 2018).

6 Referenties

Dissanayake, D. M. P. K., Ranasinghe, R., Roelvink, D. (2009). Effect of Sea Level Rise in Tidal Inlet Evolution: A Numerical Modelling Approach. *Journal of Coastal Research*, 2009(56), 942–946.

Dronkers, J., 1986. Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research* 20: 117-131.

Elias, E.P.L., Stive, M.J.F., Bonekamp, J. G., Cleveringa, J., 2003. Tidal inlet dynamics in response to human intervention. *Coastal Engineering Journal*, 45(4): 629-658

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., De Ronde, J.G., 2012. Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences* 91: 293-310.

Elias, E.P.L., Cleveringa, J., Buijsman, M.C., Roelvink, J.A., Stive, M.J.F., 2006. Field and model data analysis of sand transport patterns in Texel Tidal Inlet (the Netherlands). *Coastal Engineering* 53(5):505-529

Friedrichs, C.T., Aubrey, D.G., 1988. Non-linear tidal distortion in shallow well-mixed estuaries: a synthesis. *Estuarine Coastal Shelf Science* 27: 521-545.

Kolk, B., Schalkers, K.M. (1990). De veranderingen in de Waddenzee ten gevolge van de afsluiting van de Zuiderzee. Rapport: 78.H238. Rijkswaterstaat.

Nederhoff, K., Smits, B., Wang, Z.B., 2017. KPP Wadden, Data analyse: getij en morfologie. Rapport 11200521-000-ZKS-0002, Deltares (Delft).

Rietveld, C.F.W. (1962). The Natural Development of the Wadden Sea after the Enclosure of the Zuider Sea. *Coastal Engineering*. Chapter 42.

Schrijvershof, R., Van den Boogaard, H., Visser, M., 2017. Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2000-2017). Rapport 11202013-000, Deltares (Delft).

Van de Kreeke, J., Brouwer, R.L., Zitman, T.J., Schuttelaars, H.M., 2008. The effect of a topographic high on the morphological stability of a two-inlet bay system. *Coastal Engineering* 55: 319-332.

Van der Spek, A.J.F., Elias, E.P.L., Lodder, Q.L., Hoogland, R., 2015. Toekomstige Suppletievolumes – Eindrapport, Rapport 1208140-005, Deltares (Delft).

Van Veen, J., 1950, Eb- en vloodschaar systemen in de Nederlandse getijwateren. *Tijdschrift Koninklijk Nederlandsch Aardrijkskundig Genootschap* 67: 303-325.

Vroom J., Elias E.P.L., Lescinski, J., Wang Z.B., 2012, [Assessment of the effects of the Zuider Sea closure on the hydrodynamics of the Wadden Sea inlets](#). *Coastal Engineering Proceedings*, 2012.

Wang, Z.B., Louters, T., De Vriend, H.J., 1995. Morphodynamic modelling for a tidal inlet in the Wadden Sea. *Marine Geology* 126: 289-300.

Wang, Z.B., Vroom, J., Van Prooijen, B.C., Labeur, R.J., Stive, M.J.F., 2013. Movement of tidal watersheds in the Wadden Sea and its consequences on the morphological development. *International Journal of Sediment Research* 28: 162-171.

Wang, Z.B., Cleveringa, J., Oost, A., 2017. Morfologische effecten bodemdaling in relatie tot gebruikruimte. Rapport 1230937-000, Deltares (Delft).

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*, October 2018.