

Ontwikkelingen van de Nederlandse Waddenzee bekkens tot 2100:

De invloed van versnelde zeespiegelstijging en van bodemdaling op de sedimentbalans— een synthese

Ad J.F. van der Spek

1 Deltares, P.O. Box 177, 2600 MH Delft, the Netherlands

Samenvatting

Klimaatveranderingen gaan zeer waarschijnlijk tot wereldwijde versnelling van zeespiegelstijging (ZSS) leiden. De geprojecteerde versnelling van ZSS zal ook de Waddenzee beïnvloeden. Bovenop een versnelde ZSS, zal gas- en zoutwinning bodemdaling veroorzaken die tot een extra toename van de waterdiepte in de getjebekken leidt. Dit zal consequenties hebben voor de sedimentbalans van de Waddenzee, en vooral voor de wadplaten die een hoge ecologische waarde hebben. Deze synthese presenteert projecties van de toekomstige toestand van de Nederlandse Waddenzee voor de jaren 2030, 2050 en 2100.

De geprojecteerde veranderingen in de gemiddelde zeespiegel in 2100 in Den Helder en Delfzijl zijn hoger dan de wereldwijd gemiddelde projecties. Dit komt grotendeels door de bovengemiddelde bijdragen van oceaan dynamiek en glaciaal-isostatische aanpassing in de regionale projecties. De geprojecteerde stijging van de gemiddelde zeespiegel in 2100 t.o.v. 2018 op deze locaties is 0,41 m, 0,52 m en 0,76 m voor, respectievelijk, de RCP2.6, RCP4.5 en RCP8.5 klimaatscenario's.

Wanneer we de gepresenteerde ZSS-scenario's combineren met de schattingen betreffende bodemdaling en deze snelheden vergelijken met de kritische snelheden voor 'verdrinking' van de wadplaten die zijn berekend voor de individuele getjebekken, kunnen we het moment bepalen waarop het maximale geïmporteerde sedimentvolume niet langer de toename van de accommodatieruimte in een bekken kan compenseren en de wadplaten in oppervlakte en / of hoogte beginnen af te nemen. In het RCP2.6 scenario zullen de geprojecteerde snelheden van de relatieve ZSS lager blijven dan de kritische snelheid voor verdrinking van de zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee. Voor het RCP4.5-scenario wordt de kritische ZSS-snelheid voor het Vlie in 2030 overschreden en voor het RCP8.5-scenario wordt de kritische ZSS-snelheid overschreden voor Vlie in 2030, Marsdiep in 2050 en Amelanders Zeegat in 2100. Voor de andere bekkens wordt de kritische snelheid pas in 2100 of later overschreden.

De manier waarop de wadplaten in een bekken zullen reageren op 'verdrinking' is op dit moment niet duidelijk. Het is zeer wel mogelijk dat met de erosie van platen op één locatie sediment vrijkomt waarmee platen op andere locaties in stand worden gehouden. Wadplaten in de nabijheid van de zeegaten, waardoorheen sedimentimport plaatsvindt, zullen waarschijnlijk niet verdwijnen, omdat lokaal de balans tussen aanvoer en erosie waarschijnlijk niet zal veranderen.

Inleiding

Klimaatveranderingen gaan zeer waarschijnlijk tot wereldwijde versnelling van zeespiegelstijging (ZSS) leiden. De geprojecteerde versnelling van ZSS zal ook de Waddenzee beïnvloeden. Bovenop een versnelde ZSS, zal gas- en zoutwinning bodemdaling veroorzaken welke tot een extra toename van de waterdiepte in de getijbekkens leidt. Dit zal consequenties hebben voor de sedimentbalans van de Waddenzee, en vooral voor de wadplaten die een hoge ecologische waarde hebben. Daarom is inzicht nodig in de mogelijke veranderingen in de sedimentbalans van de Nederlandse Waddenzee en de factoren die hierop van invloed zijn.

Het doel van dit artikel is om een beknopt overzicht te geven van de stand van zaken in ons begrip van (1) de ontwikkeling van gemiddelde zeespiegelverandering langs de Waddenkust en verwachte veranderingen in de komende decennia, (2) de daling van de zeebodem veroorzaakt door winning van grondstoffen en (3) de toestand van het sediment-delende systeem van de getijbekkens in de Nederlandse Waddenzee. Deze informatie zal worden gecombineerd om de best mogelijke projectie van de toekomstige ontwikkelingen in dit gebied in te schatten.

Deze synthese vat de informatie samen betreffende toekomstprojecties van lokale zeespiegelstijging, bodemdaling en sedimenttransport, die in een speciale uitgave van het Netherlands Journal of Geosciences gepresenteerd wordt in respectievelijk Vermeersen e.a. (2018), Fokker e.a. (2018) en Wang e.a. (2018). De synthese combineert deze projecties om tot een inschatting van de toekomstige toestand van het Nederlandse deel van de Waddenzee te komen. Hierbij beperken we ons tot projecties van de toekomstige morfologische ontwikkeling met behulp van de ZSS-scenario's gepresenteerd in Vermeersen e.a. (2018), in combinatie met de prognoses voor bodemdaling veroorzaakt door gas- en zoutwinning voor de afzonderlijke velden in de Waddenzee in Fokker et al. (2018). Hiertoe wordt de toestand van de sedimentbalans voor de jaren 2030, 2050 en 2100 beschouwd, zoals gepresenteerd in Wang e.a. (2018). De projectie van de morfologische toestand van de individuele bekkens voor deze jaren zijn gebaseerd op bestaande systeemkennis en -inzicht.



Figuur 1. *Overzicht van de Nederlandse Waddenzee. De locaties van de getijstations Den Helder aan de westelijke en Delfzijl aan de oostelijke grens zijn aangegeven met sterretjes (bron satellietbeeld: www.waddensea-secretariat.org).*

Projecties van zeespiegelverandering voor de Waddenzee

Om zeespiegelveranderingen op een specifieke locatie zoals de Nederlandse kust en de Waddenzee te projecteren (Figuur 1), moeten we begrijpen wat de verandering van zeespiegel veroorzaakt, zowel op wereldschaal als op regionale en lokale schaal. Op wereldschaal zijn de belangrijkste drijfveren van de hedendaagse ZZS de thermische uitzetting (dat wil zeggen dat hogere temperaturen het zeewater doen uitzetten) en de uitwisseling van watermassa tussen landijs en de oceaan. Door de werking van processen op verschillende ruimte- en tijdschalen, kan de regionale of lokale verandering van de zeespiegel echter aanzienlijk afwijken van de gemiddelde verandering op wereldschaal.

Hier ligt de nadruk op projecties van de zeespiegel voor de Waddenzee in de loop van de 21e eeuw. De regionale zeespiegelprojecties gepubliceerd in het Vijfde beoordelingsrapport van de Intergouvernementele Werkgroep inzake klimaatverandering (IPCC AR5; Church et al., 2013) zijn als uitgangspunt voor deze projecties genomen. Deze IPCC projecties omvatten oceaensterische en dynamische veranderingen, veranderingen in de ijskap- en gletsjermassa's, grondwaterwinning, atmosferische drukverandering en glaciële isostatische aanpassing (GIA) en zijn afhankelijk van de concentratie van broeikasgassen in de atmosfeer. Vermeersen e.a. (2018) hebben drie scenario's in termen van Representative Concentration Pathways (RCP's), zoals gedefinieerd in IPCC AR5, beschouwd. Op basis van die resultaten hebben ze de invloed van recente ontwikkelingen op de regionale projecties voor de Waddenzee onderzocht. Hierbij evalueerden ze nieuwe schattingen van dynamische ijskapbijdragen van Antarctica aan de ZSS. Bovendien hebben ze verschillende GIA-schattingen bekeken en de invloed daarvan op de regionale zeespiegelprojecties geëvalueerd.

De geprojecteerde veranderingen zijn onderhevig aan lokale variaties tussen de jaren, wat betekent dat een spreiding rond de geprojecteerde veranderingen kan worden verwacht. Vermeersen e.a. hebben waarnemingen op getijstations Den Helder aan de westelijke grens en Delfzijl aan de oostelijke grens van de Nederlandse Waddenzee (zie Figuur 1) gebruikt om de lokale variabiliteit te schatten. Dit werd toegevoegd aan de geprojecteerde snelheden voor het Nederlandse deel van de Waddenzee.

Data en methoden

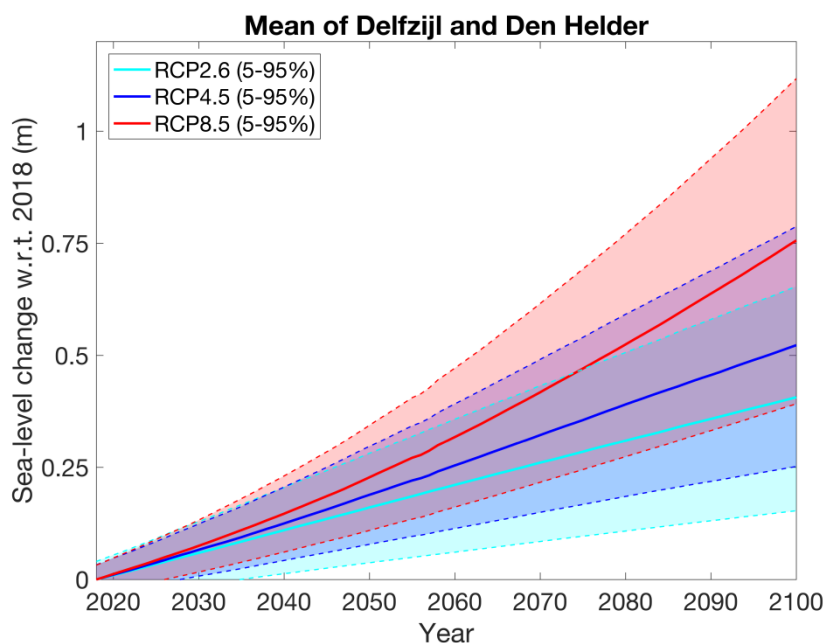
De regionale zeespiegelprojecties gepresenteerd in Vermeersen e.a. (2018) zijn gebaseerd op de geprojecteerde IPCC AR5-bijdragen aan zeespiegelveranderingen door ijskapveranderingen, massaverlies van gletsjers, berging van water op land en wereldwijde thermische expansie. De tijdreeksen voor veranderingen van ijskap-, gletsjer- en landwatermassa werden gebruikt om de 'vingerafdrukken' van de zeespiegel te berekenen, rekening houdend met de reacties van de geïde van de aarde (via zwaartekracht en rotatie-effecten) en de lithosfeer, om de bijbehorende regionale zeespiegelverandering te bepalen. De auteurs hebben ook een schatting opgenomen van de relatieve verandering van de zeespiegel ten gevolg van de verticale landbeweging en geïde veranderingen in verband met GIA uit het ICE-5G (VM2) -model. In de laatste stap om tot de regionale projecties te komen werd rekening gehouden met lokale veranderingen in de vorm van

het zeeoppervlak die kunnen ontstaan door lokale veranderingen in de circulatie en / of dichtheid ('oceanografisch' zeeniveau), zoals berekend door grootschalige klimaatmodellen.

Op regionale schaal vertonen Den Helder en Delfzijl (Figuur 1) vergelijkbare resultaten. Deze verschillen echter van de gemiddelde projecties op wereldschaal. De grotere onzekerheid in de regionale oceanografische bijdrage vertaalt zich in een grotere onzekerheid voor de uiteindelijke zeespiegelprojecties op beide stations. De geprojecteerde veranderingen in 2100 voor deze twee locaties liggen boven de gemiddelde projecties op wereldschaal (+0,04 m, +0,08 m en +0,11 m voor, respectievelijk, de scenario's RCP2.6, RCP4.5 en RCP8.5). Dit voornamelijk als gevolg van de bovengemiddelde dynamische oceaan- en GIA-bijdragen in de regionale projecties. De verwachte gemiddelde stijging van de gemiddelde zeespiegel in Den Helder en Delfzijl voor 2100 (ten opzichte van 2018) is respectievelijk 0,41 m, 0,52 m en 0,76 m voor de scenario's RCP2.6, RCP4.5 en RCP8.5 (Tabel 1) . Figuur 2 illustreert de projecties voor deze scenario's. Tabel 2 geeft de snelheden van ZSS voor 2030, 2050 en 2100 voor de drie RCP's.

Tabel 1. Verwachte zeespiegelstijging in de Nederlandse Waddenzee voor de jaren 2030, 2050 en 2100 t.o.v. 2018 voor de drie scenario's. De onzekerheidsmarges vertegenwoordigen de 5e tot 95e percentielwaarden. Uit Vermeersen e.a. (2018).

ZSS vanaf 2018	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
2030	0,06 ± 0,07 m	0,07 ± 0,06 m	0,08 ± 0,06 m
2050	0,16 ± 0,12 m	0,19 ± 0,11 m	0,23 ± 0,12 m
2100	0,41 ± 0,25 m	0,52 ± 0,27 m	0,76 ± 0,36 m



Figuur 2. Projecties van ZSS voor de Nederlandse Waddenzee (gemiddelde van stations Den Helder en Delfzijl) voor drie verschillende emissiescenario's over de periode 2018-2100. De onzekerheidsbanden geven de waarden van het 5e tot het 95e percentiel aan. Gebaseerd op gegevens van Vermeersen e.a. (2018).
Figuur met dank aan Aimée Slangen.

Variabiliteit rond geprojecteerde zeespiegelstijging

De hierboven besproken projecties zijn allemaal voor de lange termijn en houden geen rekening met lokale kleinschalige variabiliteit. Vermeersen e.a. (2018) combineerden de waargenomen variabiliteit bij het getijstation met de projecties om de lokale verschillen op kortere tijdschalen aan te geven. Ze gebruikten getijwaarnemingen voor de periode 1865-2015 om de lokale variabiliteit te schatten en gingen ervan uit dat de verdeling van de variabiliteit in de toekomst niet zal veranderen. De gemeten veranderingssnelheden bij de getijstations hebben een zeer brede spreiding. De variabiliteit neemt af als gemiddelden over langere perioden worden genomen.

Tabel 2. Toekomstige mediane snelheden van zeespiegelstijging (mm/jaar) volgens de drie scenario's, gemiddeld over de locaties Den Helder en Delfzijl. Uit Wang e.a. (2018), gebaseerd op gegevens van Vermeersen e.a. (2018).

Jaar	2030	2050	2100
RCP2.6	4,9	5,2	5,0
RCP4.5	5,8	6,3	6,6
RCP8.5	6,8	8,9	11,9

Tijdsafhankelijke bronnen van onzekerheid in de projecties

Er zijn verschillende bronnen van onzekerheid die de totale onzekerheid in de projecties bepalen (zie de discussie in Vermeersen e.a., 2018). Een belangrijke bron van onzekerheid in de zeespiegelprojecties op korte termijn is de interne klimaatvariabiliteit: natuurlijke fluctuaties in het klimaat. Dit omvat grootschalige fenomenen zoals de El Niño Southern Oscillation (ENSO) of de North Atlantic Oscillation (NAO), die een groot effect hebben op het klimaat en die zich voordoen op tijdschalen van jaren tot decennia. Deze fluctuaties kunnen vrij groot zijn, vooral op regionale schaal. Een tweede bron van onzekerheid in de projecties is de keuze van het emissiescenario, dat grotendeels gebaseerd is op de acties van de samenleving. In de eerste decennia van de 21e eeuw hebben de emissiescenario's nog geen erg groot effect op de geprojecteerde zeespiegelverandering, omdat de respons van de verschillende processen die bijdragen aan de zeespiegelverandering, wordt vertraagd (vergelijk de getallen in Tabel 1). Vanaf het midden van de 21e eeuw beginnen de projecties echter te divergeren als gevolg van de gevolgde scenario's en hebben ze daarom een groter effect op de geprojecteerde onzekerheden (zie Figuur 2). Een derde bron van onzekerheid is de keuze van het gebruikte klimaatmodel voor de projecties. Er is een aanzienlijke spreiding tussen modellen, wat te wijten is aan een aantal redenen, zoals verschillende modelopzet of verschillende schematisaties van processen binnen een cel in het rekenrooster.

Bodemdaling in de Nederlandse Waddenzee

Verticale beweging van het landoppervlak en de zeebodem wordt veroorzaakt door zowel natuurlijke processen als menselijke activiteiten. We vatten de processen relevant voor de Nederlandse Waddenzee hieronder samen.

Natuurlijke oorzaken van bodemdaling

Op een tijdschaal van duizenden jaren spelen compactie, tektoniek en isostasie een belangrijke rol. Wanneer we bewegingen van het aardoppervlak meten, meten we de gecombineerde effecten van deze processen.

Nederland bevindt zich in het zuidoosten van het Noordzeebekken en aan de monding van de grote rivieren, waar sediment zich sinds het begin van het Tertiair heeft afgezet. Het gewicht van de afgezette sedimenten veroorzaakt compactie van de onderliggende lagen. Postglaciale isostasie is de reactie van het aardoppervlak die wordt veroorzaakt door de vermindering van de belasting als gevolg van het smelten van landijs en gletsjers van Scandinavië en Schotland. Tektonische bewegingen zijn niet relevant in de Nederlandse Waddenzee. Hier wordt ervan uitgegaan dat een langzame, natuurlijke bodemdaling met verwachte snelheden van minder dan 1 mm/jaar tot op de dag van vandaag plaatsvindt. Meer informatie over natuurlijke bodemdalingsprocessen is te vinden in het artikel van Vermeersen e.a. (2018) over ZSS.

Menselijke oorzaken van bodemdaling

Ondergrondse activiteiten in de Nederlandse Waddenzee omvatten gas- en zoutwinning. Gaswinning betreft de onttrekking van aardgas uit gasreservoirs, waarbij de oorspronkelijke druk van het gas in de orde van grootte is van de hydrostatische druk van grondwater op de diepte van het gasreservoir. De productie van gas veroorzaakt een afname van de druk in het reservoir. Dit leidt tot een toename van de effectieve spanningen die de korrels in de matrixstructuur van het reservoirgesteente op elkaar uitoefenen. Verhoogde effectieve spanningen veroorzaken compactie van het reservoir.

De mechanische reactie van de ondergrondse formaties rond het reservoir plant de compactie van het reservoir naar het aardoppervlak voort en veroorzaakt bodemdaling. De grootte en omvang van deze daling hangen onder meer af van de diepte, de grootte en de vorm van het gasveld, de hoeveelheid geproduceerd gas en de bijbehorende drukafname, mogelijke drukafname in met het reservoir verbonden watervoerende lagen, de mechanische eigenschappen en geologische structuur van het reservoirgesteente, en de eigenschappen van de formaties boven, onder en naast het reservoir.

Mijnbouw via zoutoplossing is een technologie om zout te produceren uit diepe steenzoutlagen. Een put wordt in de steenzoutlagen geboord, vervolgens wordt zoet water in de put gepompt, waardoor zout wordt opgelost en een holte ontstaat die pekkel bevat. Deze pekkel wordt naar de oppervlakte gebracht, waar het zout wordt gescheiden. In de zoutholte wordt de pekkel op een druk gehouden

die lager is dan de lithostatische druk. Als resultaat van het drukverschil stroomt het elasto-visco-plastische zout naar de holte. Dit staat bekend als 'squeeze mining'. Na verloop van tijd, typisch twee tot drie jaar, ontwikkelt zich een dynamisch evenwicht tussen het vergroten van het volume van de holte ten gevolge van het oplossingsproces en de afname van het volume ten gevolge van convergentie door het kruipen van het zout. Volume en vorm van de holte blijven dan ongeveer constant. De convergentie van de holte induceert elastische vervorming van de lagen eromheen, hetgeen resulteert in een daling van het aardoppervlak. De vorm en grootte van de bodemdalingssom hangt af van het door convergentie verplaatste volume en de eigenschappen van de omringende lagen.

Metten van bodemdaling

Bodemdaling wordt gedefinieerd als een relatieve verandering van de topografische hoogte van het aardoppervlak in de loop van de tijd tussen twee locaties of punten. Er zijn verschillende technieken om hoogtes, (ruimtelijke) hoogteverschillen, hoogtewijzigingen in de tijd of veranderingen in ruimte en tijd in hoogteverschillen te meten. Deze technieken kunnen metingen verrichten vanuit de ruimte, vanuit de atmosfeer of op het aardoppervlak en hebben elk hun eigen kenmerken met betrekking tot de ruimtelijke dichtheid van metingen, ruimtelijke omvang, bemonsteringsfrequentie, meetperiode, geometrische gevoeligheid en nauwkeurigheid. Zie Fokker e.a. (2018) voor meer informatie. Global Navigation Satellite Systems (GNSS), zoals GPS, meten zelfs 3D-posities. In het geval van satellietradarinterferometrie (InSAR) worden de metingen verricht in de zichtlijn van de radar tussen de satelliet en het aardoppervlak. In de praktijk worden voor bodemdalingsanalyse doorgaans waterpassing, GNSS en / of InSAR-metingen gebruikt.

In de Nederlandse Waddenzee is een aantal specifieke benchmarks voor GNSS en waterpassing beschikbaar. De resulterende datasets zijn complementair, daarom is de integratie van de verschillende datasets wenselijk. Metingen op land moeten worden meegenomen om de kwaliteit van het resultaat te verbeteren.

Combineren van modellen en metingen

De beweging van het aardoppervlak vormt een meetbare aanwijzing voor de processen in het reservoir. Dergelijke metingen kunnen dus informatie over de ondergrond verschaffen. Er bestaan meestal grote onzekerheden over de parameters van de ondergrond. Inverse modellering of gegevensassimilatie waarbij gebruik gemaakt wordt van gegevens over bewegingen aan het aardoppervlak is vereist om kennis en parameters van de ondergrond te verbeteren.

Bodemdaling in de Nederlandse Waddenzee

Het doel van het artikel van Fokker e.a. (2018) is om de te verwachten bodemdalingssnelheid na 2018 te schatten. Een schatting moet altijd gepaard gaan met een kwaliteitsmaat: een standaardafwijking of een betrouwbaarheidsinterval van de verwachte getallen. Metingen dienen de voorspellingen te begrenzen. Om de invloed op de grootschalige ontwikkeling van de Waddenzee te beoordelen, moeten de bodemdalingsprognoses worden geformuleerd in termen van volumeveranderingssnelheden of gebieds-gemiddelde bodemdalingssnelheden in de verschillende getijbekkens. Tabel 3 geeft de verwachte bodemdaling voor Vlie, Pinkegat en Zoutkamperlaag.

Omdat het onbekend is of er na 2050 sprake zal zijn van winningsactiviteiten, worden schattingen voor bodemdaling in 2100 niet gegeven.

Tabel 3. Snelheden van bodemdaling in de getjebekken in de Nederlandse Waddenzee in 2030 en 2050 in mm/jaar, gebaseerd op Fokker e.a. (2018). Schattingen voor bodemdaling in 2100 worden niet gegeven omdat het niet bekend is of er na 2050 winningsactiviteiten zullen plaatsvinden. Uit Wang e.a. (2018).

Year	Texel	Eierland	Vlie	Ameland	Pinkegat	Zoutkamp
2030	-	-	1,0	-	1,6	0,9
2050	-	-	0,5	-	1,0	0,3

Ontwikkeling van de sedimentbalans van de Nederlandse Waddenzee tot 2100

Het sediment delende systeem van de Waddenzee

De Waddenzee is een sediment delend systeem dat bestaat uit Waddeneilanden die worden gescheiden door zeegaten met hun bijbehorende buitendelta's welke de achterliggende getjebekken met wadplaten en kwelders beschermen tegen open Noordzeecondities. Aangezien er geen rivieren in de Nederlandse Waddenzee uitmonden, zal het sediment uit de aangrenzende Noordzeekustzone aangevoerd moeten worden. De evolutie van een kustsysteem bij een stijgende zeespiegel hangt af van het evenwicht tussen het creëren van accommodatieruimte voor sediment, dat kan worden beschouwd als de vraag naar sediment, en de aanvoer van sediment om die ruimte te vullen. In een 'overschot'-situatie wordt de accommodatieruimte in de loop van de tijd opgevuld, en het kustsysteem zal uiteindelijk zeewaarts aangroeien, terwijl in een 'tekort'-situatie de toevoer van sediment niet voldoende is om de accommodatieruimte te vullen en de kustlijn landwaarts zal verplaatsen. Wanneer we dit principe toepassen op de Waddenzee, is de accommodatieruimte in de bekkens de 'vraag' en de sedimentaanvoer door de zeegaten is het 'aanbod'. De accommodatieruimte in een bekken neemt geleidelijk toe als gevolg van (1) een stijging van de gemiddelde zeespiegel en (2) regionale bodemdaling van de zeebodem. Beide componenten dragen bij tot een toename van de waterdiepte en kunnen worden meegenomen in relatieve zeespiegelstijging. Bovendien leidt lokale bodemdaling door gas- en zoutwinning tot additionele verhoging van de accommodatieruimte. Ten slotte kunnen abrupte veranderingen in een bekken worden veroorzaakt door menselijke ingrepen. De invoer van zand en slib in de Waddenzee draagt bij aan het opvullen van de accommodatieruimte. Het sediment wordt via de geulen het bekken in getransporteerd en belandt uiteindelijk op de wadplaten en kwelders.

Huidige toestand van de sedimentbalans van de Waddenzee

Analyse van de veranderingen van de topografische hoogte van de Waddenzeebodem in de periode 1935-2005 (Elias e.a., 2012; zie Figuren 2 en 4 in Wang e.a., 2018) toont aan dat de zeebodem in de bekkens sneller in hoogte toenam dan strikt noodzakelijk is voor de compensatie van de relatieve ZSS afgeleid uit waarnemingen bij de getijstations. Grootschalige ingrepen hadden in deze periode een sterke invloed op de Waddenzeebekkens. De sluiting van de Zuiderzee met de Afsluitdijk in 1932

had een grote invloed op de westelijke Waddenzee, terwijl de sluiting van de Lauwerszee in 1969 aanzienlijke veranderingen veroorzaakte in het bekken van de Zoutkamperlaag. De westelijke Waddenzee is relatief diep en bestond vroeger uit binnendelta's aan de zeewaartse kant van de Zuiderzee-lagune. De sluiting zorgde voor een toename van de getijdeslag in Marsdiep en Vlie, terwijl de getijdevolumes van deze zeegaten min of meer constant bleven. De aanleg van de Afsluitdijk sloot de getijdengeulen af die vroeger naar het zuiden de Zuiderzee in liepen, waardoor deze geulen zich met voornamelijk slib vulden. De sedimentbalans van de westelijke Waddenzee toont een tekort; de substantiële accommodatieruimte in de bekkens leidde tot een grootschalige import van sediment, vooral uit de buitendelta's van de zeegaten. Het sedimentvolume dat sinds 1932 is aangeleverd, heeft echter niet aan deze sedimentvraag kunnen voldoen. De netto jaarlijkse import van sedimenten heeft een bovengrens; blijkbaar is het systeem transportbeperkt. Het Zoutkamperlaag gebied reageerde snel op de sluiting van de Lauwerszee en bereikte binnen 25 jaar een nieuw evenwicht (Van de Kreeke, 2004). Ook veroorzaakte gaswinning in de bekkens van Pinkegat, Zoutkamperlaag en Groninger Wad geen merkbare daling van het wadoppervlak, ondanks de gemeten daling van de diepere lagen in de ondergrond; klaarblijkelijk is de toename van de accommodatieruimte voor sediment snel opgevuld. Dit kan worden verklaard uit grote bruto sedimenttransporten in het systeem die snel een toename van de accommodatieruimte kunnen opvullen: in dit gedeelte van de Waddenzee is het systeem accommodatie-gelimiteerd. Zie Wang e.a. (2018) voor meer informatie.

Effect van een toename in sediment accommodatieruimte

Versnelling van de ZSS en de voortdurende bodemdaling als gevolg van mijnactiviteiten in de komende decennia zullen de accommodatieruimte in de afzonderlijke getijbekkens vergroten. De huidige lange-termijngemiddelde waarde voor sedimentimport in de westelijke Waddenzee sinds de aanleg van de Afsluitdijk is onvoldoende geweest om de vraag in de bekkens in de westelijke Waddenzee te vullen. Een toekomstige toename van de relatieve ZSS zal deze situatie verergeren. Voor de oostelijke Waddenzee is de situatie anders. Hier kan aan een toename van de accommodatieruimte worden voldaan tot de maximale sedimenttransportcapaciteit door de zeegaten wordt bereikt. Vanaf dat moment zal de accommodatieruimte sneller groeien dan het aangevoerde volume aan sediment waardoor zich ook hier een tekort zal ontwikkelen.

Overschrijding van kritische snelheden van ZSS

Wanneer we de gepresenteerde ZSS-scenario's met de bodemdalingsschattingen verhogen, samen de relatieve ZSS genoemd, en deze snelheden vergelijken met de kritische snelheden die zijn berekend voor de individuele getijbekkens (zie Wang e.a., 2018), kunnen we het moment bepalen waarop de snelheid van relatieve ZSS de kritische snelheid overschrijdt. In dat geval kan het maximale geïmporteerde sedimentvolume niet langer de toename van de accommodatieruimte in een bekken compenseren en zullen de wadplaten beginnen af te nemen in oppervlakte en / of hoogte ('verdrinking'). Benadrukt moet worden dat overschrijding van de kritische snelheid in een bekken niet betekent dat alle wadplaten vervolgens instantaan permanent zijn overstroomd.

Volgens het RCP2.6-scenario stijgt de gemiddelde zeespiegel lineair met ca. 5 mm/jaar tot 2100 (Tabel 2). De extra bodemdaling veroorzaakt kleine verhogingen van relatieve ZSS voor sommige bekkens. Alle snelheidswaarden van relatieve ZSS liggen onder de kritische snelheid voor verdrinking van de zeegatsystemen in de Nederlandse Waddenzee (zie Tabel 4a). Volgens scenario RCP4.5 wordt de

kritische ZSS-snelheid in 2030 overschreden voor Vlie (Tabel 4b). Voor de andere bekkens wordt de kritische snelheid pas in 2100 of later overschreden. Volgens scenario RCP8.5 zal de kritische ZSS-snelheid worden overschreden voor Vlie (vanaf 2030), Marsdiep (vanaf 2050) en Amelander Zeegat (in 2100) (zie Tabel 4c). Voor de andere kleine getijbekkens zal de kritische snelheid pas na 2100 worden overschreden.

'Verdrinking' van de wadplaten

Een sedimenttekort zal leiden tot afname van oppervlak en gemiddelde hoogte van de wadplaten. Bijvoorbeeld, volgens scenario RCP4.5 zal de kritische snelheid in Vlie rond het jaar 2030 worden overschreden. De ZSS-snelheid zal dan net boven de kritische snelheid van 6,3 mm/jaar liggen. De waargenomen lange-termijn sedimentatiesnelheid in het bekken van Vlie is ongeveer 4,7 mm/jaar (zie Figuur 4 in Wang e.a., 2018). Als deze lange-termijn sedimentatiesnelheid gelijk blijft (ondanks de veranderende hydraulische omstandigheden), zal de ZSS-snelheid de sedimentatiesnelheid met ongeveer 2 mm/jaar tot 2100 overschrijden. Aangezien het getijverschil in het bekken bijna 2 m is, zal volledige verdrinking in ongeveer 1000 jaar worden bereikt. Evenzo zal volgens scenario RCP8.5 de ZSS de sedimentatiesnelheid van 4,7 mm/jaar met ongeveer 3 mm/jaar in 2030 overschrijden, met bijna 5 mm/jaar in 2050 en met 7,2 mm/jaar in 2100 (zie Tabel 2 voor ZSS snelheden). De volledige verdrinking zal dan over ongeveer drie eeuwen plaatsvinden. De conclusie is dus dat geen van de getijbekkens in de Nederlandse Waddenzee tegen 2100 verdronken is, zelfs als het meest pessimistische scenario van ZSS uitkomt. De verandering in verticale hoogte van de wadplaten kan echter niet direct worden vertaald in oppervlakteverlies, omdat de verdeling van het oppervlak over de hoogte niet lineair is (zie Figuur 11 in Wang e.a., 2018). Bovendien is de manier waarop de wadplaten in een bekken reageren op 'verdrinking' nu nog niet duidelijk. Het is zeer goed mogelijk dat door erosie van wadplaten op één plek sediment vrijkomt wat ten goede komt aan platen op andere locaties waardoor deze stabiel blijven of zelfs ophogen.

Wang e.a. (2018) evalueerden de toename van de waterdiepte door relatieve ZSS om een indicatie te krijgen van de effecten van de drie zeespiegel-scenario's op de morfologie van de wadplaten. Ze veronderstelden een sedimentatiesnelheid van 4,5 mm/jaar, wat min of meer de lange-termijngemiddelde snelheid is van waargenomen sedimentatie in het westelijke deel alsook in het oostelijke deel van de Nederlandse Waddenzee. Per definitie is de oppervlakte van het intergetijdengebied het verschil tussen het gebied bij HW en dat bij LW in de hypsometrische curve (zie Figuur 3c in Wang e.a., 2018). Het verlies van oppervlakte van wadplaten (intergetijdengebied) als gevolg van zeespiegelstijging wordt geschat door het verhogen van het LW met de waterdieptetoename. Volgens de relatie getoond in Figuur 11 in Wang e.a. (2018) zou de Nederlandse Waddenzee praktisch verdronken worden met een waterdieptetoename van meer dan 1 meter. Tabel 5 geeft het percentage verlies van oppervlak van wadplaten in de Nederlandse Waddenzee voor de geschatte waterdieptetoename voor de drie scenario's.

Tabel 4. Kritische snelheden van zeespiegelstijging R_c voor de verschillende getijbekkens in de Nederlandse Waddenzee zoals afgeleid met het ASMITA (Aggregated Scale Morphological Interaction between Tidal inlets and the Adjacent coast) model, snelheden van lokaal versnelde zeespiegelstijging voor de Nederlandse Wadden Zee (uit Tabel 2), extra relatieve zeespiegelstijging door bodemdaling (uit Tabel 3) en de totale relatieve zeespiegelstijging voor 2030, 2050 en 2100, voor verschillende emissiescenario's. Getallen in rode velden geven snelheden van relatieve zeespiegelstijging aan die de kritische snelheid per getijbekken overschrijden. Alle waarden zijn in mm/jaar.

a. RCP2.6	Marsdiep	Eierland	Vlie	Ameland	Pinkegat	Zoutkamp.
R_c	7,0	18,0	6,3	10,4	32,7	17,1
Totaal 2030	4,9	4,9	5,9	4,9	6,5	5,8
ZSS	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Bodemdaling	-	-	1,0	-	1,6	0,9
Totaal 2050	5,2	5,2	5,7	5,2	6,2	5,5
ZSS	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2	5,2
Bodemdaling	-	-	0,5	-	1,0	0,3
Totaal 2100	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
ZSS	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Bodemdaling	-	-	-	-	-	-

b. RCP4.5	Marsdiep	Eierland	Vlie	Ameland	Pinkegat	Zoutkamp.
R_c	7,0	18,0	6,3	10,4	32,7	17,1
Totaal 2030	5,8	5,8	6,8	5,8	7,4	6,7
ZSS	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Bodemdaling	-	-	1,0	-	1,6	0,9
Totaal 2050	6,3	6,3	6,8	6,3	7,3	6,6
ZSS	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Bodemdaling	-	-	0,5	-	1,0	0,3
Totaal 2100	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
ZSS	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6	6,6
Bodemdaling	-	-	-	-	-	-

c. RCP8.5	Texel	Eierland	Vlie	Ameland	Pinkegat	Zoutkamp.
R_c	7,0	18,0	6,3	10,4	32,7	17,1
Totaal 2030	6,8	6,8	7,8	6,8	8,4	7,7
ZSS	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8	6,8
Bodemdaling	-	-	1,0	-	1,6	0,9
Totaal 2050	8,9	8,9	9,4	8,9	9,9	9,2
ZSS	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9
Bodemdaling	-	-	0,5	-	1,0	0,3
Totaal 2100	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
ZSS	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
Bodemdaling	-	-	-	-	-	-

Hoe zal de toekomstige Waddenzee eruit zien?

De grote bandbreedte van geprojecteerde ZSS als gevolg van verschillende klimaatscenario's vormt de grootste bijdrage aan de onzekerheid over de toekomstige toestand van de Waddenzee. Voor de nabije toekomst, tot 2030, zal het effect van de versnelde ZSS beperkt zijn en nauwelijks merkbaar. Op de lange termijn, tot 2100, hangt de verwachte verandering grotendeels af van de klimaatscenario's (Tabel 4). In het RCP2.6 scenario zal er tot 2100 nauwelijks effect zijn als gevolg van ZSS, terwijl in het RCP8.5 scenario het effect al in 2050 merkbaar zal zijn. Vermeersen e.a. (2018) presenteerde ook andere, meer extreme scenario's, zoals het scenario volgens De Conto & Pollard (2016) dat een totale ZSS van ongeveer 1,7 m in 2100 voorspelt. Bij een dergelijk extreem scenario zal de Waddenzee verdrongen zijn vóór 2100.

Tabel 5. *Ontwikkeling van waterdieptetoename en het overeenkomstige percentage verlies van wadplaatareaal als gevolg van zeespiegelstijging volgens de drie scenario's. Uit Wang e.a. (2018).*

ZSS scenario Jaar	RCP2.6		RCP4.5		RCP8.5	
	Diepte-toename	verlies plaatareaal	Diepte-toename	verlies plaatareaal	Diepte-toename	verlies plaatareaal
2030	1 cm	1%	2 cm	2%	3 cm	3%
2050	2 cm	2%	5 cm	4%	9 cm	8%
2100	4 cm	3,5%	15 cm	13%	39 cm	38%

Het conceptuele model voor plaat-geul-interactie, dat werd gepresenteerd in het artikel van Wang e.a. (2018), kan helpen om te achterhalen wat de gevolgen zijn van een ontoereikend aanbod van sediment voor de wadplaten. De plaatrand is het meest dynamische deel, waar de brekende golven deze eroderen en de getijstroming sediment toevoert. Een structureel verminderde sedimenttoevoer zal resulteren in een netto erosie van deze randen omdat de golfactiviteit in het bekken niet direct door de veranderingen zal worden beïnvloed. Ook zullen de hogere delen van de platen erosie ervaren omdat slechts een deel van het zand verwijderd door golven zal worden vervangen. Het geërodeerde zand zal in de getijgeulen belanden en is in principe beschikbaar voor hersedimentatie op de platen. Waar het zand terecht zal komen, hangt af van de lokale hydrodynamische condities die van tevoren niet bekend zijn. Het is echter waarschijnlijk dat wadplaten dicht bij het zeegat het minst worden beïnvloed, omdat het netto sedimentaanbod van buiten het bekken daar doorheen zal gaan en het lokale evenwicht tussen aanvoer en erosie waarschijnlijk niet zal veranderen. Dit is in overeenstemming met het model voor Holocene getijbekkens onder invloed van hoge snelheid van ZSS die Van der Spek & Beets (1992) presenteerde: zandige intergetijdenplaten nabij het zeegat en langs de hoofdgeulen, die lijken op een binnendelta en een lagune verder landwaarts waar voornamelijk slib accumuleert. Of de laatste situatie zich in de toekomstige Waddenzee zal ontwikkelen, is niet duidelijk. Er is geen reden om aan te nemen dat toekomstige concentraties zwevende stoffen zullen afnemen, maar de accumulatie van fijnkorrelig materiaal hangt af van het lokale energieniveau. De huidige Waddenzee bestaat uit relatief weinig beschutte gebieden waar slib kan bezinken, omdat zulke gebieden in het verleden zijn ingepolderd. Dit resulteert in een grotere invloed van de overwegend westelijke winden op de hydraulische condities in de bekkens. Een toename van de gemiddelde diepte in de bekkens en de

uitbreiding van open water zal ze vatbaarder maken voor lokale golfgroei en wind-gedreven stromingen.

Dankwoorden

Dit onderzoek naar de toekomst van de Nederlandse Waddenzee is geïnitieerd door de Waddenacademie en het Programma naar een Rijke Waddenzee. Ik wil graag Hessel Speelman, Klaas Deen en Hein Sas bedanken voor hun enthousiaste steun voor dit werk. Het schrijven van deze synthese zou niet mogelijk zijn geweest zonder de prettige samenwerking met Bert Vermeersen, Aimée Slangen, Peter Fokker en Zheng Bing Wang, de hoofdauteurs van de artikelen over verandering van zeespiegel, bodemdaling en sedimentbalansen. Deze synthese profiteerde van de suggesties van zeven anonieme reviewers.

Literatuur

Church, J.A., Clark, P.U., Cazenave, A., Gregory, J.M., Jevrejeva, S., Levermann, A., Merrifield, M.A., Milne, G.A., Nerem, R.S., Nunn, P.D., Payne, A.J., Pfeffer, W.T., Stammer, D. & Unnikrishnan, A.S., 2013. Sea Level Change. *In*: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P.M. (eds.): Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press (Cambridge).

De Conto, R. & Pollard, D., 2016. Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature* 531: 591-597.

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 / Geologie en Mijnbouw* 91: 293-310.

Fokker, P.A., Van Leijen, F., Orlic, B., Van der Marel, H. & Hanssen, R., 2018. Subsidence in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw*.

Van de Kreeke, J., 2004. Equilibrium and cross-sectional stability of tidal inlets: application to the Frisian Inlet before and after basin reduction. *Coastal Engineering* 51: 337-350.

Van der Spek, A.J.F. & Beets, D.J., 1992. Mid-Holocene evolution of a tidal basin in the western Netherlands: a model for future changes in the northern Netherlands under conditions of accelerated sea-level rise? *Sedimentary Geology* 80: 185-197.

Vermeersen, L.L.A., Slangen, A.B.A., Gerkema, T., Baart, F., Cohen, K.M., Dangendorf, S., Duran-Matute, M., Frederikse, T., Grinsted, A., Hijma, M.P., Jevrejeva, S., Kiden, P., Kleinherenbrink, M., Meijles, E.W., Palmer, M.D., Rietbroek, R., Riva, R.E.M., Schulz, E., Slobbe, D.C., Simpson, M.J.R., Sterlini, P., Stocchi, P., Van de Wal, R.S.W. & Van der Wegen, M., 2018. Sea-level change in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences / Geologie en Mijnbouw*.

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 / Geologie en Mijnbouw*.