

Handen en voeten voor veerkracht

Indicatoren voor klimaatbestendige washoversystemen en kwelders



Copernicus Institute

Research Institute for Sustainable Development and Innovation

A. de Jong, J.A. Wardekker, P.A. Verweij, J.P. van der Sluijs

Department of Science, Technology and Society

Copernicus Institute

Utrecht University, Utrecht, The Netherlands

Juni 2010

Dit rapport is gefinancierd door het Planbureau voor de Leefomgeving

Report NWS-E-2010-49

ISBN 978 908 672 0453

Voorwoord

In 2007 verscheen, in opdracht van het MNP, een inventarisatie van verschillende bronnen van onzekerheid die spelen bij het aanpassen aan klimaatverandering. Twee verschillende richtingen in adaptatiestrategieën werden in deze studie onderscheiden: een top-down georiënteerde voorspellingsgerichte benadering en een bottom-up georiënteerde veerkrachtbenadering (Dessai en Van der Sluijs, 2008). Verschillende methoden voor klimaatadaptatie onder onzekerheid werden in deze studie op een rij gezet. In een vervolgproject werden enkele van deze methoden toegepast op casestudies, om zo verder inzicht te krijgen in het omgaan met onzekerheid bij klimaatadaptatie.

Een van de cases die uitgewerkt werd was de casestudie Klimaatverandering en Natuur. Voor de veerkrachtstrategie, één van de bottom-up adaptatiestrategieën, zijn indicatoren uitgewerkt waarmee de veerkracht van respectievelijk washovers en kwelders kan worden vastgesteld. Hierdoor wordt het mogelijke verschillende ingrepen die bedoeld zijn om de impact van klimaatverandering (nu of in de toekomst) te verkleinen of tegen te gaan, onderling te vergelijken op basis van hun bijdrage aan de veerkracht van het systeem.

Deze studie draagt bij aan het PBL-project M/500078/01: Klimaatbeleid en Adaptatie. De leden van de stuurgroep, nl. dr. J.P. van der Sluijs, dr. M. Vonk, dr. P.A. Verweij, ir. M. Mens, drs. J.A. Wardekker en mw. P. Westerlaan, als ook de geïnterviewden dhr. H. Drost en dhr. K.S. Dijkema, worden hartelijk bedankt voor hun bijdrage aan het totstandkomen van deze studie.

Inhoudsopgave

1.	Introductie	3
2.	Washover	
	2.1 Morfologie washoversysteem	4
	2.2 Vegetatie washoversysteem	5
	2.3 Relatie washovers en kwelders	6
3.	Kwelder	
	3.1 Kweldermorfologie	6
	3.2 Kweldervegetatie	7
4.	Klimaatverandering	7
5.	Veerkracht	
	5.1 Definiëring	10
	5.2 Karakteristieken	11
6.	Indicatoren van veerkracht	
	6.1 Washover	13
	6.2 Kwelder morfologisch	14
	6.3 Kweldervegetatie	15
7.	Veerkracht Waddeneilanden en Waddenzee	16
8.	Knikpunten	17
	Bijlage I: Effecten klimaatverandering in relatie tot indicatoren	18
	Literatuur	21

1. **Introductie**

Op de Waddeneilanden zijn verschillende milieus waarin de wisselwerking tussen water en land een grote rol speelt. Deze milieus kenmerken zich vaak door een hoge dynamiek en een grote variatie aan abiotische omstandigheden. Deze factoren zorgen voor zeer karakteristieke leefgemeenschappen op de Waddeneilanden. Klimaatverandering kan een bedreiging vormen voor deze leefgemeenschappen door ofwel een directe stressfactor te zijn op de leefgemeenschap zelf, ofwel (indirect) door in te grijpen op het leefmilieu.

Op het moment wordt er veel onderzoek gedaan naar meer natuurlijk kustbeheer. Verwacht wordt dat het herstel van natuurlijke processen op de Waddeneilanden een positieve bijdrage kan leveren aan het totale sedimentbudget op het eiland, doordat het sediment vanuit de Noordzee en strand middels duinvorming, verstuiving en overfloeding weer toegang krijgt tot het eiland (Louters en Gerritsen, 2008). Washoversystemen en kwelders kunnen dan de schakel van doorgeefluik van sediment voor de rest van het eiland vormen.

Systemen kunnen op verschillende manieren reageren op verstoring. Voor ecologische systemen wordt het concept veerkracht vaak gebruikt om de stabiliteit van een ecologisch systeem te verklaren. Veerkracht is het vermogen van een systeem om te herstellen tijdens en/of na een reactie op verstoring. In dit onderzoek wordt het begrip veerkracht geoperationaliseerd in enkele indicatoren die de veerkracht van twee systemen (washovers en kwelders) beschrijven. Het onderzoek is uitgevoerd door middel van een literatuurstudie aangevuld met enkele interviews.

De geïnterviewden waren:

H. Drost, 2 maart 2008

K.S. Dijkema, 9 maart 2009 (telefonisch)

Enkele van de dynamische milieus op de Waddeneilanden worden hieronder kort omschreven, waarna op twee van deze meer gedetailleerd wordt ingegaan.

Slufter en Groene stranden: Slufter zijn getijdengebieden waar zout water vanuit zee, onder invloed van het getij, door een geul in de duinen het land kan binnendringen, waarbij vers zand naar de duinen aangevoerd wordt. Groene stranden kennen minder invloed van de zee dan slufter. Ze bevinden zich tussen het strand en centrale duinmassief waar getijde- en zoutinvloed aanwezig is. Bij zandaanvoer is er opbouw, bij stormvloed afbraak (Dankers en Steenbergen, 2003).

Washovers: Washovers ontstaan bij inbraken in de duinenrij, waardoor bij hoog water zeewater het eiland op kan stromen. Gedurende het hele jaar wordt, door middel van eolisch transport, door deze inbraken zand van het strand en de vooroever het eiland op gebracht. Anders dan bij een slufter wordt het overstromde gebied meer beheerst door abrupte zoet-zoutovergangen. Zout water stroomt bij een stormvloed door de inbraakdelta het achtergelegen land binnen; het gebied verzoet weer langzaam nadien.

Kwelders: Kwelders zijn begroeide, buitendijks gelegen, zoute of brakke gebieden onder invloed van het getij. Door accumulatie van sediment ontstaan verschillende kwelderzones met specifieke hoogte en vegetatie (De Boer en Wolff, 1996).

Supralitorale poelen: Deze poelen komen in de kwelders van het Waddengebied voor. Ze liggen gemiddeld boven de hoogwaterlijn, maar nog binnen het bereik van spring- of stormtij, wanneer hun zoutgehalte weer gelijkgeschakeld wordt met dat van de zee. In de isolatieperiode kan de zoutconcentratie verhogen (door verdamping) of lager worden (door neerslag) (De Boer en Wolff, 1996).

In een natuurlijke situatie staat het Noordzeestrand in verbinding met de kwelders door middel van inbraakdelta's in de duinenrij (Louters en Gerritsen, 1994). Hierbij hebben de Waddeneilanden een gekerfde kust waarbij sediment vanuit de Noordzee naar strand, duinen en kwelders wordt vervoerd. Het eiland fungeert hierdoor als sedimentvanger. Bij zeespiegelstijging verplaatsen duinen zich landinwaarts.

Door de aanleg van dijken aan Wadkant en stuifdijkenⁱ en kribben aan Noordzeekant is de natuurlijke dynamiek grotendeels verdwenen. Bovendien zijn de duinen vastgelegd met vegetatie en wordt de aanwezige zoetwaterbel gebruikt voor drinkwatervoorziening.

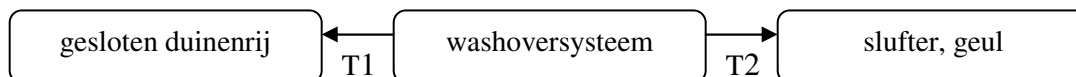
Door de aanwezigheid van stuifdijken en het inperken van inbraakdelta's in de duinenrij wordt er momenteel weinig sediment vervoerd het eiland op (wat in een natuurlijke situatie het antwoord is op zeespiegelstijging).

In dit onderzoek naar indicatoren voor veerkracht wordt verder ingegaan op washoversystemen en kwelders. Dit omdat deze twee systemen op de Waddeneilanden vaak samen opgaan: de washovervlakte mondt aanvankelijk uit in een washoverdelta die transformeert naar een kwelder.

2. Washover

Morfologie washoversysteem

Washover is een overkoepelende geomorfologische term, en omvat ondermeer sluffers, geulen en kerven (Arens, 2005). Carter (1988) definieert een washover als overspoelingsafzetting door stormvloed, die zowel via geulen of doorbraken, als via golfoverslag over hogere duinen kunnen ontstaan. Meer algemeen wordt het begrip voorbehouden aan zee-landovergangen waarbij alleen bij stormvloed de zee via een opening in de duinenrij het land binnendringt en hier zand en sediment afzet. Een washoversysteem wordt gevormd door een evenwicht tussen lateraal sedimenttransport over het strand en overwash hier loodrecht op. Wanneer er teveel sedimentaanvoer over het strand is, slibt de inbraakdelta dicht en vindt er geen overwash meer plaats bij hoog water. Wanneer dit proces lang genoeg aanhoudt, sluit de duinenrij zich idealiter weer volledig (Transitie 1, figuur 1). Wanneer de overwash te vaak optreedt, kan theoretisch gezien de inbraakdelta zich verdiepen tot een slufte of geul (bv. De Slufte, Texel), waarna het gebied onder invloed van het getij staat (Transitie 2, figuur 1) (Hans Drost, pers. comm). Dit laatste is echter onwaarschijnlijk, omdat de washover dan moet gaan concurreren om getijdewater met nabijgelegen zeegaten die al bestaan (Oost en Lammerts, 2007).



Figuur 1: transities tussen verschillende toestanden van een washoversysteem

Factoren die het voorkomen en de locatie van washovers bepalen zijn sterk gerelateerd aan de lokale morfologische gesteldheid (Matias *et al*, 2008). Mechanismen relevant voor washoverformatie op de Waddeneilanden zijn: 1) exceptionele oceanografische omstandigheden, 2) structurele erosie en 3) menselijk ingrijpen. Mechanismen relevant voor washoverafbraak zijn 1) duinformatie op het strand of in de washoverkeel, 2) structurele erosie, 3) menselijk ingrijpen (Matias *et al*, 2008).

In de mondingen van washovers kunnen vrijwel alleen microbiële matten zich handhaven. De microbiële matten hebben de neiging om sediment vast te leggen en verhinderen daarmee dus mogelijk een sterk zandtransport richting duinen. Daarmee

kunnen deze matten dus beperkend werken op de ontwikkeling van washoversystemen. Hetzelfde geldt in feite ook voor vegetatie: het vastleggen van primaire duinen op het strand zeewaarts van de zeereep door de aanwezigheid van vegetatie (bv. helmgras) betekent dat het moeilijker wordt om deze eolische afzettingen snel te eroderen en het sediment beschikbaar te krijgen voor de ontwikkeling van washovers (P. Hoekstra, pers. comm.). In de periode dat er geen overwash optreedt, kan door de inbraakdelta sediment naar binnen worden gestoven, tot een meter per eeuw (Oost en Lammerts, 2008).

In tabel 1 zijn de gemiddelde breedten van washoverkelen uitgezet tegen hun gemiddelde lengte. De dimensies van washoversystemen op Terschelling (Cupido's polder) en Ameland zijn onderling vergelijkbaar; op Schiermonnikoog zijn de dimensies van de washoversystemen groter (Ten Haaf en Buijs, 2008).

	Terschelling		Ameland	Schiermonnikoog	
	Boschplaat	Cupido's polder		voor aanleg na aanleg	stuifdijk stuifdijk
Breedte (m)	500-750	75	85	500	350
Lengte (m)	>1000	300-500	300-500	>1000	500-1000

Tabel 1: Dimensies van washoversystemen op verschillende eilanden. Bron: Ten Haaf en Buijs, 2008

De regelmatige aanvoer van zout water en zeezand zorgt voor een permanente pioniersvegetatie met een hoge biodiversiteit en natuurwaarde in de washovervlakte. Washovercomplexen kennen ondermeer (grote) zoet-zoutgradiënten, door de combinatie van duinen en het geregeld instromen van zout water (Ten Haaf en Buijs, 2008). Kenmerkend zijn jonge, kalkrijke, natte duinvalleien met een hoge dynamiek. Wanneer de inspoeling van (zout) zeewater en de inwaaiing van zand onderbroken wordt (bv. door de aanleg van stuifdijken) stopt daarmee ook het meegroeien met zeespiegelstijging en worden de pioniersvegetaties opgevolgd door secundaire vegetatie in de successie.

Vegetatie washoversysteem

Het milieu op de washovervlakte is hoogdynamisch door het open karakter en verstuiwing van zand wat door de washoverkeel de vlakte bereikt; daarnaast wordt bij overwash zout, kalkrijk water de vlakte opgebracht. Dit zeewater wordt geleidelijk aan weer zoet door menging met regen- en grondwater. Dit zorgt voor een hoogdynamisch milieu met een grote variatie aan (abiotische) condities. Op de washovervlakten zelf zijn vooral (in Nederland zeldzame) zoete en zoute pioniersvegetaties terug te vinden, doordat successie vertraagd en teruggezet wordt door de hoge dynamiek. Verder bevinden kwelders in actieve washovers zich vooral in vrij jonge successiestadia (Het Tij Geleerd, 2008) en zijn allerlei soorten algen- en microbiële matten aanwezig. De aanwezigheid van washoversystemen heeft, als onderdeel van een meer natuurlijk kustbeheer, (grote) invloed op een groter gebied dan alleen de washovervlakte zelf: het beïnvloedt ook de aangrenzende duinboogcomplexen en eilandstaarten.

Relatie Washovers en Kwelders

Er zijn twee typen washoversystemen te onderscheiden. Het eerste type loopt door tot aan de Waddenzee, met washoverafzettingen in de Waddenzee in de vorm van een lob/fan. Het tweede type washoversysteem eindigt in het duingebied. In de vroegste ontwikkelingsstadia van een washoversysteem worden afzettingen afgezet in de Waddenzee in de vorm van washoverdelta's. Het eerste type kan daarna overgaan in het tweede type, bijvoorbeeld wanneer een Waddeneiland zich naar het oosten uitbreidt (Ten Haaf en Buijs, 2008). De meeste washoversystemen van type

twee worden goed ontwaterd door de kwelderkreken die vanaf de wadkant tot in het washoversysteem zich insnijden. Ontwatering bevordert successie.

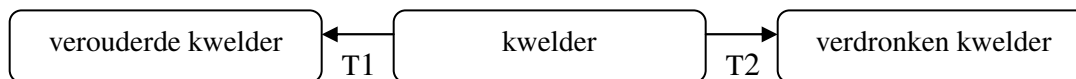
In actieve washovers bevinden de kwelders zich over het algemeen in vrij jonge successiestadia door het dynamische milieu en het lage gehalte aan slib in het kustwater (Het Tij Geleerd, 2008).

3. Kwelders

Kweldermorfologie

Wanneer het sedimentbudget op wadplaten positief is, kunnen aan de Waddenkant van de eilanden kwelders ontstaan. Kwelders zijn begroeide, buitendijks gelegen, zoute of brakke gebieden die voor het grootste gedeelte onder invloed staan van het getij. Door het afzetten van sediment tijdens hoogwater hoogt de kwelder zich richting het achterliggende duingebied op. Op de Waddeneilanden bevinden zich diverse kwelders langs de Waddenkust met parallel aan de Noordzeekust een washover. Zand en sediment worden (op kleine schaal) via de washover doorgegeven aan de kwelders langs de Waddenkust.

Transities van kwelders zijn op diverse manieren te definiëren. In het kader van dit onderzoek naar veerkracht is als bepalende factor gekozen voor zee-invloed. Wanneer de kwelder (of een hoog gelegen gedeelte niet meer onder invloed staat van het getij veroudert de kwelder (met hiermee samenhangende gevolgen voor vegetatie en biodiversiteit door successie) (Transitie 1, figuur 2). Wanneer zeespiegelstijging een bepaalde drempelwaarde overschrijdt kunnen kwelders dit (middels sedimentatie) niet meer bijhouden en zullen ze verdrinken (Transitie 2, figuur 2).



Figuur 2: transities tussen verschillende toestanden van een kwelder

Afhankelijk van de hoogte van de kwelder, overstroomt deze dagelijks of minder frequent. In de zone net boven het gemiddelde hoogwaterniveau bevinden zich pioniersoorten (b.v. zeekraal). Rond de kreken wordt zand afgezet. De oeverwallen die hierbij ontstaan, raken begroeid met typische oeverwalvegetatie (b.v. zoutmelde).

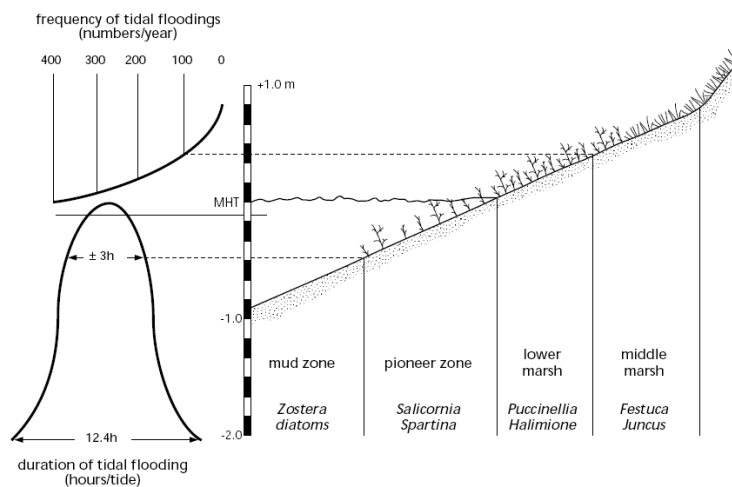
Kwelders worden begrensd door slikplaten aan de Waddenkant en meestal door dijken aan de eilandkant. De kweldervegetatie is typisch gezoned: verschillende soorten worden op verschillende (hoogte)delen van een kwelder gevonden. De kwelderkreken zijn belangrijk door hun drainagefunctie. Aan de Waddenkant kan een klif te zien zijn, ontstaan door erosie (Meijer, 2005).

De zonering van kweldervegetatie wordt beïnvloed door de overstromingsfrequentie en verandert door sedimentatie- en erosieprocessen. Het vermogen om stress door golven en getijde inundatie te weerstaan, de saliniteit van water en bodem, en de bodembeluchting bepalen het vóórkomen van bepaalde vegetatietypen richting de Waddenzee. Intra- en intersoortelijke competitie bepalen het vóórkomen landinwaarts (Janssen-Stelder, 2000).

Kweldervegetatie

De kweldervegetatie op de Waddeneilanden kan worden onderverdeeld in vier zones (Erchinger 1995; figuur 3). De eerste zone wordt gevormd door slikplaten met ééncellige algen, wieren en bacteriën (diatomen). De populatie zeegras (*Zostera*), die vroeger heel groot was op de slikplaten in het Waddengebied, is sterk

achteruitgegaan.ⁱⁱ De tweede zone is de pionierzone; deze zone wordt tweemaal daags overstroomd. De accumulatie van sediment is hoger dan op de slikplaten doordat de vegetatie de turbulentie van het water afremt (Janssen-Stelder, 2000). Soorten die hier voorkomen zijn ondermeer Engels slijkgras (*Spartina*) en Zeekraal (*Salicornia*). De derde zone is de lage kwelder. Doordat de vegetatie van de pionierzone voldoende sediment heeft ingevangen, overstroomt dit gedeelte van de kwelder niet meer dagelijks. De accumulatie is nog steeds hoog door een dichte vegetatie van ondermeer Kweldergras (*Puccinellia*) en Zoutmelde (*Halimione*). De vierde zone is de middenkwelder waar vooral Zwenkgras (*Fesuca*) en Zilte Rus (*Juncus*) gevonden wordt. De accumulatie van sediment is hier niet zo hoog als op lager gelegen delen van de kwelder door de lage overstroomingsfrequentie (Janssen-Stelder, 2000). Oost en Lammerts (2007) vatten de problematiek van de huidige kwelders als volgt samen: a) smalle kwelders met daardoor een afwezige zoet-zout gradiënt; b) veroudering door het overheersen van natuurlijke successie en daardoor het ontbreken van de complete reeks van pionier- naar climaxvegetatie; en c) afname van beweiding en daardoor het ontbreken van voldoende variatie in de structuur van de vegetatie. De combinatie van deze drie punten leidt tot een afname van de biodiversiteit.



*Figuur 3 : typische zonering van een kwelder in het Waddengebied.
Bron: Erchinger, 1985*

4. Klimaatverandering

Door klimaatverandering zal er verandering optreden in verschillende abiotische factoren, wat (mogelijk) een impact zal hebben op het hierboven gedefinieerde systeem. Factoren die in de literatuur vaak terugkomen zijn ondermeer de zuurgraad van het zeewater, temperatuur, neerslag, wind- en stormpatronen, golfhoogte en hoogte van de zeespiegel. Voor elk van deze factoren wordt aangegeven wat de (mogelijke) impact is.

Verzuring zeewater

Verzuring van zeewater als gevolg van klimaatverandering (IPCC, 2007) heeft geen invloed op de morfologie van een washovercomplex of kwelder. Daarnaast lijkt het er op dat de schelpkalkvoorraden in de Waddenzee en het zoete water dit effect sterk bufferen (Oost en Lammerts, 2008). De gevolgen voor het ecosysteem zijn echter nog niet duidelijk.

Stijging temperatuur

Een stijging van de temperatuur heeft geen invloed op de morfologie van een washovercomplex of kwelder. Wat betreft de bestaande kweldervegetatie wordt niet verwacht dat ze invloed ondervindt van temperatuurstijging, omdat ze al gewend is aan een hard klimaat met ondermeer extreme temperaturen (Brouns, 1992, CPSL, 2001). Onderzoek bevestigt ditⁱⁱⁱ. Een effect wat wel optreedt en verder zal optreden is de introductie van exoten, voor welke met een stijging van de temperatuur de noordgrens van hun voorkomen opschuift.

Voor de situatie in de duinen wordt meer droogtestress verwacht, waardoor de begroeiing afneemt (meer kale grond) en de natuurlijke grondwateraanvulling toeneemt (Witte et al, 2008; De Leeuw en Grootjans, 2008).

Toename neerslag

Voor een toename in neerslag zijn geen morfologische gevolgen bekend voor washoversystemen of kwelders. Bij een grotere hoeveelheid neerslag zal echter de nitraatdepositie toenemen, waardoor de van oorsprong droge en voedselarme duinmilieus een (verhoogde) kans op vergrassing en vervuiling lopen (Stevens *et al*, 2004; Veer, 1997). Bovendien doen nieuwe soorten hun intrede (Veer en Kooiman 1997). Voor een verhoging van de hoeveelheid neerslag zelf is geen effect aangetoond bij kweldervegetaties (zie hiervoor voetnoot 3).

Bij een verhoogde afvoer van de rivieren in de Waddenzee, door een toename in neerslag, zal de saliniteit van de Waddenzee dalen. Hierdoor worden op het moment al meer brakke soorten aangetroffen op kwelders (K. Dijkema, pers. comm 03 mrt 09).

Verandering wind- en stormklimaat

In een assessment studie beschrijft Vellinga *et al* (2008) dat de modellen voor het laatste kwart van de 21^e eeuw slechts een lichte toename in extreme windsnelheden in de zuidelijke Noordzee geven; bovendien betreffen die zuidwestelijke winden die niet relevant zijn voor extreme stormvloedhoogte langs de Nederlandse kust (Van den Hurk *et al*, 2007).

Een toename in de frequentie en hevigheid van stormen zal door een verhoogde golfimpact de reeds bestaande (klif)erosie van de kwelders vergroten (CPSL, 2001). Uit de literatuur is verder gebleken dat de oorzaak voor de toegenomen horizontale erosie een combinatie is van weersinvloeden (toegenomen frequentie en sterkte van stormen), toegenomen vloedhoogte en verhoogde golfslag. Deze factoren zijn in het verleden beïnvloed door de mens, onder andere via landaanwinning, kustverdediging en kanalisering wat geleid heeft tot veranderingen in de zeestroming.

Versnelde zeespiegelstijging

Over de directe effecten van versnelde zeespiegelstijging op de zandbalans voor de kust bestaan verschillende theorieën die vooral verschillen in het voorspellen van de herverdeling van het zand dwars op de kust, en niet op de zandbalans van het kuststelsel. De grootste indirecte effecten op de zandbalans komen tot stand door veranderingen in het zandtransport langs de kust (kusterosie), door de zandvraag van de Waddenzee (b.v. Mulder, 2000; Louters en Gerritsen, 1994). Bovendien leidt versnelde zeespiegelstijging tot hogere frequentie in overwash. Over de afgelopen 120 jaar was er ten noorden van IJmuiden een terugtrekking van de laagwaterlijn van 0.5-0.6 m (/jaar), waarvan 0.1-0.2 m (/jaar) wordt veroorzaakt door een direct effect van zeespiegelstijging op de kustlijn. Het overige gedeelte wordt veroorzaakt door sedimenthonger van de Waddenzee. Bij een zeespiegelstijging van 60 cm/eeuw wordt een extra gemiddelde jaarlijkse terugtrekking verwacht van 1-2 m/jaar.

Bij zeespiegelstijging stijgt de zoutgrens in het duingebied; dit drukt de zoetwaterbel omhoog, met een hogere grondwaterspiegel als gevolg. In de zomer droogvallende duinvalleien kunnen veranderen in (permanente) duinmeren; bovendien kunnen nieuwe natte duinvalleien ontstaan. Ook leidt een hogere grondwaterspiegel tot een vegetatieveranderingen in de lagere duinvalleien (Essink *et al*, 2005).

Effecten van versnelde zeespiegelstijging op kwelders kunnen zich op twee manieren manifesteren: 1) erosie aan de wadkust in combinatie met verhoogde accumulatie van sediment en landinwaartse migratie van kweldervegetatie zones, en 2) interne achteruitgang en kwelderverdrinking (Bromberg Gedan, 2008). De gemiddelde jaarlijkse opslibbing in de kwelderzone aan de wadkant van de eilanden is ongeveer 3-8 mm (Oost en De Haas, 1993, in Louters en Gerritsen, 1994); het is echter niet duidelijk of deze data opgevat kunnen worden als grenswaarde om een versnelde zeespiegelstijging te kunnen compenseren (Louters en Gerritsen, 1994). Dijkema *et al* (1990) noemt een versnelde zeespiegelstijging van 5-10 mm/jaar als grenswaarde; Essink *et al* (2005) geeft voor kwelders 8,5 mm/jaar en voor de pionierzone 3-6 mm/jaar. In het worst-case scenario van CPSL (2001) (50 cm zeespiegelstijging in 2050) wordt voor de kwelders met een lage opslibbing verwacht dat ze beginnen te verdrinken (zie tabel 2).

De meeste kwelders kunnen een versnelde zeespiegelstijging bijhouden door een combinatie van opslibbing en plantengroei. Dit geldt echter niet voor de pionierzone. De pionierzone is het meest kwetsbaar doordat er minder bescherming is voor het afgezette sediment door de geringe bodembedekking. Wanneer de pionierzone erodeert ontstaat een hoogteverschil met de lage kwelder, wat leidt tot kliferosie en terugtrekking van de kwelder landinwaarts (Dijkema *et al*, 1995, Orson *et al*, 1985). Een kleine toename in de snelheid van zeespiegelstijging zal een positieve invloed hebben op de soortenrijkdom van kwelders, door een vergroting van het areaal wat onder invloed van het getij onder water staat. Dit effect is vooral van belang vanaf een zeespiegelstijging van 25 cm tot 2050.

	Verandering in 2050 ten opzichte van 2001			Opmerkingen
	10cm/50jr	25cm/50jr	50cm/50jr	
Kwelderopslibbing (hoogte)	+0.5-+2.5 cm/jr	0-+2.5cm/jr	-0.5-+0.5 cm/jr	In worst-case scenario minder opslibbing en mogelijk verdrinking
kwelder kliferosie	0-2 m/jr	0-2 m/jr	0-4 m/jr	Grote lokale verschillen
kweldersoortdiversiteit	0 tot +	+	+	

Tabel 2: overzicht van enkele verwachte geomorfologische verandering onder drie scenario's voor zeespiegelstijging. Bron: CPSL, 2001

Een combinatie van stijgende grondwaterstand (door zeespiegelstijging) en een toename van de hoeveelheid neerslag (ondermeer nitraatdepositie) heeft invloed op de verstuiwing van zand: bestaande verstuiwingen groeien sneller dicht en er ontstaan minder nieuwe.

Meer frequente en langer durende inundatie, door een combinatie van verhoogde stormfrequentie en zeespiegelstijging, zal leiden tot een meer typisch kweldervegetatie. Ook de typische morfologie van kwelders (kwelderkreken en zoute pannen) zal gestimuleerd worden: dit zorgt voor een vergrootte variatie in habitats op de kwelder (CPSL, 2001). Dit vooral op de hogere delen van een kwelder.

Overige (mogelijke) impacts:

De effecten van *gaswinning* voor de kwelders zijn vergelijkbaar met die van zeespiegelstijging, maar is een extra verstoring er bovenop (Dijkema, 1997). Ook reageren de kwelders op dezelfde manier op bodemdaling door gaswinning als op (versnelde) zeespiegelstijging. Het effect van gaswinning treedt op tot ongeveer 3 jaar na het onttrekken van gas aan de bodem.

Door het *onttrekken van grondwater* en *verbeterde drainage* verdrogen de natte duinvalleien (en daarmee de natte ecotopen) en raken de pioniersvegetaties in vochtige duinpannen op de Waddeneilanden in successie. (Van Dijk, 1993)

Door de *aanleg van stuifdijken* (in het verleden) werd een groot deel van de aanwezige dynamiek te niet gedaan.

5. Veerkracht

Definiëring

De Bruijn (2005) onderscheidt twee definities van veerkracht zoals gebruikt in de literatuur: 1) het vermogen van een systeem om onder verstoring zijn meest belangrijke processen en karakteristieken te behouden, en 2) het vermogen van een systeem om terug te keren naar zijn evenwicht na een reactie op verstoring. Met 'reactie' wordt in dit geval de impacts van de verstoring op het systeem bedoeld; het systeem 'beweegt' door de verstoring (b.v. er ontstaat schade, processen worden verstoord, etc.). Impactbeperkende processen die in gang gezet worden, zoals bij homeostasis en buffering, worden hiermee niet bedoeld. Systemen die niet reageren op verstoring (resistentie) hebben alleen volgens definitie 1 voldoende veerkracht, systemen die reageren op verstoring maar naar hetzelfde evenwicht terugkeren hebben bij beide definities voldoende veerkracht. Definitie 2 heeft binnen definitie 1 meer te maken met stabiliteit.

Uit de analyse van verstoring door klimaatverandering blijkt dat vooral intensiteit en frequentie van al aanwezige processen en karakteristieken die respectievelijk het washoversysteem en de kwelder bepalen, zullen veranderen. Mogelijk risico is dat de processen onderling uit evenwicht raken, en hiermee het betreffende systeem degenereert (kwelder) of ophoudt te bestaan (kwelder, washoversysteem). Het doel op langere termijn is echter dat het systeem blijft bestaan en bijdraagt aan een hoge natuurwaarde (van het Waddeneiland). Een tijdelijke verstoring is hiervoor niet noodzakelijk een probleem. Om deze reden is voor deze studie gekozen voor een definitie van veerkracht in lijn met de tweede hierboven genoemde definitie: veerkracht is het vermogen van een systeem om te herstellen tijdens en/of na een reactie op verstoring. Hierbij is het niet nodig dat het systeem terugkeert naar hetzelfde evenwicht waarin het zich voor de verstoring bevond (bv. in areaalgrootte). De indicatoren voor veerkracht van de washover- en kweldermorfologie (zie Indicatoren Veerkracht) zijn gebaseerd op areaalgrootte, waarbij een vergroting van het areaal positief is.

De respons en het herstel van een systeem op verstoring reflecteert haar veerkracht. Om de veerkracht van een systeem te kunnen bepalen (kwantificeren) zijn indicatoren nodig voor alle aspecten die de respons en het herstel van het systeem op verstoring bepalen (De Bruijn, 2005). Om de veerkracht van een systeem te bepalen, dient dus zowel de configuratie van een systeem bekend te zijn, als ook de verstoring die van belang is (Carpenter *et al*, 2001).

Karakteristieken

In de literatuur worden zes karakteristieken van veerkracht onderscheiden voor natuurlijke systemen (Barnett, 2001; Dessai en Van der Sluijs, 2008). In dit

hoofdstuk worden deze karakteristieken kort toegelicht en voor washoversystemen en kwelders verder uitgewerkt.

Homeostasis Een systeem houdt zichzelf in stand door middel van interne (stabiliserende) terugkoppelingen. Deze terugkoppelingen signaleren veranderingen en initiëren respons. De veerkracht van een systeem wordt vergroot wanneer alle terugkoppelingen effectief worden doorgegeven);

Washover

Wanneer overwash optreedt wordt gedurende stormperiodes water en zand door openingen in de duinenrij het eiland getransporteerd. Bij (versnelde) zeespiegelstijging kan het eiland dit door accumulatie van sediment (gedeeltelijk) compenseren; bovendien verplaatst het eiland zich landwaarts.

Door de aanwezigheid van washovers kan de vegetatie in het gebied wat onder invloed staat van het zand- en zout watertransport (hoge dynamiek) zich niet ontwikkelen tot een climaxvegetatie. Successie is een bedreiging voor de (gewenste) biodiversiteit.

Microbiële matten in de washoverkeel en -vlakte zorgt voor een verminderde erosie tijdens overwash of harde wind en vertraagt de vegetatiesuccessie (Ten Haaf en Buijs, 2008).

Door middel van erosie wordt de washoverkeel verbreed (en verdiept) en wordt het effect van aanzanding teniet gedaan. Dit voorkomt het dichtslibben van de washoverkeel.

Bij droogte groeit het aandeel kale grond en neemt de grondwateraanvulling toe (minder verdamping door vegetatie). Een grotere zoetwaterbel vermindert de kwel van zout water.

Washoversystemen kunnen zowel met een aangroeiende als afslaande kust meegroeien; hierbij behoudt de washover zijn vorm en dimensie.

De dynamiek die in stand blijft bij de aanwezigheid van washovers, zorgt er tevens voor dat er minder vegetatieontwikkeling is, waardoor de dynamiek hoog blijft.

Kwelder

Bij versnelde zeespiegelstijging wordt de inundatietijd vergroot. Hierdoor is er een grotere sedimentaccumulatie op de kwelders, waardoor de kwelders sneller ophogen. Hierdoor verkleint de inundatietijd weer tot een nieuw (dynamisch) evenwicht (b.v. CPSL, 2005).

Vegetatie verlaagt de locale stroomsnelheid van het water en verhoogt de sedimentatie; dit leidt weer tot hogere plantengroei (door combinatie van verhoogde nutriëntenbeschikbaarheid en bodemhoogte) (Morris *et al*, 2002). Dit geldt eerder voor de lage en midden kwelders dan voor de hoge, doordat de vegetatie op een hoge kwelder minder productief is bij inundatie en minder snel ophogen (Bromberg Gedan, 2008).

Omnivory: Verstoringen van buiten het systeem worden opgevangen door een diversificatie van (hulp)bronnen en -middelen: vitale functies zijn dan afhankelijke van een ruim aanbod van verschillende bronnen en middelen.

Kwelder

Kwelders in een washoversysteem krijgen slib vanuit de Waddenzee en indien natuurlijke processen toegelaten worden, zand vanaf het eiland (eolisch transport). Beide vormen van sediment hogen de kwelder op (Brouns, 1992).

High flux: Een hoge flux van (hulp)bronnen door het systeem verzekert een snelle mobilisatie van deze bronnen om verstoring het hoofd te kunnen bieden; meer in het algemeen: een systeem kan snel reageren op verandering.

Kwelders

De hoge mobiliteit van sediment zorgt ervoor dat in het Waddengebied (natuurlijke) fluctuaties en verstoringen opgevangen worden. Dit mechanisme zorgt ervoor dat,

onder een kritische grens, kwelders (versnelde) zeespiegelstijging opvangen door op te hogen.

De hoge dynamiek binnen een actieve washover zorgt ervoor dat de kwelders zich over het algemeen in een vrij jong successiestadium bevinden (Het Tij Geleerd, 2008). Door de hoge dynamiek is er weinig tijd voor successie; bovendien is het gehalte slib in het kustwater laag.

Hoge dynamiek is ook op een ander punt van belang: getijdenwater en stormvloed en zorgen voor een goede verspreiding van zaden en dus van plantensoorten.

Flatness: De hiërarchische structuur van het systeem dient niet top-zwaar te zijn; dergelijke systemen zijn minder flexibel en dus minder in staat om te gaan met onverwacht gedrag van het systeem.

Washover

Vooraf in een pionierstadium is het voedselweb erg vlak; een dynamisch milieu zorgt ervoor dat het systeem steeds opnieuw teruggezet wordt naar een pionierstadium.

Buffering: Dit principe verwijst naar een overschot (of tekort) binnen systemen, waarbij systemen met een capaciteit die de vraag overstijgt zijn op momenten dat er (plotseling) meer vraag is, meer veerkrachtig zijn.

Washover

Washovers met een brede keel kunnen niet volledig dichtstuiven bij een aantal aaneengesloten stormarme jaren.

Zoet water wordt vastgehouden in het systeem door middel van een zoetwaterbel onder het eiland. Deze bel wordt aangevuld bij een positieve grondwateraanvulling.

Redundantie: In- en uitwisselbaarheid van functies: wanneer een functie uitvalt kan een andere zijn taak overnemen.

Voor dit principe zijn geen uitwerkingen gevonden binnen washoversystemen en kwelders.

6. Indicatoren veerkracht

Het doel van deze studie is om tot een set van indicatoren te komen die de veerkracht van het systeem kwalitatief beschrijven. Met behulp van deze indicatoren is het bijvoorbeeld mogelijk diverse ingrepen tegen elkaar af te wegen op hun bijdrage aan de veerkracht van het washoversysteem en de kwelder. Indicatoren dienen aan enkele voorwaarden te voldoen (De Bruijn, 2005): ze dienen begrijpelijk te zijn, kwantificeerbaar en eenduidig. Vereisten waaraan de indicatoren moeten voldoen zijn:

- de indicator moet voor zowel grote als kleine washoversystemen en kwelders geschikt zijn en niet slechts op de Waddeneilanden maar voor deze systemen in het algemeen.
- alle maatregelen en veranderingen in het systeem die een reactie van het systeem op klimaatstress geven, beïnvloeden ook de (waarde van) de indicator(en)

Washover

Dimensies washoversysteem: Factoren die van invloed zijn op de dimensies van een washoversysteem zijn 1) de breedte van de washoverkeel- bij een bredere keel worden afzettingen van het washoversysteem minder zuidelijk op het eiland teruggevonden (Ten Haaf en Buijs, 2008); 2) de hoogte van de washoverkeel bepaalt de overstromingsfrequentie cq. de frequentie aan overwash. Overwash verhindert het aanzanden van de washoverkeel en -vlakte en verwijdert eventuele drempels (Ten Haaf en Buijs, 2008). Hiermee verband houdt de hoogte van het

strand voor de washoverkeel: ook bij een hoger gelegen strand vindt minder overwash plaats; 3) stuifdijken en hiermee samenhangend verlies aan dynamiek hebben negatieve impact op de dimensies van een washoversysteem; 4) de onderlinge afstand tussen washoversystemen heeft verband met de grootte ervan: bij brede washoverkelen bestaat er meer afstand tussen aangrenzende washoversystemen (Ten Haaf en Buijs, 2008).

Twee indicatoren die de veerkracht van washoversystemen kwalitatief goed beschrijven zijn 1) de breedte van de washoverkeel 2) vegetatie in de washoverkeel

1) De breedte van de washoverkeel

Voor de washoversystemen in het Waddengebied valt de breedte van de washoverkeel binnen een bepaalde range (zie tabel 1). Wanneer de washoverkeel te smal is kan hij bij voldoende aanzanding of te geen/weinig overwash tijdens een aantal stormarme jaren gemakkelijker dichtstuiven dan een brede washoverkeel. Een evenwichtsreactie is dat een smalle washoverkeel gemakkelijk kan verbreden door een hogere stroomsnelheid in de washoverkeel tijdens overwash. De maximale breedte van een washoverkeel wordt ondermeer in stand gehouden door aanzanding. Aan de breedte van de washoverkeel kan (over enkele jaren gerekend) afgelezen worden in welke staat de washover zich bevindt: te smal door aanzanding of te weinig overwash of niet duurzaam door de aanwezigheid van andere washoversystemen in de buurt. (Relatief) te brede washoverkelen zanden aan naar een zeker (dynamisch) evenwicht toe.

Factoren die van invloed kunnen zijn op de breedte van de washoverkeel zijn 1) de breedte van het voorliggende strand; op een breed strand zal meer verstuiwing optreden wat de vorming van primaire duintjes op het strand tot gevolg kan hebben en de washoverkeel sneller dicht kan laten stuiven (Matias *et al*, 2007, Ten Haaf en Buijs, 2008). 2) De aanwezigheid van stuifdijken; stuifdijken hebben een negatieve invloed op de breedte van een washoverkeel. Stuifdijken kunnen de dynamiek verminderen met als gevolg vegetatieontwikkeling en het dichtstuiven van een washoverkeel. Op Schiermonnikoog werden washovers een factor 3 kleiner na aanleg van een stuifdijk (Ten Haaf en Buijs, 2008). 3) Andere factoren die van invloed zijn op de breedte van de washoverkeel zijn (Ten Haaf en Buijs, 2008) verschil in zandaanbod (natuurlijk –eolisch transport- en kunstmatig –zandsuppleties) en de aanwezigheid van vegetatie in de washoverkeel en -vlakte.

2) Vegetatie in de washoverkeel

Vegetatie in de washoverkeel is de belangrijkste indicator voor de afwezigheid van overwash en daarom van duinontwikkeling. Vegetatie vermindert de dynamiek in de washoverkeel (en indien ook aanwezig op de washovervlakte ook meer landinwaarts) en bevordert aanzanding en dus het dichtstuiven van de washoverkeel. De afwezigheid van vegetatie is dus een indicator voor een gezond washoversysteem (Matias *et al*, 2007).

De afwezigheid van overwash kan meerdere oorzaken hebben: ondermeer een verandering in wind- en stormklimaat, de hoogte van het voorliggend strand of de washoverkeel. Een specifiek geval is het bestaan van microbiële matten op het voorliggend strand en in de washoverkeel. Microbiële matten stabiliseren het sediment en voorkomen dus (gedeeltelijk) het optreden van erosie (De Leeuw en Grootjans, 2008) en voorkomen door vegetatiesuccessie ondermeer de aanmaak van (voor hogere planten) veel toxisch sulfide. Vooral bredere washovers zijn geschikt voor de ontwikkeling van microbiële matten door de lage stromingssnelheid van het water en de mogelijkheid tot stagnatie (Ten Haaf en Buijs, 2008).

Kwelder morfologisch

Dimensies Kwelder: Factoren die van invloed zijn op de dimensies van een kwelder zijn 1) sedimentatie (en erosie); sedimentatie zorgt ervoor dat de kwelder opslibt. Er is een negatief terugkoppelingsmechanisme tussen de hoogte van de kwelder en sedimentatie (zie figuur 3): door sedimentatie hoogt de kwelder op en vermindert de overstromingsfrequentie – en duur (De Leeuw en Grootjans, 2008). Wanneer de pionierzone opslibbing van de kwelder niet bij kan houden kan de kwelder afkalven door kliferosie; 2) duur en frequentie van overspoeling; deze factor is afhankelijk van de kwelderhoogte - de kwelderhoogte zal zich in de tijd naar een evenwichtshoogte toewerken (Allen, 1992); 3) afwatering en aëratie (De Boer en Wolff, 1996)

Overige factoren zijn vegetatiestructuur (Esselink, 2000) en de aanwezigheid van barrières in het achterland die kunnen voorkomen dat bij een (versnelde) zeespiegelstijging de kwelder zich landinwaarts verplaatst en zo zijn dimensies behoudt.

Bij een zeer hoge kwelder kan erosie optreden van (een deel van) de kwelder, waarbij de cyclus van sedimentatie en vegetatiegroei vanaf de pionierzone weer opnieuw kan beginnen (Dijkema *et al*, 2005). Een afzonderlijke kwelder kan dus op een bepaald niveau in deze cyclus staan, voor een totaal aan kwelders in een watersysteem dient er echter een evenwicht te zijn. Voor een afzonderlijke kwelder geldt dat er een evenwicht dient te zijn in de diversiteit in vegetatiezones en –typen (Dijkema *et al*, 2005).

Twee indicatoren die de veerkracht van kwelders kwalitatief goed beschrijven zijn 1) verticale sediment accumulatie 2) aantal barrières landinwaarts

1) Verticale sedimentaccumulatie

De verticale sedimentaccumulatie is de snelheid waarmee de kwelder zichzelf ophoogt door het invangen van sediment tijdens inundatie. Wanneer de verticale sediment accumulatie gelijk of hoger is dan de zeespiegelstijging (in combinatie met bodemdaling) groeit de kwelder(zone) mee.

Factoren die van invloed zijn op de verticale sedimentaccumulatie zijn 1) de hoogte van de kwelderzone (die de inundatiefrequentie en –duur bepaalt, zie figuur 3); 2) de vegetatie van een kwelder van essentieel belang voor sedimentatie: vegetatie verhoogt de opslibbingsnelheid, verbetert het kerkenstelsel wat successie bevordert, en gaat erosie tegen (Dijkema *et al*, 2008); 3) de afstand tot sedimentbronnen (wad en krekens) (Esselink *et al*, 1998, Esselink, 2000 4) de transportcapaciteit van het water (De Leeuw en Grootjans, 2008)

2) Aanwezigheid barrières landinwaarts

In een natuurlijke situatie kunnen kwelders landinwaarts opschuiven bij (versnelde) zeespiegelstijging door verticale ophoging van de midden en hoge kwelder. Verlies aan kwelderareaal door kliferosie aan de lage kwelder kan dan gecompenseerd worden met uitbreiding van de kwelder landinwaarts.

De aanwezigheid van barrières landinwaarts is dus een indicatie voor de veerkracht van kwelders om hun areaalgrootte te behouden bij zeespiegelstijging.

Kweldervegetatie

Voor de fauna in het Waddengebied is vrijwel geen nauwe relatie tussen abiotische factoren en levensvoorwaarden gevonden (Louters en Gerritsen, 1994); de hoge dynamiek zorgt voor een grote variatie waaraan de organismen aangepast zijn. Hierdoor zijn de ecologische gevolgen van klimaatverandering voor organismen waarschijnlijk gering.

Twee indicatoren worden gegeven voor de veerkracht van kweldervegetatie. Deze zijn enerzijds gebaseerd op een minimumareaal en anderzijds op een score op een maatlat referentie voor kwelderkwaliteit, ontwikkeld door Dijkema en anderen (Dijkema *et al* 2005). Deze maatlat is gebaseerd op evenwichtigheid in het voorkomen van de verschillende vegetatiezones.

Twee indicatoren die de veerkracht van kweldervegetatie kwalitatief goed beschrijven zijn 1) kwelderareaal en 2) score kwelderkwaliteit

1) Kwelderareaal

Dijkema *et al* (2005, 2008) hebben een minimumareaal gedefinieerd per (deel)waterlichaam (de zandige eilandkwelders liggen in twee deelwaterlichamen: Waddenzee west van wantij Terschelling en Waddenzee oost van wantij Terschelling) van 500 ha. Dit minimum areaal is noodzakelijk vanwege de kwetsbaarheid van kleine locaties, het behoud van de biodiversiteit en om verjonging door cyclische ontwikkeling mogelijk te maken (Dijkema *et al*, 2008). Deze grootte is gebaseerd op een 'expert judgement' (Dijkema, pers. comm.).

Aannames hierachter zijn tweeledig (Dijkema *et al*, 2005): 1) de vegetatiezones pionier, laag, midden en hoog komen op evenwichtige wijze voor in het waterlichaam en 2) de climaxvegetaties mogen niet domineren binnen de vegetatiezone waarin ze thuishoren.

2) Score kwelderkwaliteit

De kwelderzones representeren niet alleen verschillende hoogten binnen een kwelder, maar ook de ontwikkeling van de kwelder in het proces van successie. Binnen een kwelder spelen maar een beperkt aantal soorten een rol, vandaar dat in Dijkema *et al* (2005) gekozen is voor vegetatiezones als representant van de vegetatiekundige opbouw van kwelders. Verschillende kwelderzones worden gewaardeerd op het percentage wat ze beslaan van het totale kwelderlichaam. Grenswaarden zijn 5% tot 35 (5 zones) - 40% (4 zones); ligt het percentage tussen de grenswaarden, dan krijgt de zone een beoordeling goed (1), wanneer het percentage buiten de grenswaarden ligt krijgt het de beoordeling slecht (0). Daarnaast mag het areaal Strandkweek maximaal 50% van het areaal zone hoog bedragen (1). Wanneer deze climaxvegetatie domineert (>50%) scoort hij 0. De totaalscore geeft een beoordeling van de kwaliteit, van Potentiële Referentie (P-REF) en Potentiële Goede Ecologische Toestand (P-GET) tot ontoereikend en slecht.

beoordeling kwaliteit	max. score 5	max score 6
P-REF	5	6
P-GET	4/3	5/4
Matig	2	3/2
Ontoereikend	1	1
Slecht	0	0

Tabel 3: Beoordeling scores kwelderkwaliteit. Bron: Dijkema *et al*, 2005

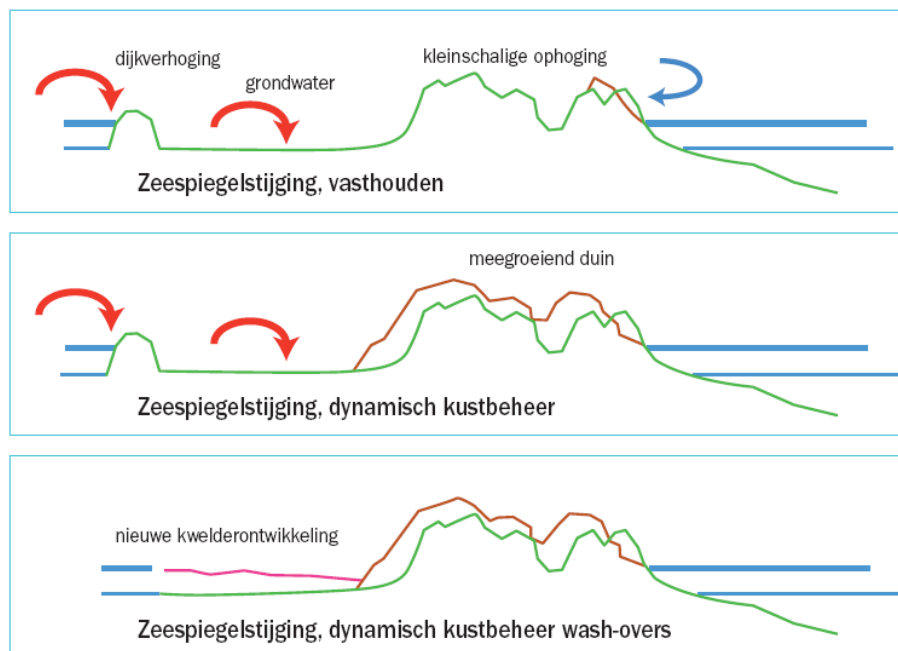
7. Veerkracht Waddeneilanden en Waddenzee

Washoversystemen en kwelders hebben zelf ook een functie in het verhogen van de veerkracht van het Waddeneiland. In figuur 4 is inzichtelijk gemaakt hoe bij een meer natuurlijk beheer washoversystemen en kwelders bijdragen aan een positief sedimentbudget van het Waddeneiland. Stuivend zand en zand van de Noordzee wat door overwash het eiland op gebracht wordt, zorgt ook ver landinwaarts voor

ophoging van het eiland, en vergroot zo de veerkracht van het eiland tegen zeespiegelstijging (CPSL, 2001, 2005). Deze bijdrage is alleen substantieel als de dynamiek op grote schaal hersteld wordt (bijvoorbeeld door het volledig verwijderen van stuifdijken) (Dijkema, pers. comm 03 mrt 09).

Het stimuleren van dynamiek door middel van overwash in combinatie met zandsuppleties en actief duinbeheer zal ook bij afwezigheid van of een lage versnelling in zeespiegelstijging leiden tot het herstel van de veerkracht van het Waddeneiland; wanneer dit op grote schaal gebeurt, zal dit een aantal uitgestorven biotopen (vooral dieren in de top van de voedselketen) herstellen (Het Tij Geleerd, 2008). Veroudering van duinvegetaties kan worden tegengegaan door het herstellen van grootschalige dynamiek op de Waddeneilanden; hierdoor komt de volledige range van pionier- tot climaxvegetaties in de duinen weer terug. Om deze dynamiek tot stand te brengen dienen de stuifdijken (gedeeltelijk) te verdwijnen en bestaande duinen, duinvalleien en strandvlaktes afgeplagd te worden (Het Tij Geleerd, 2008).

Kwelders dragen bij aan de veiligheid van het eiland doordat ze de golfenergie opnemen en dus de impact op de dijk of het eiland van golven bij storm verkleinen. Bij dijkbreuk voorkomt de aanwezigheid van een kwelder dat met het getij water het eiland instroomt en het gat zich verbreedt en verdiept (CPSL, 2001). Wanneer waddijken verwijderd worden, kan de kwelderontwikkeling ook verder landinwaarts plaatsvinden en hoogt door sedimentatie ook hier het eiland op.



Figuur 4: Effect van een meer dynamisch kustbeheer op het sedimentatiebudget van Waddeneilanden. Bron: Bas Arens Duinonderzoek

Vergeleken met de zandhonger van de Waddenzee, óók bij een versnelling van de zeespiegelstijging, is het zandaanbod van de Noordzeekust van de Waddeneilanden oneindig groot. Wanneer kustbeheer zich richt op erosiecompensatie (door middel van zandsuppleties) en de eilanden niet langer vastlegt, kunnen de eilanden als zandbronnen blijven functioneren (Louters en Gerritsen, 1994). Een belangrijke indicator voor de veerkracht van Waddeneilanden tegen met name zeespiegelstijging, over een grotere tijdsperiode, lijkt hun sedimentbudget te zijn.

8. Knikpunten

De mate van zeespiegelstijging dat kan worden gecompenseerd door extra sedimentatie voor wadplaten hangt samen met de grootte van het getijdebekken. Hoe groter het getijdebekken, hoe lager het kritische punt in zeespiegelstijging. Voor het Nederlandse gedeelte van de Waddenzee wordt voor grote bekkens een kritische grens van 30 cm/eeuw aangehouden en voor kleine bekkens 60 cm/eeuw. Boven deze kritische grens beginnen wadplaten te verdrinken. Daarnaast geven modeluitkomsten een relatieve daling van max. 20 cm. voor wadplaten aan in het jaar 2050 (Essink *et al*, 2005). Het kritische punt in zeespiegelstijging voor eilandkwelders is 0.5-1 m/eeuw, voor de pionierzone 30-60 cm/eeuw. Wanneer de wadplaten door middel van vergrootte sedimentatie zeespiegelstijging niet kunnen compenseren zal de waterdiepte vóór de kwelders vergroten. Dit kan een effect hebben op de golfhoogte van golven die de kwelder bereiken, en kliferosie stimuleren. (CPSL, 2001). Op langere termijn zal verdieping of zelfs verdrinking van de wadplaten gevolgen hebben voor kwelderaanwas; i.e. zonder natuurondersteunende technieken zal er geen kwelder(uitbreiding) meer bestaan.

Bijlage I: Effecten klimaatverandering in relatie tot indicatoren

Morfologie Washover en klimaatverandering

verstoring a.g.v. klimaatverandering	gedifferentieerd	effect op morfologie washoversysteem	wat heeft het met karakteristieke veerkracht temaken	hoe te vangen in indicator veerkracht	mogelijke ingreep
verzuring zeewater	geen				
stijging temperatuur	geen				
toename neerslag	geen?				
toename frequentie en hevigheid stormen	meer kusterosie	erosie verbreedt de washoverkeel	homeostasis	keelbreedte	
versnelde zeespiegelstijging	meer kusterosie	- erosie verbreedt de washoverkeel - bij sterke erosie van de kustlijn kunnen systemen geheel verdwijnen of overgaan in strandvlakte	homeostasis, buffering	keelbreedte	zandsuppleties
	hogere frequentie overwash (aanvankelijk)	- washovervlakte zal vergroten		keelbreedte	n.v.t. (is positief effect)
	hogere grondwaterspiegel, meer (zoute) kwel (nakijken)	nieuwe natte duinvalleien			
gecombineerd effect toename neerslag en versnelde zeespiegelstijging	stijging grondwaterstand en toename neerslag (nitraatdepositie)	bestaande verstuingen groeien dicht, afname aantal nieuwe verstuingen		vegetatie in washovermond	begrazen, maaien, plaggen
overige verstoringen					
aanleg stuifdijken	verhinderen washovervorming, verminderen dynamiek	aanzanding: dichtstuiven washoverkeel, geen overwash	homeostasis, flatness, buffering	keelbreedte	verwijderen stuifdijken
gaswinning	extra zandhonger bovenop klimaatverandering	lokaal bodemdaling, erosie noordkust		keelbreedte	zandsuppleties, stoppen gaswinning

Morfologie kwelder en klimaatverandering

verstoring a.g.v. klimaatverandering	gedifferentieerd	effect op morfologie kwelder	wat heeft het met karakteristieken veerkracht temaken	hoe te vangen in indicator veerkracht	mogelijke ingreep
verzuring zeewater	geen				
stijging temperatuur	geen				
toename neerslag	toename zoet water in Waddenzee (rivierafvoer)	afname saliniteit			
toename frequentie en hevigheid stormen	verhoogde golfimpact kwelderranden	(vergrootte) kliferosie, afname kwelderareaal		verticale sediment accumulatie	natuurondersteunende technieken, intensivering afwatering, kwelderverdediging
versnelde zeespiegelstijging	- inundatie hoger gelegen gedeelte	ophoging hogere kwelderzones, landinwaartse migratie	homeostasis, high flux	aanwezigheid barrières landinwaarts, verticale sediment accumulatie	verwijderen waddijken, teruggave polders, verbeteren afwatering
	- verhoogde inundatietijd	- verhoogde sedimentatie	homeostasis, high flux	verticale sediment accumulatie	verwijderen waddijken, teruggave polders
gecombineerd effect verhoogde stormfrequentie en versnelde zeespiegelstijging	frequentere en langere inundatie	toename opslibbing, stimulatie kweldermorfologie	homeostasis, high flux	verticale sediment accumulatie	n.v.t. (is positief effect)
overige verstoringen					
gaswinning	extra bodemdaling, hogere relatieve zeespiegelstijging	verhoogde sedimentatie, ophoging hogere kwelderzones, landinwaartse migratie	homeostasis, high flux	aanwezigheid aantal barrières landinwaarts, verticale sediment accumulatie	verwijderen waddijken, teruggave polders

Vegetatie kwelder en klimaatverandering					
verstoring a.g.v. klimaatverandering	gedifferentieerd	effect op vegetatie kwelder	wat heeft het met karakteristieke veerkracht te maken	hoe te vangen in indicator veerkracht	mogelijke ingreep
verzuring zee water	geen				
stijging temperatuur	introductie exoten	introductie nieuwe soorten		score kwelderkwaliteit	beweiding en begreppeling ^{iv}
toename neerslag	toename rivierwater afvoer, afname saliniteit Waddenzee ^v	introductie brakwaterplanten, zoutwaterplanten zullen niet verdwijnen ^{vi}		score kwelderkwaliteit	vnl. positief, bij overlast begrazing
toename frequentie en hevigheid stormen	-afname kwelderareaal door kliferosie -verdwijnen pionierzone	-afname vegetatie door verdwijnen areaal -verdwijnen pioniersvegetatie		kwelderareaal	natuurondersteunende technieken, intensivering afwatering, kwelderverdediging
versnelde zeespiegelstijging	- inundatie hoger gelegen gedeelte	ophoging hogere kwelderzones, landinwaartse migratie	homeostasis, high flux	kwelderareaal	verwijderen waddijken, teruggave polders
	- verhoogde inundatietijd	- vergrootte sedimentatie	homeostasis, high flux	kwelderareaal, score kwelderkwaliteit	verwijderen waddijken, teruggave polders
	combinatie inundatie hoger gelegen gedeelte en verhoogde inundatietijd	- meer typische kweldervegetatie		score kwelderkwaliteit	n.v.t. (is positief effect)
gecombineerd effect verhoogde stormfrequentie en versnelde zeespiegelstijging	meer frequente en langere inundatie	stimulatie kweldermorfologie, meer typische kweldervegetatie	homeostasis, high flux	score kwelderkwaliteit	n.v.t. (is positief effect)
overige verstoringen					
gaswinning	extra zandhonger bovenop klimaatverandering	lokaal zekere daling	homeostasis, high flux	kwelderareaal, score kwelderkwaliteit	verwijderen waddijken

Literatuur

Barnett, J. Adapting to climate change in Pacific Island Countries: the problem of uncertainty. 2001. *World Development* **29**. 977-993

Bas Arens Duinonderzoek, www.duinonderzoek.nl. Geraadpleegd 06-07-2010

Bromberg Gedank, K., Silliman, B.R., en Bertness, M.D. Centuries of Human-Driven Change in Salt Marsh Ecosystems. 2008. *Annual Review of Marine Science*. **1**. 117-141

Brouns, J.J. Climate change and the Wadden Sea, The Netherlands, 1992. *Wetlands Ecology and Management*, **2**. 23-29

Trilateral Working Group on Coastal Protection and Sea Level Rise (CPSL). Final Report of the Trilateral Working Group on Coastal Protection and Sea Level Rise. 2001. Common Wadden Sea Secretariat (CWSS). Wadden Sea Ecosystem, **13**. Wilhelmshaven

Trilateral Working Group on Coastal Protection and Sea Level Rise (CPSL). Coastal Protection and Sea Level Rise - Solutions for sustainable coastal protection in the Wadden Sea region. 2005. Common Wadden Sea Secretariat (CWSS). Wadden Sea Ecosystem. **21**. Wilhelmshaven

Carpenter, S., Walker, B., Marty Anderies, J. & Abel, N. From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? 2001. *Ecosystems*. **4**. 765-781

Carter, R.W.G. Coastal environments— an introduction to the physical, 1988. *Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. Academic Press. London

Dankers, N. en Steenbergen, J. Geleidelijke zoet-zout overgangen in Nederland. 2003

De Boer, K. en Wolff, W.J. Tussen zilt en zoet. Voorstudie naar de betekenis van estuariene gradiënten in het Waddengebied. 1996

De Bruijn, K. Resilient strategies for flood risk management of lowland rivers. 2005. PhD Dissertation

De Leeuw, C.C. en Grootjans, A.P. Ecologische effecten van duinboog- en washoverherstel. 2008

Dessai, S. en Van der Sluijs, J.P. Uncertainty and climate change adaptation – a scoping study. 2008

Dijkema, K.S. Impact prognosis for salt marshes from subsidence by gas extraction in the Wadden Sea. 1997. *Journal of coastal research*. **13**. 1294-1304

Dijkema, K.S., Bossinade, J.H., Bouwsema, P., & De Glopper, R.J. Salt marshes in the Netherlands Wadden Sea: Rising high tide levels and accretion enhancement. 1990. In: Beukema, J.J., Wolff, W.J. & Brouns, J.J.W.M. (eds). Expected effects of

climatic change on marine coastal ecosystems. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht.

Dijkema, K.S., De Jong, D.J., Vreeken-Buijs, M.J. en Van Duin, W.E. Kwelders en schorren in de Kaderrichtlijn Water. 2005. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Den Haag. Rapport RIKZ-2005.020

Dijkema, K.S., Smit, C., Van Duin, W. Kwelders en kwelderwerken. 2008. Wageningen, Imares. Texel

Erchinger, H. F. Dünen, Watt und Salzwiesen. 1985. Der Niedersächsische Ministerie für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Hannover

Esselink, P., Dijkema K.S., Reents, S., & Hageman G. Vertical accretion and profile changes in abandoned man-made tidal Marshes in the Dollard Estuary, the Netherlands. 1998. *Journal of Coastal Research*. **14**. 570–582.

Esselink, P. Nature management of coastal salt marshes. Interactions between anthropogenic influences and natural dynamics. 2000. Dissertatie

Essink, K., Dettman, C., Farke, H., Laursen, K., Lürßen, G., Marencic, H., Wiersinga, W. (eds.) Wadden Sea Quality Status Report 2004. 2005. Wadden Sea Ecosystem. **15**

Het Tij Geleerd. Eilanden natuurlijk – Natuurlijke dynamiek en veerkracht op de Waddeneilanden. Waddenvereniging. 2008

IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment. 2007. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)). IPCC, Geneva

Janssen-Stelder, B.M. A synthesis of salt marsh development along the mainland coast of the Dutch Wadden Sea. 2000. Dissertatie

Louters, T. en Gerritsen, F. Het mysterie van de wadden. Hoe een getijdesysteem inspeelt op de zeespiegelstijging. 1994. Den Haag: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ. Rapport RIKZ-94.040

Matias, A., Ferreira, O., Vila-Concejo, A., Garcia, T., Dias, J.A. Classification of washover dynamics in barrier islands. 2008. *Geomorphology*, **97**, 655-674

Meijer, M.C. Wave attenuation over salt marsh vegetation - A numerical implementation of vegetation in SWAN. 2005. M.Sc. thesis. Delft

Morris, J.T., Sundareshwar, P.V., Nietch, C.T., Kjerfve, B., Cahoon, D.R. Responses of coastal wetlands to rising sea level. 2002. *Ecology*. **83**. 2869-2877

Mulder, J.P.M. Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel, advies voor dynamisch handhaven in de 21e eeuw. 2000. Rijksinstituut voor Kust en Zee/RIKZ, Den Haag. Rapport RIKZ-2000.36.

Oost, A. en De Haas, H. Het Friesche Zeegat. Morfologisch-Sedimentologische veranderingen in de periode 1927-1970. 1993. Rapport in het kader van Kustgenese. Werkgroep 1 voor Rijkswaterstaat. Deel 1

Oost, A. en Lammerts, E.J. (redactie). Het Tij Geleerd – Achtergrondrapport. 2007

Stevens, C.J., Dise, N.B., Owen Mountford, J., Gowing, D.J. Impact of Nitrogen Deposition on the Species Richness of Grasslands. 2004. *Science*. **303**. 1876-1879

Ten Haaf, M.E. en Buijs, P.H. Morfologie en dynamiek van washoversystemen. 2008

Van den Hurk, B., Klein Tank, A., Lenderink, G., Van Ulden, A., Van Oldenborgh, G.J., Katsman, C., Van den Brink, H., Keller, F., Bessembinder, J., Burgers, G., Komen, G., Hazeleger, W., Drijfhout, S. New climate change scenarios for the Netherlands. 2007. *Water Science & Technology* **56** (4). 27-33

Veer, M.A.C. Nitrogen availability in relation to vegetation changes resulting from grass encroachment in Dutch dry dunes. 1997. *Journal of Coastal Reservation*. **3**. 1

Vellinga, P., Katsman, C., Sterl, A., Beersma, J. (redactie). Onderzoek naar bovengrensscenario's voor klimaatverandering voor overstromingsbescherming van Nederland - Internationale wetenschappelijke beoordeling. 2008.

Witte, J.P.M., Bartholomeus, R.P., Cirkel, D.G., Kamps, P.W.J.T. Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland. 2008

ⁱ Stuifdijken zijn kunstmatige, in rechte lijn opgestoven duinenrijen. Ze komen in Nederland vooral voor op de Waddeneilanden. Het proces van duinvorming werd (kunstmatig) nagebootst door het plaatsen van schermen op het strand die zand vastlegden.

ⁱⁱ www.kwelders.nl

ⁱⁱⁱ Zie bijvoorbeeld dit abstract: <http://eco.confex.com/eco/2007/techprogram/P5146.HTM>