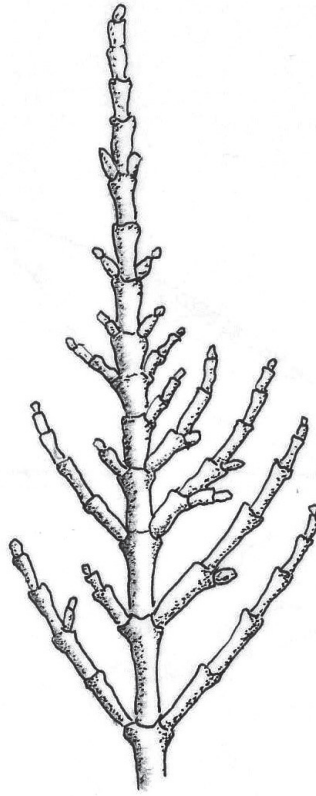




Hoofdstuk 4

Klimaatverandering en kwelders: verdrinken of verjongen?

Lotte Vader
Loek Kuiters

DE VERWACHTE TEMPERAATUURSTIJGING EN DAARMEE SAMENHANGENDE VERSNEL-
LING VAN DE ZEESPIEGELSTIJGING KAN ERNSTIGE GEVOLGEN HEBBEN VOOR DE RAN-
DEN VAN ZEEËN EN OCEANEN, HET KUSTMILIEU. KWELDERS VORMEN EEN VAN DE
MEEST KWETSBARE ECOSYSTEMEN IN DEZE KUSTGEBIEDEN. DE BEGROEIINGEN, MET
ZOUTMINNENDE PLANTEN, BEVINDEN ZICH OP DE OVERGANG TUSSEN LAND EN ZEE,
IN HET GEBIED DAT REGELMATIG OVERSTROOMD WORDT DOOR ZEEWATER.



Er zijn meer en meer aanwijzingen dat als de snelheid van de zeespiegelstijging toeneemt, de kwelder zich ook sneller ophooft. Dit heeft te maken met terugkoppelingsmechanismen, waarbij de kweldervegetatie een cruciale rol speelt. In dit hoofdstuk worden deze veerkracht van kwelders belicht op drie schaalniveaus: wereldwijd, nationaal in het Waddengebied en lokaal op Ameland. We stellen ons telkens de vraag of de kwelders bestand zijn tegen de ingrijpende gevolgen van klimaatverandering.

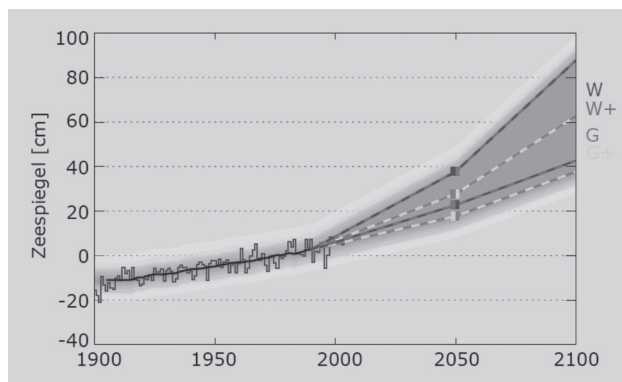
4.1 Klimaatverandering en zeespiegelstijging

Wereldwijd wordt veel onderzoek gedaan naar de verwachte temperatuurstoename als gevolg van klimaatverandering. Er zijn verschillende scenario's opgesteld, elk met zwakke en sterke punten. Over één ding bestaat overeenstemming: de temperatuur op aarde zal blijven toenemen.¹ Een gevolg hiervan is de stijging van de zeespiegel door het uitzetten van de oceanen en het smelten van gletsjers en ijskappen. Hierdoor verandert het zoutgehalte van het zeewater en daarmee het relatieve gewicht van het smeltwater, waardoor het niet gelijkelijk verdeeld wordt over de oceanen.² Om een indicatie te geven van de toekomstige zeespiegelstijging heeft het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) drie verschillende scenario's opgesteld: een minimumscenario met de huidige stijging van 20 cm per eeuw, een midden-scenario van 60 cm per eeuw en een maximumscenario van 85 cm per eeuw (Afbeelding 4.1).³ De klimaatscenario's van het KNMI zijn een vertaling van de scenario's van het IPCC naar Nederland.⁴

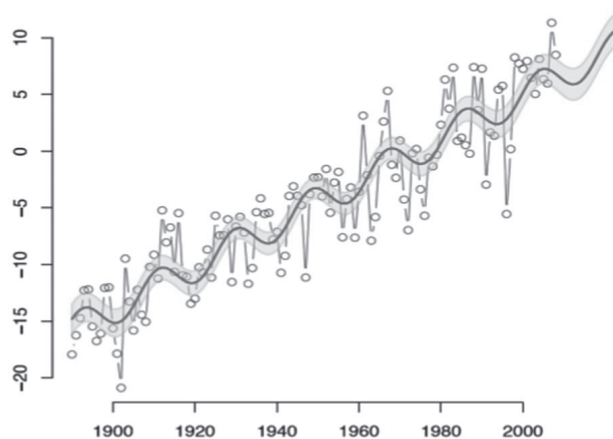
In 2016 is een onderzoek gepubliceerd waaruit blijkt dat de zeespiegelstijging na 1993 wereldwijd is toegenomen met 3,0 mm per jaar in plaats van de 1,4 mm per jaar die daarvoor gold.⁵ Ook analyses van satellietbeelden duiden op een waarde tussen $2,6 \pm 0,4$ mm en $2,9 \pm 0,4$ mm per jaar.⁶ Echter, voor Nederland is een dergelijke versnelling van de zeespiegelstijging nog niet geconstateerd.⁷ Naast een stijgende zeespiegel worden er ook veranderingen in de stormfrequentie verwacht. Met de opwarming van de oceanen is er de laatste jaren wereldwijd een lichte stijging van het aantal stormen te zien. Er zijn evenwel grote onzekerheden over de toekomstige veranderingen hierin.⁸

Wat opvalt, is dat er veel variatie is in de gemeten gemiddelde zeespiegel. Een deel hiervan kan worden toegeschreven aan de zogenaamde knopencyclus. Bijna alle metingen

-
- 1 Klein Tank et al. 2014.
 - 2 Rahmstorf 2007.
 - 3 Intergovernmental Panel on Climate Change 2014.
 - 4 Klein Tank et al. 2014.
 - 5 Klein Tank et al. 2014.
 - 6 Watson et al. 2015.
 - 7 Dillingh et al. 2012; Woodworth 1990.
 - 8 Klein Tank et al. 2014.



Afbeelding 4.1 Scenario's voor zeespiegelstijging tot 2100 van het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) onder gematigde (G, stippellijn) en grote temperatuurstijging (W, doorgetrokken lijn), beide met een marge voor verhoogde luchtdruk (bovenste grens) en zonder verhoogde luchtdruk (onderste grens) (Intergovernmental Panel on Climate Change 2014).



Afbeelding 4.2 De knopencyclus in een tijdreeks vanaf 1890 van jaargemiddelde waterstand van zes meetstations in ons land. Op de verticale as staat het gemiddelde zeeniveau langs de kust (in cm NAP). De lichte band geeft het 95% betrouwbaarheidsinterval van de (donkere) regressielijn.

van de zeespiegel passen precies binnen een sinusoidie die 18,6 jaar duurt (Afbeelding 4.2). Dit komt doordat de banen van zon en maan, die beide een grote aantrekkingskracht op het zeewater uitoefenen, niet gelijklopen. De baan van de maan rond de aarde wijkt vijf graden af van de baan van de aarde rond de zon. Op twee punten, de zogenaamde knopen, snijden deze banen elkaar en staan de zon en de maan in elkaars verlengde. Op deze punten oefenen beide hemellichamen een gezamenlijke kracht uit op het zeewater en staat de zeespiegel hoger dan in het midden van de knopen. De af-



wijking van de gemiddelde zeespiegel is maximaal 30 millimeter stijging op een knoop en maximaal 22 millimeter daling tussen knopen.⁹ Als de knopencyclus wordt doorgetrokken naar 2016, is te zien dat de banen zich momenteel rond een knoop bevinden, wat betekent dat we in een 'piekjaar' zitten (Afbeelding 4.2). De komende jaren (2015-2024) is een periode met afnemende zeespiegel. De knopencyclus vormt echter niet de oorzaak voor het uitblijven van de verwachte versnelling. De vraag wat hier dan wel de oorzaak voor is, blijft vooralsnog onbeantwoord.

Naast de absolute stijging van de zeespiegel hebben ook de daling van het land en de zeebodem een effect op de relatieve zeespiegelstijging. Deze daling wordt vooral veroorzaakt door isostasie: het drijven van de aardkorst op de onderliggende aardmantel.¹⁰ Tijdens de laatste ijstijd lag er een dik pakket landijs op het noordelijke deel van de aardplaat, waarop Nederland zich bevindt. Onder invloed van deze ijsmassa zakte de plaat in het noorden iets verder in de aardmantel en kwam het zuidelijke deel, met onder andere Nederland, omhoog. Na het smelten van het ijs begon de plaat terug te kantelen, en dit proces is nog steeds gaande. Daardoor daalt het noord- en zuidwesten van Nederland nog steeds met 0,1 tot 0,3 millimeter per jaar.¹¹ Dit gebeurt dus vooral in Laag-Nederland, waardoor de absolute zeespiegelstijging daar het grootst is.

4.2 Wereldwijde scenario's voor kwelders

Wereldwijd komen kwelders voor op alle continenten (Afbeelding 4.3).¹² Modellen van het IPCC, gebaseerd op het midden- en maximumscenario van zeespiegelstijging, voorspellen een wereldwijd verlies van het kwelderareaal in 2100 van 20-45%.¹³ Het huidige verlies is vastgesteld op 1-2% per jaar.¹⁴ Dit maakt de kwelders tot een van de snelst afnemende ecosystemen op aarde.¹⁵ Andere modellen voorspellen dat één meter zee-

9 Royer 1993; Yasuda et al. 2006; Haigh et al. 2011; Baart et al. 2012.

10 Peltier et al. 1978.

11 Kooi et al. 1998.

12 Doody 2008; McOwen et al. 2017. In totaal is 54.950 km² aan kwelders in kaart gebracht, maar het totale areaal is onbekend. In de gematigde zone zijn de golfenergie, het getijderegime en de substraatcondities vaak gunstig voor de ontwikkeling van kwelders, zodat daar het merendeel wordt aangetroffen. Lokaal wordt het voorkomen van kwelders bepaald door het bodemtype, de aanvoer van sediment en erosie. In de tropen en subtropen komen in kustmilieus in plaats van kwelders vaak mangroven voor.

13 Intergovernmental Panel on Climate Change 2007.

14 Bridgham et al. 2013.

15 Weis & Butler 2009.



Abbeelding 4.3 Wereldwijde verspreiding van kwelders, gemarkeerd als een donkere kustlijn
(Uit: Weis & Butler 2009).

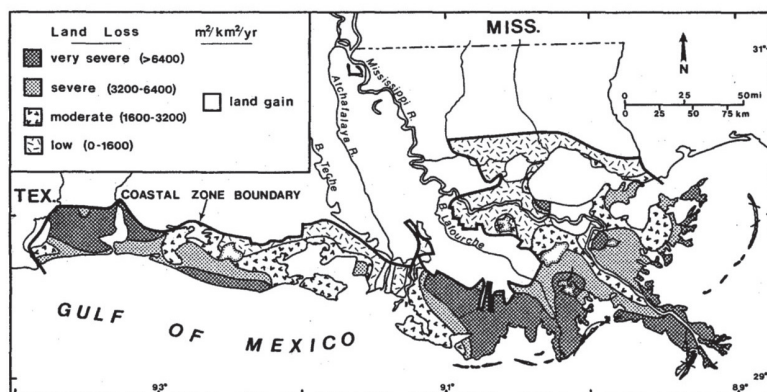
spiegelstijging zal leiden tot 46% verlies aan kwelderareaal wereldwijd.¹⁶ In Louisiana bijvoorbeeld is het verlies aan kwelderareaal gestegen tot catastrofaal hoge snelheden (Abbeelding 4.4). Met het verdwijnen van kwelderareaal, zullen ook de ecosystemendiensten van de kwelders verloren gaan.¹⁷

De vraag kan gesteld of de IPCC-scenario's, die een aanzienlijk verlies van kwelderareaal voorspellen, juist zijn. Recent onderzoek laat zien dat kweldersystemen veel veerkrachtiger zijn dan eerder werd aangenomen. Zo zou het totale kwelderareaal van de Atlantische en Pacifische kwelders rond de Verenigde staten tussen 2004 en 2009 gelijk

¹⁶ Nicholls et al. 1999.

¹⁷ De kwelder is een van de hoogst productieve ecosystemen op aarde (Kennish 2001), doordat hier continue nutriëntrijk sediment wordt aangevoerd. Kwelders zijn daardoor van groot economisch belang voor bevolkingsgroepen die aan de kust leven. Ze bieden voor meer dan de helft van de commerciële vissoorten beschutting en voeding. Dankzij de grote verscheidenheid aan vissoorten en ongewervelden gebruiken veel migrerende kustvogels kwelders als tussenstop om aan te sterken tijdens hun trek. Andere vogels overwinteren of overzomereren hier (Weis & Butler 2009). De kwelder speelt dus een sleutelrol in veel rivier- en kustvoedselwebben. Een ander belang is het opslaan van koolstof. De koolstof die ingevangen wordt door de kwelderplanten wordt verplaatst van de korte koolstofcyclus (10 tot 100 jaar) naar de lange koolstofcyclus (meer dan 1.000 jaar), doordat organisch materiaal begraven wordt in het sediment (Mitsch & Gosselink 2008; Mayor & Hicks 2009). Kwelders slaan gemiddeld tien keer zoveel koolstof op dan veengronden (Weis & Butler 2009; Chmura et al. 2003). Op deze manier spelen kwelders een grote rol in het tegengaan van het broeikaseffect en sinds kort worden deze functie meegenomen in de globale koolstofmarkt als *blue carbon* (McLeod et al. 2011). Kwelders hebben daarnaast een belangrijk functie in de kustbescherming door erosie en overstromingen tegen te gaan en de impact van stormen af te zwakken (Costanza et al. 2008; Gedan et al. 2011).





Afbeelding 4.4 Landveranderingen in het kustgebied van Louisiana in de periode 1955-1978. Tot honderd jaar terug breidde de kwelder nog uit door landaanwas (Frazier 1967). Doordat de hoofdstroom van de Mississippi zich steeds verlegde, werden telkens andere gebieden overstroomd met sediment en opgehoogd. Hierdoor ontstonden uitgestrekte kwelders in de delta met een netto aangroei van circa 3 km²/jaar (Coleman & Gagliano 1964). Ongeveer honderd jaar geleden sloeg dit om; steeds meer kweldergebieden in de delta verdronken en nu is het landverlies vastgesteld op 150 km²/jaar (Templett & Meyer-Arendt 1988). Het absolute verlies staat nu op 0,5 miljoen hectare en de snelheid van verdrinking lijkt nog niet te minderen.

zijn gebleven.¹⁸ Andere onderzoeken suggereren dat kwelders wereldwijd een hogere aanwas- en opslibbingssnelheid hebben dan eerder werd aangenomen. Recente modellen voorspellen dat veel kwelders zelfs bij aanzienlijke zeespiegelstijgingsscenario's overleven.¹⁹

Om na te gaan of kwelders veerkrachtig genoeg zijn om de gevolgen van zeespiegelstijging te kunnen opvangen moeten we eerst begrijpen hoe een kwelder is opgebouwd en welke dynamische processen een rol spelen.

4.3 Kwelders als dynamisch systeem

KWELDERONTWIKKELING

Een kwelder kan worden ingedeeld in zones, te weten de lage, midden- en hoge kwelder. Elke zone heeft een bepaalde mate en frequentie van overstroming met zeewater en daarmee samenhangend heeft elke zone een eigen karakteristieke vegetatie. Zo wordt de vegetatie op de lage kwelder in ons land gedomineerd door soorten uit het verbond *Puccinellion maritimae*, waaronder Gewoon kweldergras (*Puccinellia maritima*),

¹⁸ Morgan et al. 2009.

¹⁹ Cahoon 2006; Kirwan et al. 2010.

Lamsoor (*Limonium vulgare*), Gewone zoutmelde (*Atriplex portulacoides*) en Zulte (*Aster tripolium*). Op de middenkwelder groeien soorten van het verbond *Armerion maritimae*, zoals Rood zwenkgras (*Festuca rubra*), Zilte rus (*Juncus gerardii*), Zee-alsem (*Artemisia maritima*) en Zeekweek (*Elytrigia atherica*).²⁰ De hoge kwelder vertoont overgangen naar duinen (verbond *Saginion maritimae*) of duinvaleien (verbond *Lolio-Potentillion anserinae*). Beneden deze zones bevindt zich nog een pionierzone met een open begroeiing van Zeekraal (*Salicornia*) en Slijkgras (*Spartina*).

De gradiënt in overstromingsfrequentie en -duur is niet alleen afhankelijk van de afstand tot de zee, maar wordt mede bepaald door het ruimtelijke patroon van kreken en oeverwallen.²¹ De kreken voeren sediment aan als zij volstromen en spelen een rol bij de afwatering van de kwelder. Als een kreek overstroomt, wordt de stroomsnelheid van het water verminderd doordat het zich over een groter oppervlak verspreid. Dichtbij de kreek is de stroomsnelheid nog hoog en worden vooral de grote, zware zandkorrels afgezet. Verder van de kreek wordt het wateroppervlak groter en neemt daarmee neemt de stroomsnelheid af. Hier worden vooral de lichtere kleideeltjes afgezet. De kleinere kleideeltjes klinken meer in dan het zand, en hierdoor ontstaat aan de rand van de kreek een zandige oeverwal en verder van de kreek een lagere, kleiige kom. Als het getijverschil groot is, zijn de kreken dieper en de oeverwallen hoger door de grotere kracht en frequentie van overstromingen. Daarnaast wordt de vorm en dichtheid van het krekensysteem sterk beïnvloed door het bodemtype van de kwelder, de stroomsnelheden, de ouderdom van de kwelder en – zoals al genoemd – de afstand tot de zee.²² De kreken kunnen zich door de tijd verplaatsen onder invloed van laterale erosie en sedimentatie.

Door de tijd heen vindt er een ontwikkeling plaats in de verschillende zones van de kwelder, je zou kunnen zeggen dat de kwelder ouder wordt. De kwelder begint als getijdevlakte die bij hoog tij onder water staat en bij laag tij droogvalt. Als de getijdevlakte door opslibbing van sediment ophooft, ontstaat een pioniervegetatie, waar zich al snel Gewoon kweldergras bijvoegt. Deze soort vangt veel sediment in en hierdoor gaat de ophoging van de lage kwelder een stuk sneller.²³ In dit stadium (*Puccinellion maritimae*) wordt het water door de vegetatie geconcentreerd in een stroombaan op plaatsen waar laagten aanwezig zijn of waar vroegere doorbraken van de zee hebben plaatsgevonden, en ontstaan kreken.²⁴ Een verdere vegetatieontwikkeling naar een vegetatie van het *Armerion maritimae* versterkt dit proces en zorgt voor meer opslibbing door het invangen van sediment. Als de kwelder veroudert neemt de nutriëntenrijkdom toe, doordat een dikkere kleilaag wordt gevormd, en neemt Zeekweek langzamerhand de vegetatie

²⁰ Bakker 2014.

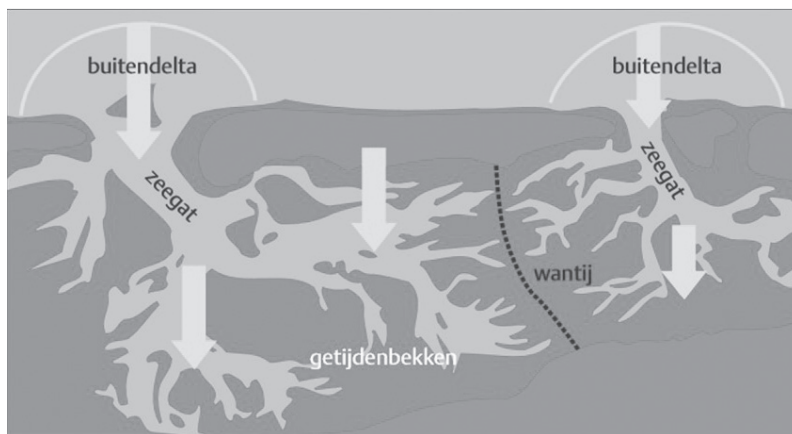
²¹ Esselink 2000; Van Duin et al. 1997.

²² Verhoeven 1983; Adam 1990.

²³ Andresen et al. 1990; Dijkema et al. 2001.

²⁴ French & Stoddart 1992; Reents 1995.





Afbeelding 4.5 Opbouw van het sedimentsysteem van de Waddenzee bij Ameland. Aangegeven zijn de buitendelta's, het kombergingsgebied (getijdenbekken) en het wantij (Uit: Löffler et al. 2008).

van de middenkwelder over. De kwelder verandert daardoor geleidelijk in een soorten-arm ecosysteem.²⁵ Deze ontwikkeling van een getijdenvlakte naar een begroeide, hoge kwelder gaat vooral één kant op.²⁶ De energie van de wind is meestal te beperkt om de vegetatie terug te zetten. De successie kan wel worden vertraagd door middel van begrazing. Bij extreme gebeurtenissen, zoals overstromingen en stormvloed, vindt soms wel regressie van de vegetatie plaats, doordat delen van de kwelder door golfwerking worden weggeslagen of eroderen.²⁷

SEDIMENTSISTEEM WADDENGEBIED

Om een samenhangend beeld te krijgen van de mogelijkheden voor kwelders om zich te ontwikkelen en mee te groeien met versnelde zeespiegelstijging is het belangrijk om op een grotere ruimtelijke schaal te kijken en de processen in het gehele sedimentatiesysteem erbij te betrekken. Hier wordt het systeem van het Waddengebied als voorbeeld genomen.

Sediment uit het binnenland wordt door de rivieren vervoerd en vanuit de Rijn- en Maasmonding met de zuid-noord gerichte stroming langs de Hollandse kust getransporteerd naar de Waddenzee. Vanuit de buitendelta²⁸ (Afbeelding 4.5) wordt het se-

25 Van Wijnen & Bakker 1997; Olff et al. 1997; Bakker et al. 2003.

26 Leendertse et al. 1997.

27 Schwimmer & Pizzuto 2000; Ganju et al. 2013.

28 Aan de Noordzeekant van een zeegat bevindt zich een zandige ondiepte, de buitendelta of ebgetijdendelta. Deze strekt zich uit tot de 20 meter dieptelijn, die ongeveer 10 kilometer uit de kust ligt.

diment vervolgens door de wind en de getijdestroming verder vervoerd naar het kombergingsgebied.²⁹ Op de route naar het kombergingsgebied wordt de getijdégolf vervormd als deze het zeegat inkomt. De vervorming zorgt voor een korte, sterke vloed en een langere, zwakkere eb. Deze karakteristieken van het getijde zorgen voor veel import van fijn sediment.

De hoeveelheid en samenstelling van het sediment dat uiteindelijk door het kombergingsgebied wordt ingevangen, wordt bepaald door de fysische en biologische eigenschappen hiervan. Indien de randen van het kombergingsgebied flauw zijn, het gebied onder de gemiddelde zeespiegel ligt en vaak sprake is van rustig weer, wordt er meer fijn sediment ingevangen dan bij steile randen en een ligging boven de gemiddelde zeespiegel. Er wordt meer grof sediment ingevangen als het gebied relatief kleine getijdenvlakten heeft en er vaker stormen plaatsvinden. Bovendien zorgt een grotere productiviteit van de vegetatie in een gebied voor een grovere bedding en een grotere stabiliteit, waardoor meer sediment wordt ingevangen en minder erosie plaatsvindt.

Op de route van de buitendelta naar het kombergingsgebied doet zich nog een ander fenomeen voor, het wantij. Zowel van de westkant als van de oostkant van een Waddeneiland komt de getijdestroom de zeegaten binnen bij vloed (Afbeelding 4.5). Op de plaats waar deze getijdestromen elkaar raken is de stroomsnelheid zo laag dat grote hoeveelheden slib tot bezinking komen. De vloedstroom langs de Nederlandse kust gaat van west naar oost. De getijdestroom aan de westkant van het eiland komt zodoende eerder het zeegat binnen en de plaats waar de stromen elkaar raken ligt dus verschoven naar de oostkant. In de Waddenzee ligt het wantij daarom niet direct ten zuiden van de eilanden, maar is het iets naar het oosten verschoven (Afbeelding 4.5). Het wantij is herkenbaar als een ondiepe plaats die soms droogvalt tijdens eb.

De stijgende zeespiegel heeft de balans echter verstoord en zorgt voor zandhonger in de Waddenzee. Er is een grotere aanvoer van sediment naar kwelders nodig om de stijging bij te houden. Maar de stijgende zeespiegel is niet de enige oorzaak van deze zandhonger: diverse menselijke ingrepen in het sedimentsysteem hebben ervoor gezorgd dat per jaar vier miljoen m³ zand moet worden aangevoerd naar de Waddenzee.³⁰ Door de afsluitingen van de Zuiderzee in 1932 en de Lauwerszee in 1969 en door inpolderingen is het kombergingsgebied verkleind en veranderden de evenwichten tussen de buitendelta's en de geulen. De buitendelta's krimpen en de geulen worden geleidelijk opgevuld. Een aanvullende oorzaak van de vergrote zandhonger is de gaswinning bij Ameland. Er worden zandsuppleties op het strand en de vooroevers uitgevoerd om de tekorten aan sediment aan te vullen.

²⁹ Bakker 2014.

³⁰ Wintermans 2012.



SEDIMENTATIE OP KWELDERS

In het kombergingsgebied wordt het sediment door overstroming verdeeld over getijdeplaten en kwelders. De hoeveelheid sediment die voor opslibbing van de kwelder zorgt, is afhankelijk van verschillende factoren. Eén hiervan betreft de frequentie en duur van de overstromingen. Hoe vaker en langer de kwelder overstroomt, des te meer sediment kan worden afgezet. Daarnaast is de concentratie van gesuspendeerd sediment een belangrijke variabele.³¹ Hoe meer gesuspendeerd sediment in het water aanwezig is, hoe groter de potentiële aanwas van kwelders is. Deze concentratie is afhankelijk van de kracht die wordt uitgeoefend op het sediment, ook wel *shear stress* genoemd. Als deze kracht onder een kritische waarde blijft, vindt transport en/of suspensie van sediment plaats. De erosiegevoeligheid van het sediment en de getijden, wind en golven bepalen samen de kritische *shear stress*, het punt waarop in het kombergingsgebied erosie plaatsvindt. Ook de begroeiing van de kwelders draagt bij aan sedimentatie.

De getijderange en de stormactiviteit hebben een groot effect op de hoeveelheid water met sediment dat de kwelders bereikt. Als de getijderange groter is, wordt een groter oppervlak van de kwelders overstroomd en wordt meer sediment aangevoerd. In Afbeelding 4.6 is te zien dat de mogelijkheid van kwelders om te ontsnappen aan versnelde zeespiegelstijging sterk afhankelijk is van de getijderange en de hoeveelheid gesuspendeerd sediment in het water. Stormactiviteit zorgt net als een grote getijderange voor een groter gebied dat wordt overstroomd en daarmee sediment krijgt aangevoerd. Vooral zwakke stormen zijn een grote leverancier van sediment voor kwelders. Hoge kwelders met een kleine getijderange zijn in grote mate afhankelijk van zware stormvloed voor hun opwas.

4.4 Veerkracht van kwelders

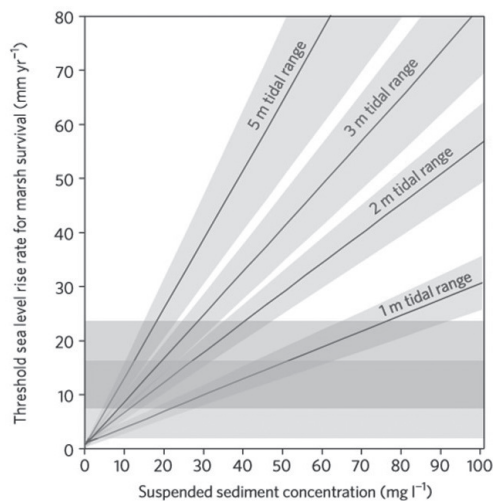
Nu we beter inzicht hebben in het sedimentsysteem, gaan we na wat de mogelijkheden zijn voor kwelders om de versnelde zeespiegelstijging bij te houden.

VERTICALE OPWAS

Kwelders houden de zeespiegelstijging bij indien voldoende opslibbing plaatsvindt.³² Hierbij zijn twee typen opslibbing mogelijk; allochtone en autochtone. Allochtone opslibbing of opwas vindt plaats door aanvoer van sediment uit het kombergingsgebied. Autochtone opwas vindt plaats op de kwelder zelf door accumulatie van bovengrondse en ondergrondse biomassa en de groei van cyanobacteriën en algen. De totale opwas bepaalt de ophoging van de kwelder. Deze wordt echter verminderd door autocompac-

³¹ Nolte et al. 2013.

³² Reed 1995.



Afbeelding 4.6 Kantelpunten van zeespiegelstijging waarbij kwelders niet blijven bestaan, berekend op basis van modellen voor vier verschillende getijdenverschillen (Kirwan et al. 2016). Elke schuine lijn representeert een kantelpunt als functie van de concentratie van in het water gesuspendeerd sediment (x-as) en het getijdeverschil. Een zeespiegelstijging (y-as) boven de schuine lijn kan niet worden gecompenseerd met terugkoppelingsmechanismen. De grijze banden rondom de lijnen zijn onzekerheidsintervallen. De voorspelde wereldwijde zeespiegelstijging in 2100 is weergegeven in lichtgrijze, horizontale banden, volgens twee scenario's die in het midden overlappen (donkere band). Als voorbeeld: een kwelder met 5 m getijdeverschil en 30 mg/l sedimentconcentratie kan maximaal 35 tot 40 mm/jaar zeespiegelstijging overleven. Een kwelder met 1 m getijdeverschil en eenzelfde concentratie sediment kan maximaal ongeveer 10 mm/jaar stijging overleven.

tie,³³ plaattektoniek (isotatie) en menselijke invloeden (bijv. gaswinning).

Bij een veranderend klimaat en een stijgende zeespiegel vinden echter ook veranderingen plaats in de snelheden van verticale opwas door zogenaamde *ecogeomorfologische feedbacks*. Dit zijn terugkoppelingsmechanismen die ertoe leiden dat de verticale opwas vergroot wordt. Hierdoor vertonen kwelders andere opwassnelheden dan de historische snelheden bij een lagere zeespiegelstijging en een ander klimaat. Een hogere zeespiegel leidt tot frequentere en langdurigere overstromingen van kwelders, en dit zorgt voor meer sedimentatie. Een verwachte verhoging van het aantal kuststormen in sommige gebieden zorgt bovendien voor een grotere sedimenttoevoer (vooral in relatief

33 Autocompactie vindt plaats wanneer het sediment in de onderste lagen wordt samengedrukt onder het gewicht van bovenliggende lagen. De korrels komen dichter bij elkaar te liggen en de lagen verliezen vocht (Bartholdy et al. 2010).



sedimentarme systemen) en maakt de verplaatsing van sediment naar hoger gelegen delen van kwelders eenvoudiger. Ook een eventuele uitbreiding van het netwerk van krekken op kwelders, onder invloed van een hogere zeespiegel, zorgt voor een grotere toevoer naar de delen van de kwelder waar voorheen weinig sediment werd afgezet.³⁴

Een andere belangrijke *feedback* is gerelateerd aan de vegetatie op de kwelder. Een grotere frequentie van overstromingen (tot een bepaald kantelpunt), een hogere temperatuur en een hoger CO₂-gehalte in de atmosfeer leiden tot een hogere productiviteit van de vegetatie. Kwelderplanten zijn belangrijke *ecosystem engineers*. Zij zetten verschillende *feedback* cycli in gang en stabiliseren hun eigen relatieve hoogte tot het water. Boven de grond zorgen de planten dat de stroomsnelheid van het water en de golfhoogten verminderen en daarmee neemt de erosie af.³⁵ Door de lagere stroomsnelheid vindt bovendien makkelijker neerslag plaats van het gesuspendeerd fijn sediment. Ook levert de bovengrondse vegetatie organische stof, waarmee de bodem ophooft.³⁶ Onder de grond worden veel meer wortels geproduceerd dan in de waterverzadigde bodem worden verteerd, waardoor ook hier ophoging van de kwelderbodem plaatsvindt.³⁷ Een grotere hoeveelheid benthische diatomeeën tenslotte zorgt, samen met de plantenwortels, voor een grotere stabiliteit van het sediment en wederom voor minder erosie op de kwelder. Dankzij deze terugkoppelingsmechanismen kan de zeespiegelstijging gepaard gaan met een snellere ophoging. In verschillende gebieden is zelfs een verdrievoudiging van de ophogingssnelheid geconstateerd.³⁸ Er is echter een kantelpunt aanwezig voor deze *feedbacks*. Veel van de plantensoorten die op de kwelder groeien, hebben een hogere productiviteit op gemiddelde hoogten van de lage kwelder, en deze productiviteit wordt lager op zowel de hogere of lagere delen (zie Afbeelding 4.7). Bij een te grote toename van de overstromingen zal er dus juist een verlaging van de productiviteit van de vegetatie plaatsvinden waardoor, de *feedbacks* geen standhouden en de kwelder het risico loopt te verdrinken.

LATERALE VERPLAATSING EN KLIFEROSIE

Indien de verticale opwas niet groot genoeg is om de zeespiegelstijging bij te houden, bestaat een andere ontsnapingsmogelijkheid. Kwelders kunnen zich ook door laterale aanwas verplaatsen, zowel in zeewaartse richting als landinwaarts. Zeewaartse expansie vindt plaats als rivieren grote hoeveelheden sediment aanvoeren. In veel situaties is aanwas in deze richting echter niet mogelijk door een sterke stroming aan zeewaartse zijde. Verplaatsing landinwaarts is soms wel mogelijk. Als gevolg van toenemende over-

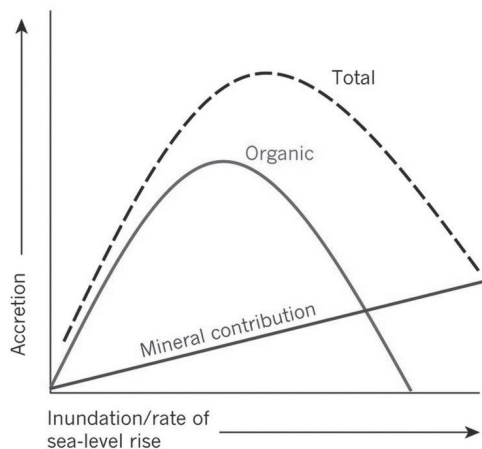
34 D'Alpaos et al. 2007; Kirwan et al. 2008.

35 Möller 2006; Fagherazzi 2012.

36 Kirwan & Megonigal 2013.

37 McKee et al. 2007.

38 Kolker et al. 2011.



Afbeelding 4.7 De hypothetische bijdrage van sedimentatie (*mineral contribution*) en organische stof (*organic*) aan de ophoging van het maaiveld (x-as) als functie van de inundatiesnelheid of mate van zeespiegelstijging (x-as). Terwijl de sedimentatie van zand en klei bij meer overstroming blijft toenemen, geldt voor de organische component dat er een optimum bestaat waarbij veel plantenmateriaal bijdraagt aan ophoging van de bodem (Kirwan & Megonigal 2003).

stroming van meer landinwaarts gelegen begroeiingen worden zoutmijdende planten vervangen door zouttolerante kwelderplanten.³⁹ Stormvloedversnellen dit proces door toevoer van grote hoeveelheden zout water. De verplaatsing van een kwelder in deze richting is echter alleen mogelijk als hellingen niet te steil zijn en er geen obstakels zijn die de verplaatsing blokkeren. In veel gevallen echter zal 'harde' kustverdediging de verplaatsing van de kwelder landinwaarts onmogelijk maken.⁴⁰

Het omgekeerde proces van kwelderexpansie is laterale erosie. De hoeveelheid laterale erosie is afhankelijk van de steilheid van de overgang tussen getijdeplaat en kwelder. Als de getijdeplaat ten opzichte van de kwelder relatief hoog ligt, vindt minder erosie plaats, maar is er ook minder toevoer van sediment van de getijdeplaat naar de kwelder. Bij een scherpere overgang worden golven minder gedempt en hebben ze een grotere kracht om de rand van de kwelder aan de zeekant te eroderen, waardoor een klif ontstaat. Dit proces heet kliferosie. Zeewaarts van een klif kan een nieuwe pionierzone ontstaan, met in sommige gevallen nieuwe kwelderaanwas. Zo'n secundaire kwelder kan na verloop van tijd ook weer een klif vormen.⁴¹ Kwelders met een stabiel oppervlak bestaan niet, tenzij beheermaatregelen, zoals oeververdediging, het areaal gelijk houden.⁴²

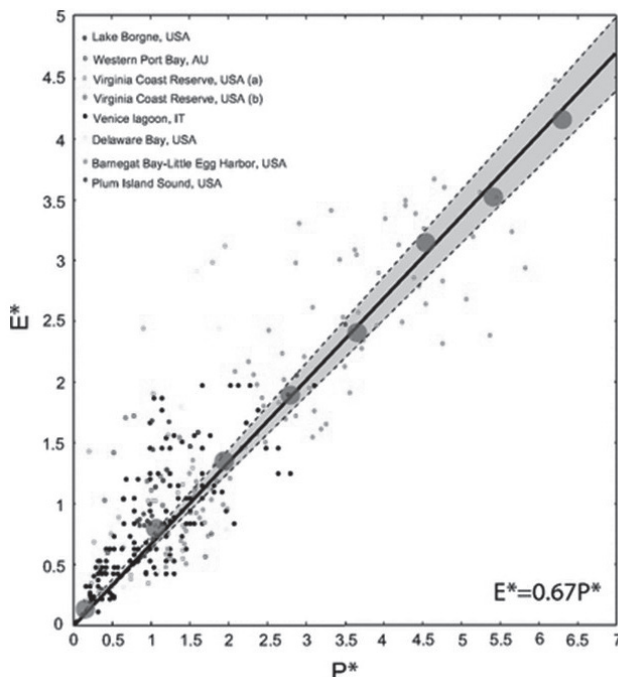
³⁹ Morris et al. 2002.

⁴⁰ Doyle et al. 2010; dit proces wordt *coastal squeezing* genoemd.

⁴¹ Koppel et al. 2005.

⁴² Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland 2012.





Afbeelding 4.8 Relatie tussen golfkracht (P^*) en erosiesnelheid (E^*) van kwelders (Leonardi et al. 2016). De metingen rechtsboven in de figuur komen van Barnegat Bay-Little Egg Harbor (USA). In het linkerdeel van de figuur liggen punten van alle gebieden door elkaar heen.

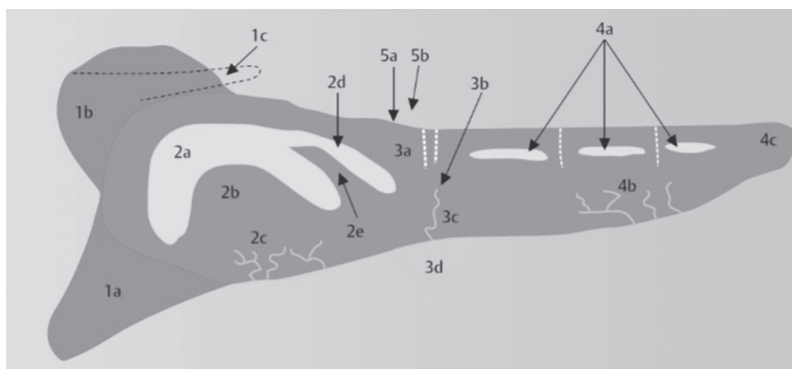
Bij een stijgende zeespiegel staan de getijdenplaten vaak langer onder water en worden de golven minder gedempt. De golven hebben meer kracht als zij de kwelder bereiken en daardoor vindt meer laterale erosie plaats.⁴³ Bij de verwachte versterking van stormen⁴⁴ zal ook de golfenergie toenemen. Er blijkt echter geen kritisch kantelpunt te zijn in golfenergie waarbij de kwelder compleet ineenstort: de erosie van de kwelder neemt lineair toe met de golfenergie (Afbeelding 4.8).

4.5 De kwelders van Ameland

Op de Waddeneilanden heeft de dynamiek van de eilanden een grote invloed op de ontwikkeling van de kwelders. Het zogenaamde 'modeleiland' wordt gebruikt om de opbouw en dynamiek van de Waddeneilanden in een natuurlijke staat te beschrijven

⁴³ Mariotti et al. 2010.

⁴⁴ Leonardi & Fagherazzi 2015.



Afbeelding 4.9 Modeleiland met vijf hoofdonderdelen: 1. Eilandkop, 2. Duinboogcomplex, 3. Wash-over-complex, 4. Eilandstaart, en 5. Strand en vooroever (Naar: Oost et al. 2012).

(Afbeelding 4.9). Het modeleiland heeft de vorm van een langgerekte druppel, ligt min of meer parallel aan de kust en heeft aan beide zijden een zeegat met een geulensysteem.⁴⁵ Het breedste deel, aan de westkant van het eiland, vormt de kop. De kop is dynamisch door het aanlanden van zandplaten en afslag door erosie. Het duinbogencomplex is een verzameling van duinenrijen die ontstaan door het opwaaien van zand. De strandvlakte wordt ingesloten als het duinbogencomplex zich sluit. Dit deel verandert in een kwelder als klei wordt afgezet bij doorbraken van de duinen. Als de duinenrij aan de zeekant wordt doorbroken, wordt een grote hoeveelheid zand en klei afgezet achter de duinen. Er ontstaat een zogenaamde *wash-over*, die een doorgeefluik van zand vormt naar het achterliggende deel van het eiland. Bij overstromingen wordt de successie hier telkens teruggezet naar een pionierstadium. Het meest oostelijke deel van het eiland is de eilandstaart. De staart verandert in lengte door aangroei en afslag en verplaatst zich ook van boven naar beneden doordat geulen in de zeegaten zich in een cyclische beweging verleggen.⁴⁶ Dit wordt ook wel het 'kwispelen' van de eilandstaart genoemd. Door de stromingsrichting van west naar oost en het verstuiwen van zand verplaatsen de eilanden, ten minste als ze niet zijn vastgelegd, zich langzaam in oostelijke richting. Door de stijgende zeespiegel is een beweging van de eilanden te zien in de richting van de vastelandskust.

Een cyclus die een belangrijke rol speelt voor de aanwas van Ameland, is het aanlanden van zandplaten. Als een zandplaat bij de kop aanlandt, vindt een sprong van de kustlijn plaats in zeewaartse richting. In de periode na de aanlanding verspreidt het zand zich langzaam langs de kustlijn of spoelt het zeegat in. De eilandkop slinkt dan weer, maar op de rest van het eiland vindt aanwas plaats. Deze cyclus herhaalt zich gemiddeld elke zestig jaar en de laatste aanlanding heeft geleid tot de ontwikkeling van een grote

⁴⁵ De Jong 2011; De Groot et al. 2015.

⁴⁶ Fitzgerald et al. 1984.



strandhaak. Hierdoor vormde zich een lange binnensee tussen het oude en het nieuwe strand, waar zich in de beschutting een groen strand kon ontwikkelen.⁴⁷

MENSELIJKE INVLOEDEN

Menselijke ingrepen in het Waddengebied hebben grote effecten gehad op de ontwikkeling en dynamiek van de eilanden. Een van de meest ingrijpende verandering was de eerdergenoemde afsluitingen van de Zuiderzee en de Lauwerszee. Een andere grote ingreep was de aanleg van stuifdijken aan het eind van de 19de en aan het begin van de 20ste eeuw. Deze dijken vormen een blokkade tussen het strand en het achterliggende land, waardoor de dynamiek sterk werd beperkt. Waar deze dijken liggen, komen geen *wash-over*-complexen meer voor en het achterliggende eiland kan hierdoor niet meegroeien met de zeespiegelstijging.

Om de veiligheid van de inwoners te verzekeren en het areaal van het eiland te behouden worden op Ameland sinds begin jaren negentig van de vorige eeuw strand- en vooroeversuppleties uitgevoerd. Verschillende delen van Ameland worden beweide, waardoor de successie van de kwelder wordt vertraagd. Ook vindt door beweiding meer vertrapping van de bodem plaats, waardoor de kwelder lager komt te liggen en mogelijk vernat. Op Ameland speelt tenslotte de bodemdaling als gevolg van gaswinning een grote rol.

BODEMDALING

Door de gaswinning op Oost-Ameland en Ameland Westgat is er sinds 1982 sprake van bodemdaling in het oosten van Ameland. De bodemdaling op de kwelders van Ameland bedraagt gemiddeld 9-11 mm/jaar op de Hon, vergelijkbaar met het maximumscenario voor zeespiegelstijging van het IPCC van 8,5 mm/jaar tot 2050 (Afbeelding 4.10). De vegetatie op de kwelders De Hon en het Neerlands Reid, in het oosten van Ameland, worden sinds het begin van de gaswinning gemonitord aan de hand van permanente kwadraten (PQ's). Hierbij wordt bekeken wat het effect van bodemdaling is op de opslibbingssnelheid, maaiveldhoogte en ontwikkeling van de vegetatie. Daarnaast worden jaarlijks zogenoemde SEB-metingen verricht om sedimentatiesnelheden te meten.⁴⁸ Het Neerlands Reid is sinds 1986 aan de westzijde 5 cm gedaald en aan de oostzijde 6 tot 25 cm. Op de Hon is dit 18 tot 31 cm.⁴⁹

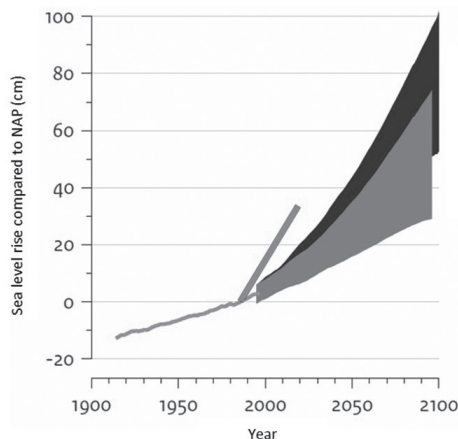
Dicht bij het wad en de kreken in de lage kwelder vindt veel opslibbing plaats bij overstromingen (9 mm/jaar), een normaal getal voor een lage kwelder.⁵⁰ Op de lage kwelder

47 Van Tooren & Krol 2005.

48 Hierbij wordt een balk boven op twee gefundeerde palen gezet. Aan de hand van de hoogte van de balk tot het maaiveld kan worden vastgesteld hoeveel opslibbing of erosie er heeft plaatsgevonden.

49 Elschot et al. 2017.

50 Dijkema et al. 1990.



Afbeelding 4.10. Zeespiegelstijging ten opzichte van NAP (y-as) aan de Nederlandse kust, zoals waargenomen (grijze lijn) en volgens twee KNMI-scenario's (grijs en zwart vlak; aangepast naar Afbeelding 4.1). De sterk stijgende donkere lijn betreft de relatieve zeespiegelstijging op Ameland als gevolg van bodemdaling. Deze komt goed overeen met het scenario van maximale zeespiegelstijging.

en pionierszone van Neerlands Reid stijgt het maaiveld en wordt de relatieve zeespiegelstijging meer dan gecompenseerd. De opslibbing in de midden- en hoge kwelder, verder van de krek en het wad af, bedraagt gemiddeld 3,5 mm/jaar. Dit is normaal voor een midden- en hoge kwelder,⁵¹ maar niet genoeg om de bodemdaling te compenseren. De hoge en middenkwelder dalen netto, en de maaiveldhoogte van de lage kwelder blijft gelijk of stijgt. Hiermee samenhangend wordt op termijn een omkering in de zonering van de kwelder verwacht: de vegetatie van de lage kwelder zal zich uitbreiden naar delen van de middenkwelder, en in de lage kwelder zal successie plaatsvinden naar een vegetatie van de middenkwelder. In verstoorde delen van de hoge kwelder zal de vegetatie van de middenkwelder zich uitbreiden.

VEGETATIEVERANDERINGEN

Aan de hand van de vegetatieopnamen die de afgelopen dertig jaar in de PQ's zijn gemaakt, kan worden bekeken waar op de kwelder regressie of successie van de vegetatie optreedt en of dit correspondeert met de verwachtingen.⁵²

Op de lage kwelder vindt bijna geen regressie plaats, een groot deel van de vegetatie blijft vrijwel onveranderd en op sommige plekken vindt zelfs successie plaats. Regressie zien we vooral op plekken waar nog nauwelijks vegetatie aanwezig was: zonder de

⁵¹ Kers et al. 1998.

⁵² Elschot et al. 2017.



aanwezigheid van Gewoon kweldergras gaat de opslibbing minder snel. In een deel van de midden- en hoge kwelder vindt regressie plaats door de negatieve opslibbingsbalans. In de middenkwelder op De Hon bijvoorbeeld vindt regressie plaats sinds 1986, toen het maaiveld al 10-15 cm onder de theoretische ondergrens van de vegetatiezone voor de midden kwelder lag. Nu ligt het maaiveld hier 19-21 cm onder deze grens. In andere delen van de middenkwelder en de hoge kwelder daarentegen vindt op veel plekken successie plaats waarbij Zeekweek gaat domineren. Het proces van successie is hier sterker dan verwacht. In plots met een stabiele of licht negatieve opslibbingsbalans, is toch sprake van successie.

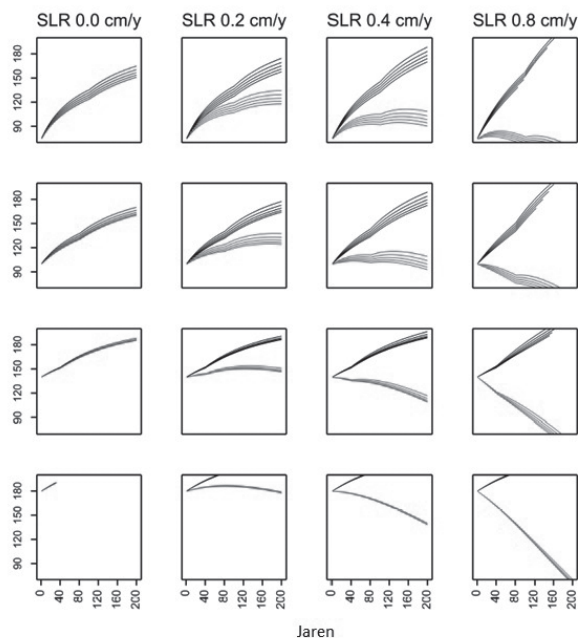
Een deel van Neerlands Reid wordt al lange tijd beweide, en dit heeft een groot effect op de vegetatie die hier groeit. In een aantal PQ's op de hoge kwelder vindt regressie plaats van een door Zeekweek gedomineerde vegetatie naar een vegetatie die wordt gedomineerd door Rood zwenkgras. Op andere delen heeft de begrazing de laatste jaren juist minder effect, doordat het vee later ingeschaard wordt. Plaatsen waar het vee moeilijk kan komen, verruigen met Gewone zoutmelde, Zeealsem en Zeekweek. De verruiging versterkt zichzelf doordat de vegetatie minder eetbaar is geworden. De bedekking van Gewoon kweldergras is door successie afgenomen ten gunste van Gewone zoutmelde. De oorzaak van de verruiging zou het 'weidevogel-beheerpakket' kunnen zijn, dat in 2008 is ingegaan, waardoor de beweiding nu pas na 9 juni start. Zeekweek profiteert van een groeivoorsprong in het voorjaar.⁵³ De competitie om licht wordt vroeg in het groeiseizoen beslist en daardoor bevordert het later inscharen van vee Zeekweek ondanks de bodemdaling.

Als een vegetatie zich eenmaal heeft gevestigd, blijkt dat regressie van de vegetatie pas optreedt bij een grenswaarde van 10 tot 15 cm onder de theoretische ondergrens van de vegetatiezone. Op Ameland is deze ondergrens nog maar op weinig plaatsen bereikt. In 50% van de PQ's op Ameland vindt successie plaats en in 25% van de PQ's verandert de vegetatiezone niet. In het bijzonder op locaties met slechte drainage, zoals in de centrale kommen op de Hon, stagneert zolang water dat hier wel regressie optreedt.

TOEKOMSTBESTENDIGHEID

In veel delen van de kwelders op Ameland is niet de regressie te zien die verwacht wordt op basis van de negatieve opslibbingsbalans. Op allerlei plekken vindt zelfs successie plaats. Blijkbaar is het proces van successie sterker dan gedacht. Als de vegetatie van de lage kwelder zich eenmaal heeft gevestigd, kan de vegetatie zich lang standhouden onder veranderende omstandigheden; de vegetatie is veerkrachtiger dan we denken. Een veerkrachtige vegetatie helpt de kwelder om de opslibbingsbalans neutraal of positief te houden dankzij de beschreven ecologische en geomorfologische terugkoppelingen. Op plekken waar de bodemdaling sterk is en regressie van de vegetatie optreedt, is de vegetatie bovendien diverser geworden. Bij successie naar een vegetatie gedomineerd

53 Scholten et al. 1987



Afbeelding 4.11. Opslibingssnelheden van de lage tot hoge kwelder (verticaal) onder de verschillende scenario's van zeespiegelstijging bovenop de huidige bodemdaling. De onderste rij figuren betreft de hoge kwelder, de bovenste rij de lage kwelder. In elk figuur geeft de bovenste lijn de absolute opslibbing, de onderste lijn de resulterende maaiveldhoogte (Van Dobben & Slim 2012).

door Zeekweek verandert de kwelder in een soortenarm systeem, terwijl de vegetatie soortenrijker blijft als de successie wordt vertraagd of teruggedraaid. Bodemdaling of zeespiegelstijging kan dus bijdragen aan de diversiteit op de kwelder.

De opslibingssnelheden in de verschillende kwelderzones op Ameland zijn verwerkt in een model. In Afbeelding 4.11 zijn verschillende opslibingssnelheden van de lage tot hoge kwelder (verticaal) te zien onder de verschillende scenario's van zeespiegelstijging bovenop de huidige bodemdaling. De lage kwelder houdt de zeespiegelstijging bij volgens deze voorspellingen, behalve in het meest extreme scenario (figuur rechtsboven). De hoge kwelder zal de stijging na verloop van tijd niet bijhouden in de laatste twee scenario's (onderste rij, rechter twee figuren).

De komende jaren zal de gaswinning worden verminderd, waardoor de snelheid van bodemdaling zal afnemen. De scenario's voor Ameland zullen hierdoor minder extreem worden. De bodemdaling in het midden van het Neerlands Reid bedraagt nu 5 mm/jaar; dit is nog maar de helft van de daling in de jaren negentig. In 64% van de PQ's op het Neerlands Reid vlakt de daling significant af door voortgaande opslibbing en afnemende daling. De bodemdaling op het midden van de Hon is nu 6 mm/jaar, onge-



veer een derde van de daling in de jaren negentig. Hier vlakt de daling significant af in 80% van de PQ's.⁵⁴

Met de afnemende bodemdaling hebben de delen van de kwelder die nu een negatieve opslibbingsbalans hebben, een grotere kans om de toekomstige daling bij te houden. Uiteindelijk lijkt het erop dat de kwelders van Ameland niet zullen verdrinken; de bodemdaling neemt waarschijnlijk op tijd af en de kweldervegetatie lijkt tot die tijd voldoende veerkrachtig.

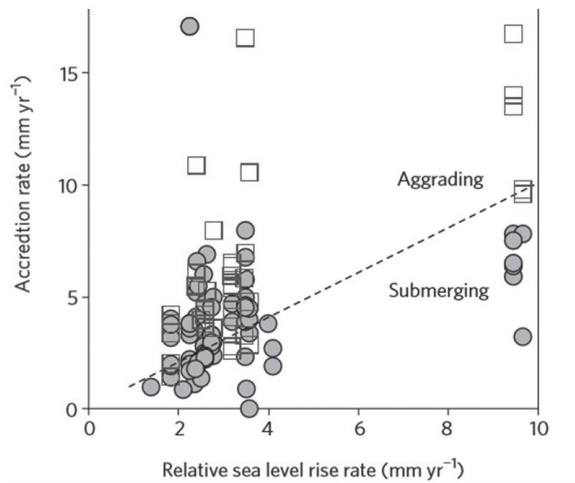
4.6 Conclusies: veerkracht van kwelders

Er zijn veel scenario's geschetst voor de situatie van kwelders bij een stijgende zeespiegel. Veel van deze scenario's voorspellen dat de opslibbing de zeespiegelstijging niet kan bijhouden en dat het kwelderareaal wereldwijd sterk zal afnemen. Als we naar het voorbeeld van Ameland kijken, blijkt een aantal van de aannames in deze scenario's niet geheel juist. In de scenario's zijn de opslibbingssnelheden van de hoge kwelder gebruikt voor de berekening van de netto maaiveldhoogte. Op Ameland zien we echter dat de opslibbingssnelheden van de lage kwelder veel hoger zijn, en dat de opslibbing in deze zone de bodemdaling bijhoudt. In Afbeelding 4.12 zijn resultaten samengevat van een recente studie naar de opslibbing van kwelders, waarbij onderscheid is gemaakt tussen lage en hoge kwelders. De figuur maakt duidelijk dat bijna alle lage kwelders de zeespiegelstijging bijhouden. Het voorbeeld van Ameland laat zien dat de zonering van de kwelder ook kan verschuiven, waarbij de hoge of middenkwelder lage kwelder wordt en de lage kwelder zich ontwikkelt tot middenkwelder. Zodra de hoge en middenkwelder lager komen te liggen, zal de opslibbing hier waarschijnlijk toenemen, vooral rondom de krekken.

Daarnaast is in veel scenario's geen rekening gehouden met de *ecogeomorfologische feedback* van de vegetatie, die voor een grotere opslibbing zorgt. Deze *feedback* heeft wel een kantelpunt: als de frequentie en duur van de overstroming te hoog worden, vindt regressie van de vegetatie plaats of verdwijnt de vegetatie in zijn geheel. Uit het onderzoek op Ameland komt naar voren dat dit kantelpunt pas optreedt na een relatieve grote daling (of relatieve zeespiegelstijging). Hier vond geen regressie plaats tot 10-15 cm onder de theoretische ondergrens van de vegetatie. Alleen in de pionierzone, waar zich nog geen Gewoon kweldergras heeft gevestigd, vindt onvoldoende opslibbing plaats om voor de zeespiegelstijging te compenseren.

Er zijn voorbeelden in de wereld (zie Afbeelding 4.4) waar het kwelderareaal in korte tijd enorm is afgenomen. Veel van dergelijke kwelders bevinden zich echter in een

⁵⁴ Elschot et al. 2017.



Afbeelding 4.12. Relatie tussen de relatieve zeespiegelstijging en opslibbingssnelheden voor lage en hoge kwelders op basis van metingen aan kwelders in de USA (Atlantische Oceaan en Golf van Mexico) en Europa (Atlantische Oceaan). Voor kwelders boven de lijn is de opslibbingsbalans positief, voor kwelders eronder negatief (Kirwan et al. 2016).

coastal squeeze: de kwelders hebben hier geen ruimte om te migreren, als gevolg van dijken of andere obstakels. Bij andere kwelders die zijn verdwenen, werd de sedimenttoevoer geblokkeerd of hadden de kwelders geen ruimte om op te slibben. De belangrijkste voorwaarden voor voldoende veerkracht van kwelders zijn dan ook: voldoende toevoer van sedimentrijk water en ruimte om op te slibben en te migreren. In een natuurlijk, dynamisch kweldersysteem hoeft zeespiegelstijging dan ook geen probleem te zijn. Zolang de stijging niet al te extreem is, kan dit zelfs zorgen voor meer variatie en biodiversiteit.

4.7 Literatuur

- Adam, P. (1990). *Saltmarsh ecology*. Cambridge studies in ecology. Cambridge University Press.
- Andresen, H., J.P. Bakker, M. Brongers, B. Heydemann & U. Irmeler (1990). Long-term changes of salt-marsh communities by cattle grazing. *Vegetatio* 89: 137-148.
- Baart, F., P.H.A.J.M. van Gelder, J. de Ronde & M. van Koningsveld (2012). The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates. *Journal of Coastal Research* 28: 511-516.
- Bakker, J. P. (2014). *Ecology of Salt Marshes: 40 Years of Research in the Wadden Sea*. Wadden Academy.



- Bakker, J.P., D. Bos & Y. de Vries (2003). To graze or not to graze: that is the question. In: W. Wolff et al. (red.), *Challenges to the Wadden Sea area*. Proceedings 10th International Scientific Wadden Sea Symposium. Ministry of Agriculture, Nature Management and Fisheries / Department of Marine Biology, University of Groningen, pg. 67-87.
- Bartholdy, J., J.B.T. Pedersen & A.T. Bartholdy (2010). Autocompaction in shallow silty salt marsh clay. *Sedimentary Geology* 223: 310-319.
- Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland (2012). *Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost. Evaluatie na 25 jaar gaswinning*. Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland.
- Bridgham, S.D., J.P. Megonigal, J.K. Keller, N.B. Bliss & C. Trettin (2006). The carbon balance of North American wetlands. *Wetlands* 26: 889-916.
- Cahoon, D.R., P.F. Hensel, T. Spencer, D.J. Reed, K.L. McKee & N. Santilan (2006). Coastal Wetland Vulnerability to Relative Sea-Level Rise: Wetland Elevation Trends and Process Controls. In: J.T.A. Verhoeven et al. (red.), *Wetlands and Natural Resource Management*. Ecological Studies Vol. 190. Springer, pg. 271-292.
- Chmura, G.L., S.C. Anisfeld, D.R. Cahoon & J.C. Lynch (2003). Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils. *Global Biogeochemical Cycles* 17: 1111.
- Coleman, J.M. & S.M. Gagliano (1964). Cyclic sedimentation in the Mississippi River deltaic plain. *Transactions, Gulf Coast Association of Geological Societies* 14: 67-80.
- Costanza, R., O. Pérez-Maqueo, M.L. Martinez, P. Sutton, S.J. Anderson & K. Mulder (2008). The value of coastal wetlands for hurricane protection. *Ambio* 37: 241-248.
- D'Alpaos, A., S. Lanzoni, M. Marani & A. Rinaldo (2007). Landscape evolution in tidal embayments: modeling the interplay of erosion sedimentation and vegetation dynamics. *Journal of Geophysical Research* 112: F01008.
- De Groot, A.V., A.P. Oost, R.M. Veeneklaas, E.J. Lammerts, W.E. van Duin, B.K. van Wesenbeeck, E.M. Dijkman & E.C. Koppelaar (2015). *Ontwikkeling van eilandstaarten: geomorfologie, waterhuishouding en vegetatie*. OBN-rapport 2015/198-DK, Vereniging van Bos-en Natuurterreineigenaren, Driebergen.
- De Jong, B., P.A. Slim, M.J.P.M. Riksen & J. Krol (2011). *Ontwikkeling van de zeereep onder dynamisch kustbeheer op Oost-Ameland; onderzoek naar de bijdrage van duinbeheer op de kustveiligheid*. Alterra-rapport 2152, Wageningen.
- Kennish, M. J. (2001). Coastal salt marsh systems in the US: a review of anthropogenic impacts. *Journal of Coastal Research* 17: 731-748.
- Dijkema, K.S., J.H. Bossinade, P. Bouwsema & R.J. de Glopper (1990). Salt marshes in the Netherlands Wadden Sea: rising high-tide levels and accretion enhancement. In: J.J. Beukema et al. (red.), *Expected effects of climatic change on marine coastal ecosystems*, pg. 173-188.
- Dijkema, K.S., A. Nicolai, J. de Vlas, C. Smit, H. Jongerius & H. Nauta (2001). *Van Landaanwinning naar Kwelderwerken*. Rijkswaterstaat directie Noord-Nederland, Leeuwarden / Alterra, Research Instituut voor de Groene Ruimte, Texel.

- Dillingh, D., F. Baart & J. de Ronde (2012). Is er al een versnelde zeespiegelstijging? *H₂O* 44: 14-15.
- Doody, J.P. (2008). *Saltmarsh conservation, management and restoration*. Coastal systems and continental margins. Springer Science & Business Media.
- Doyle, T.W., K.W. Krauss, W.H. Conner & A.S. From (2010). Predicting the retreat and migration of tidal forests along the northern Gulf of Mexico under sea-level rise. *Forest Ecology and Management* 259: 770-777.
- Elschot, K., A. de Groot, K.S. Dijkema, C. Sonneveld, J.T. van der Wal, P. de Vries, B. Brinkman, W. van Duin, W. Molenaar, J. Krol, L. Kuiters, D. de Vries, R. Wegman, P.A. Slim, E.C. Koppenaal & J. de Vlas (2017). Ontwikkeling kwelder Ameland-Oost. Evaluatie bodemdalingsonderzoek 1986-2016. In: Bodemdalingcommissie monitoring bodemdaling Ameland (red.), *Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; Evaluatie na 30 jaar gaswinning*; Den Helder, pg. 185-328.
- Esselink, P. (2000). *Nature management of coastal salt marshes. Interactions between anthropogenic influences and natural dynamics*. Dissertatie, Universiteit van Groningen.
- Fagherazzi, S., M. Kirwan, S.M. Mudd et al. (2012) Numerical models of salt marsh evolution: ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics* 50: RG1002.
- Fitzgerald, D.M., S. Penland & D. Nummedal (1984). Control of barrier island shape by inlet sediment bypassing: East Frisian Islands, West Germany. *Developments in Sedimentology* 39: 355-376.
- Frazier, D.E. (1967). Recent deltaic deposits of the Mississippi River: their development and chronology. Transactions, *Gulf Coast Association of Geological Societies* 17: 287-315.
- French, J.R. & D.R. Stoddart (1992). Hydrodynamics of salt marsh creek systems: Implications for marsh morphological development and material exchange. *Earth Surface Processes and Landforms* 17: 235-252.
- Ganju, N.K., N.J. Nidzieko & M.L. Kirwan (2013). Inferring tidal wetland stability from channel sediment fluxes: Observations and a conceptual model. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118: 2045-2058.
- Gedan, K.B., M.L. Kirwan, E. Wolanski, E.B. Barbier & B.R. Silliman (2011). The present and future role of coastal wetland vegetation in protecting shorelines: answering recent challenges to the paradigm. *Climatic Change* 106: 7-29.
- Haigh, I.D., M. Eliot & C. Pattiaratchi (2011). Global influences of the 18.61 year nodal cycle and 8.85 year cycle of lunar perigee on high tidal levels. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 116: C6.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Climate Change 2007 – The physical science basis*. Cambridge University Press, New York.



- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects*. Cambridge University Press, New York.
- Kers, A.S., H.J. van Wijnen & G. Walrecht (1998). *Kleidikte, opslibbing en vegetatie Oosterkwelder Schiermonnikoog*. Rapport Laboratorium voor Plantenecologie, RU Groningen.
- Kirwan, M.L. & J.P. Megonigal (2013). Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature* 504: 53-60.
- Kirwan, M., A. Murray & W. Boyd (2008). Temporary vegetation disturbance as an explanation for permanent loss of tidal wetlands. *Geophysical Research Letters* 35: L05403.
- Kirwan, M.L., G.R. Guntenspergen, A. D'Alpaos, J.T. Morris, S.M. Mudd & S. Temmerman (2010). Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. *Geophysical Research Letters* 37: L23401.
- Kirwan, M.L., S. Temmerman, E.E. Skeehan, G.R. Guntenspergen & S. Fagherazzi (2016). Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. *Nature Climate Change* 6: 253-260.
- Klein Tank, A., J. Beersma, J. Bessembinder, B. van den Hurk & G. Lenderink (2014). *KNMI'14: klimaatscenario's voor Nederland*. KNMI, De Bilt.
- Kolker, A.S., M.L. Kirwan, S.L. Goodbred & J.K. Cochran (2010). Global climate changes recorded in coastal wetland sediments: empirical observation linked to theoretical predictions. *Geophysical Research Letters* 37: L14706.
- Kooi, H., P. Johnston, K. Lambeck, C. Smither & R. Molendijk (1998). Geological causes of recent (~100 yr) vertical land movement in the Netherlands. *Tectonophysics* 299: 297-316.
- Leendertse, P.C., A.J.M. Roozen & J. Rozema (1997). Long-term changes (1953-1990) in the salt marsh vegetation at the Boschplaat on Terschelling in relation to sedimentation and flooding. *Plant Ecology* 132: 49-58.
- Leonardi, N. & S. Fagherazzi (2015). Effect of local variability in erosional resistance on large-scale morphodynamic response of salt marshes to wind waves and extreme events. *Geophysical Research Letters* 42: 5872-5879.
- Leonardi, N., N.K. Ganju & S. Fagherazzi (2016). A linear relationship between wave power and erosion determines salt-marsh resilience to violent storms and hurricanes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113: 64-68.
- Löffler, M.A.M., A.P. Grootjans, C.C. de Leeuw, A.P. Oost & S.K. Verbeek (2008). *Eilanden natuurlijk: natuurlijke ontwikkeling en veerkracht op de Waddeneilanden*. Waddenvereniging.
- Mariotti, G., S. Fagherazzi, P.L. Wiberg, K.J. McGlathery, L. Carniello & A. Defina (2010). Influence of storm surges and sea level on shallow tidal basin erosive processes. *Journal of Geophysical Research* 115: C1101.

- Mayor, J. & C. Hicks (2009). Potential impacts of elevated CO₂ on plant interactions, sustained growth, and carbon cycling in salt marsh ecosystems. In: B.R. Silliman et al. (red.), *Human impacts on salt marshes: a global perspective*. University of California Press, Berkeley, pg. 207-230.
- McKee, K.L., D.R. Cahoon & I.C. Feller (2007). Caribbean mangroves adjust to rising sea level through biotic controls on change in soil elevation. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 16: 545-556.
- McLeod, E., G.L. Chmura, S. Bouillon, R. Salm, M. Bjark, C.M., Duarte, C.E. Lovelock, W.H. Schlesinger & B.R. Silliman (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9: 552-560.
- McOwen, C., L. Weatherdon, J.W. van Bochove et al. (2017). A global map of saltmarshes. *Biodiversity Data Journal* 5: e11764.
- Mitsch, W. J. & J.G. Gosselink (2008). *Wetlands*. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Möller, I. (2006). Quantifying saltmarsh vegetation and its effect on wave height dissipation: Results from a UK east coast saltmarsh. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 69: 337-351.
- Morgan, P.A., D.M. Burdick & F.T. Short (2009). The functions and values of fringing salt marshes in Northern New England, USA. *Estuaries and Coasts* 32: 483-495.
- Morris, J.T., P.V. Sundareshwar, C.T. Nietch, B. Kjerfve & D.R. Cahoon (2002). Responses of coastal wetlands to rising sea level. *Ecology* 83: 2869-2877.
- Nicholls, R.J., F.M.J. Hoozemans & M. Marchand (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: regional and global analyses. *Global Environmental Change* 9: 69-87.
- Nolte, S., E.C. Koppenaal, P. Esselink, K.S. Dijkema, M. Schürch, A.V. de Groot, J.P. Bakker & S. Temmerman (2013). Measuring sedimentation in tidal marshes: a review on methods and their applicability in biogeomorphological studies. *Journal of Coastal Conservation* 17: 301-325.
- Olf, H., J. de Leeuw, J.P. Bakker, R.J. Platerink, H.J. van Wijnen & W. de Munck (1997). Vegetation succession and herbivory on a salt marsh: changes induced by sea level rise and silt deposition along an elevational gradient. *Journal of Ecology* 85: 799-814.
- Oost, A.P., P. Hoekstra, A. Wiersma, B. Flemming, E.J. Lammerts, M. Pejrup, J. Hofstede, B. van der Valk, P. Kiden, J. Bartholdy, M.W. van der Berg, P.C. Vos, S. de Vries & Z.B. Wang (2012). Barrier island management: Lessons from the past and directions for the future. *Ocean & Coastal Management* 68: 18-38.
- Peltier, W.R., W.E. Farrell & J.A. Clark (1978). Glacial isostasy and relative sea level: a global finite element model. *Tectonophysics* 50: 81-110.
- Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315: 368-370.



- Reed, D.J. (1995). The response of coastal marshes to sea-level rise: survival or submergence? *Earth Surf. Processes Landforms* 20: 39-48.
- Reents, S. (1995). *Vergelijking van het kunstmatige afwateringssysteem in de kwelderwerken met natuurlijke kreekssystemen*. Stageverslag Rijkswaterstaat, Directie Noord-Nederland en IBNDLO, Texel.
- Royer, T.C. (1993). High-latitude oceanic variability associated with the 18.6-year nodal tide. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 98 (C3): 4639-4644.
- Scholten, M., P.A. Blaauw, M. Stroetenga & J. Rozema (1987). The impact of competitive interactions on the growth and distribution of plant species in salt marshes. In: A.H.L. Huiskes et al. (red.), *Vegetation between land and sea*. Junk, Dordrecht, Boston, Lancaster, pg. 270-281.
- Schwimmer, R.A. & J.E. Pizzuto (2000). A model for the evolution of marsh shorelines, *Journal of Sedimentary Research* 70: 1026-1035.
- Templett, P.H. & K.J. Meyer-Arendt (1988). Louisiana wetland loss: a regional water management approach to the problem. *Environmental management* 12: 181-192.
- Van de Koppel, J., D. van der Wal, J.P. Bakker & P.M.J. Herman (2005). Self-organisation and vegetation collapse in salt marsh ecosystems. *The American Naturalist* 165: E1-E12.
- Van Dobben, H.F. & P.A. Slim (2012). Past and future plant diversity of a coastal wetland driven by soil subsidence and climate change. *Climatic Change* 110: 597-618.
- Van Duin, W.E., K.S. Dijkema & J. Zegers (1997). *Veranderingen in bodemhoogte (opslibbing, erosie en inklink) in de Peazemerlanden*. Rapport 326, Instituut voor Bos en Natuurbeheer, Texel.
- Van Tooren, B. & J. Krol (2005). Een groen strand op Ameland. *De Levende Natuur* 106: 156-158.
- Van Wijnen, H.J. & J.P. Bakker (1997). Nitrogen accumulation and plant species replacement in three salt-marsh systems in the Wadden Sea. *Journal of Coastal Conservation* 3: 19-26.
- Verhoeven, B. (1983). Geomorphology and soil of salt marshes. In: Dijkema, K.S. & W.J. Wolff (red.), *Flora and vegetation of the Wadden Sea islands and coastal areas*. Final report of the section 'Flora and vegetation of the islands' of the Wadden Sea Working Group, pg. 26-37.
- Watson, C.S., N.J. White, J.A. Church, M.A. King, R.J. Burgette & B. Legresy (2015). Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era. *Nature Climate Change* 5: 565-568.
- Weis, J.S. & C.A. Butler (2009). *Salt marshes: a natural and unnatural history*. Rutgers University Press.
- Wintermans, G. (2012). Effecten van bodemdaling door gaswinning op het Waddenzeegebied. *De Levende Natuur* 113: 129-135.
- Woodworth, P.L. (1990). A search for accelerations in records of European mean sea level. *International Journal of Climatology* 10: 129-143.

Yang, S.L., J.D. Milliman, P. Li & K. Xu (2011). 50,000 dams later: erosion of the Yangtze River and its delta. *Global and Planetary Change* 75: 14–20.

Yasuda, I., S. Osafune & H. Tatebe (2006). Possible explanation linking 18.6-year period nodal tidal cycle with bi-decadal variations of ocean and climate in the North Pacific. *Geophysical research letters* 33: L05605.

