



ALTERRA

WAGENINGEN UR



Een Dijk van een Kwelder

Een verkenning naar de golfreducerende werking van kwelders

Alterra-rapport 2267
ISSN 1566-7197

J.M. van Loon-Steensma, P.A. Slim, J. Vroom, J. Stapel en A.P. Oost



WAGENINGEN UR
For quality of life

Deltares
Enabling Delta Life



Kennis
voor
Klimaat

Een Dijk van een Kwelder

Dit onderzoek is uitgevoerd binnen het kader van het Deltaprogramma Deelprogramma Waddengebied en sluit aan bij het thema 'Veiligheid tegen overstromingen' van het *Kennis voor Klimaat* Programma.
Projectcode: BO-11-015-003 (Gebiedsgericht deltaprogramma).

Een Dijk van een Kwelder

Een verkenning naar de golfreducerende werking van kwelders

J.M. van Loon-Steensma¹, P.A. Slim², J. Vroom³, J. Stapel⁴ en A.P. Oost³

¹ Wageningen University; Earth System Sciences Climate Change Group

² Alterra, onderdeel van Wageningen UR

³ Deltares

⁴ Imares, onderdeel van Wageningen UR

Alterra-rapport 2267

Alterra, onderdeel van Wageningen UR
Wageningen, 2012

Referaat

Loon-Steensma, J.M. van , P.A. Slim, J. Vroom, J. Stapel en A.P. Oost, 2012. *Een Dijk van een Kwelder; Een verkenning naar de golfreducerende werking van kwelders*. Alterra, Alterra-rapport 2267. 74 blz.; 24 fig.; 4 tab.; 112 ref.

Dit rapport geeft een samenvatting van relevant onderzoek naar de golfreducerende werking van kwelders en schetst de randvoorwaarden voor kweldervorming. Kwelders vormen een zone in het intergetijdengebied die de golven beïnvloeden door de weerstand van de bodem en de kweldervegetatie. De golfreducerende werking is afhankelijk van de hoogte en breedte van de kwelder, maar ook van de optredende waterstanden. Het is nog onduidelijk in hoeverre kwelders een bijdrage kunnen leveren aan de waterveiligheid in een veranderend klimaat. De studie is verricht in opdracht van het Deltaprogramma Deelprogramma Waddengebied en vormt een stap in het verkennen van geschikte waterveiligheidsstrategieën in het Waddengebied die zich naast waterveiligheid richten op doelstellingen voor natuur en ruimtelijke kwaliteit.

Trefwoorden: kwelders, golfreductie, slikken, waterveiligheid, klimaatverandering, eco-engineering.

Dit rapport is gereviseerd door dr. J. Mulder (Deltares en *Kennis voor Klimaat*).

Dit rapport en een uitgebreide samenvatting zijn ook verschenen als publicaties binnen het Deltaprogramma Deelprogramma Waddengebied (www.delta-programmawaddengebied.nl).

De foto op de omslag is gemaakt door Jantsje M. van Loon-Steensma.

ISSN 1566-7197

Dit rapport is gratis te downloaden van www.alterra.wur.nl (ga naar 'Alterra-rapporten'). Alterra Wageningen UR verstrekt geen gedrukte exemplaren van rapporten. Gedrukte exemplaren zijn verkrijgbaar via een externe leverancier. Kijk hiervoor op www.rapportbestellen.nl.

© 2012 Alterra (instituut binnen de rechtspersoon Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek)
Postbus 47; 6700 AA Wageningen; info.alterra@wur.nl

- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking van deze uitgave is toegestaan mits met duidelijke bronvermelding.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor commerciële doeleinden en/of geldelijk gewin.
- Overname, verveelvoudiging of openbaarmaking is niet toegestaan voor die gedeelten van deze uitgave waarvan duidelijk is dat de auteursrechten liggen bij derden en/of zijn voorbehouden.

Alterra aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Alterra-rapport 2267

Wageningen, januari 2012

Inhoud

Samenvatting	7
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding voor de studie	11
1.2 Kwelders in het Waddengebied	12
1.3 Doel van de literatuurstudie en specifieke vragen	13
1.4 Afbakening	13
1.5 Werkwijze	14
1.6 Leeswijzer	14
2 Kwelders in het intergetijdengebied	15
2.1 Factoren kweldervorming	15
2.1.1 Getij	15
2.1.2 Golf-windklimaat	16
2.1.3 Stormvloeden	17
2.1.4 Zeespiegelstijging en bodemdaling	17
2.1.5 Beschikbaarheid en eigenschappen van sediment	17
2.1.6 Kweldervegetatie	18
2.1.7 Ontwatering en inklinking	20
2.2 Stabiliteit en erosie van kwelders	20
2.2.1 Erosiebestendigheid	20
2.2.2 Klifranden	21
2.2.3 Sedimentatie	22
2.2.4 Rol aangrenzende slikken en pionierzone	23
2.2.5 Pendelbeweging	24
2.3 Kwelders als onderdeel van de Waddenkust	25
2.3.1 Natuurlijke buffer	25
2.3.2 Doelstellingen kwelders	25
2.3.3 Geschiedenis Waddengebied	29
2.3.4 Kweldervorming op de Waddeneilanden	30
3 Golfreductie in het voorland van waterkeringen	33
3.1 Golven in het Waddengebied	33
3.2 Golfdemping door kwelders en slikken	34
3.2.1 Bodemprofiel en golfreductie	34
3.2.2 Invloed vegetatie	37
3.2.3 Damping door riet- en biezenvelden	38
3.2.4 Damping door gradiënt van biobouwers	40
3.2.5 Golfdemping door slibvelden	42
3.2.6 Effect op de lokale stroming	42
3.3 Golfoploop bij kwelders: de praktijk	42
3.4 Experimenten met golfreductie	45
3.5 Modellerings	45
3.5.1 Golfmodellerings	45
3.5.2 Weerstand van vegetatie in modellen	47

4	Kwelders, waterveiligheidsbeleid, onderhoudskosten	49
4.1	Nederland	49
4.2	Verenigd Koninkrijk	52
4.3	Duitsland	53
4.4	Denemarken	53
4.5	Projecten toepassing kwelders in kustbeheer	54
4.5.1	ComCoast	54
4.5.2	Eco-engineering	54
4.6	Reductie in onderhoudskosten waterkeringen en meerwaarde van kwelders	55
5	Kwelders en een veranderend klimaat	57
5.1	Zeespiegelstijging	57
5.2	Stormklimaat	59
5.3	Temperatuurstijging	59
6	Conclusies, kennisleemten en aanbevelingen	61
	Literatuur	67

Samenvatting

Kwelders zijn laaggelegen, met zouttolerante planten begroeide, veelal slibrijke gebieden in het getijdengebied die regelmatig worden overstroomd door het zeewater. In Zuidwest-Nederland en de Kop van Noord-Holland worden kwelders ook wel schorren genoemd. Kwelders ontwikkelen zich vooral langs luwe delen van de kust met voldoende sedimentaanvoer. Hier vindt door overstromingen door het getij en stormvloed ophoging met sediment plaats. De typische kwelderplanten zijn bestand tegen regelmatige overstroming. Kweldervegetatie beïnvloedt de stroming en de inkomende golven, vangen slib in en houden dit vast. Kwelders, inclusief het krekensiel, en de aangrenzende slikken en zandbanken vormen een samenhangend systeem in de kustzone.

Kwelders vormen een ondiepe zone die de golven beïnvloedt; de bodem en de kweldervegetatie veroorzaken weerstand. Al enige tijd is er, mede naar aanleiding van de aandacht voor de verwachte effecten van klimaatverandering op de zeespiegelstijging en het stormklimaat, belangstelling voor de mogelijke betekenis van kwelders voor de waterveiligheid. Dit rapport betreft een literatuurstudie naar de golfreducerende werking van kwelders. Deze verkenning is uitgevoerd in opdracht van het Deltaprogramma Deelprogramma Waddengebied.

De onderzoeksvragen zijn:

- Wat zijn de factoren die kweldervorming beïnvloeden?
- Welke factoren bepalen de golfreducerende werking van kwelders?
- Welke kennis en ervaring is er rond de golfreducerende werking van kwelders in het Waddengebied en elders?
- In hoeverre wordt de golfreducerende werking van kwelders toegepast in het Nederlandse waterveiligheidsbeleid en in ons omringende landen?
- In hoeverre kunnen natuurlijke of semi-natuurlijke kwelders een bijdrage leveren aan de waterveiligheid in het Waddengebied bij een veranderend klimaat?
- Wat zijn belangrijke vragen rond de toepassing van kwelders in de waterveiligheidsstrategie van het Waddengebied?

In een parallelle studie wordt met modellen de golfreducerende werking van kwelders onderzocht. Beide studies moeten uitwijzen of kwelders onderdeel kunnen vormen van een waterveiligheidsstrategie in het Waddengebied, waarbij ook de natuur en de ruimtelijke kwaliteit behouden blijven.

In het Waddengebied ligt veruit het grootste areaal kwelders van Europa. Van de 40.000 ha kwelders in de Waddenzee ligt ca. 9.000 ha in het Nederlandse deel ervan. Deze kwelders bevinden zich zowel langs de rand van het vasteland, als langs de randen van de eilanden. De huidige kwelders en zomerpolders langs de Friese en Groningse vastelandskust zijn als kwelderwerken ontwikkeld. Veel van deze buitendijkse terreinen zijn nu belangrijk natuurgebieden.

Kwelders zijn het resultaat van een wisselwerking tussen externe factoren zoals getij, golf-windklimaat, stormvloed, zeespiegelstijging, de beschikbaarheid van sediment en interne processen zoals inklinking, de ontwikkeling van vegetatie, en het effect van de vegetatie op de fysische omstandigheden in het kweldersysteem. Kweldervorming is een dynamisch proces met vele terugkoppelingsmechanismen. Het kweldersysteem is gevoelig voor veranderingen in onder meer golfbelasting, stroming, zeespiegelstijging, sedimentaanvoer en beheer. De kwelder vormt een overgangszone tussen het mariene en terrestrische milieu. Over het algemeen wordt een kwelder landwaarts begrensd door een verhoging (bijvoorbeeld een duin, dijk of kade) en

gaat zeewaarts (al of niet met een klifrand) over in slikken of zandplanten, en een geul. Deze geul zorgt voor de aanvoer van water en sediment. In het Waddengebied is de ontwikkeling van kweldervegetatie en ophoging langdurig gemonitord.

Om kwelders in te kunnen zetten als onderdeel van de primaire waterkering is het belangrijk om te weten hoe stabiel de kwelders zijn en vooral of ze tijdens maatgevende omstandigheden golfenergie kunnen absorberen. De maatgevende omstandigheden zijn de wettelijk afgesproken waterstanden waartegen onze waterkeringen bestand moeten zijn. De golven in de Waddenzee worden beïnvloed door de windsnelheid en windrichting in het Waddengebied, maar ook door de omstandigheden op de Noordzee.

Kwelders kunnen golven reduceren door:

- het bodemprofiel (als vooroever van de dijk);
- de kweldervegetatie;
- interne wrijving in de bodem;
- indirecte beïnvloeding van de golfevolatie door het effect op de lokale stroming en golfinterferentie als gevolg van ruimtelijke heterogeniteit (bodem- en vegetatiereëf).

De golfdemping is in belangrijke mate afhankelijk van de optredende waterstanden: naarmate het water hoger staat, is er minder interferentie tussen de golven en de bodem. Vooral in de eerste tientallen meters aan de zeezijde wordt de golfenergie gedempt. Als vuistregel komt naar voren dat in elk geval een strook kwelder van 10-80 m breed nodig is voor een significante bijdrage. Hoeveel 'afslag-buffer' nodig is, is onbekend en hangt af van de mate van herstel tussen twee opeenvolgende erosiegebeurtenissen.

In de praktijk is het vanwege heterogeniteit en de invloed van geulen in de kwelders moeilijk om het effect van ondiepe voorlanden mee te nemen in de berekening voor golfoploop en golfoverslag. Bovendien is een precieze grens tussen een ondiep en een zeer ondiep voorland niet te geven. Desondanks is het tegenwoordig de praktijk om voor verharde zeeweringen langs de kust de maatgevende condities (waterstand plus golfbrandvoorwaarden behorende bij de veiligheidsnorm van de betreffende dijkkring) te berekenen op 50 m uit de teen of 100 m uit de kruin van de dijk.

Naast golfdemping, vervullen kwelders in principe ook een rol voor de waterveiligheid omdat ze een gunstige invloed uit kunnen oefenen op de buitenwaartse macrostabiliteit van de dijk en de intreeweerstand bij 'piping' (zandmeevoerende wellen).

Vanuit het oogpunt van waterveiligheid, ruimtelijke kwaliteit, natuurdoelen en kosten is het aantrekkelijk om kwelders of - indien stabiel genoeg - eco-engineers in het ontwerp van een waterkering mee te nemen. Dit betekent dat de waterkeringszone breder wordt. Dit biedt de mogelijkheid om een meer geleidelijke overgang tussen de dijk en het wad te creëren. Het ontwikkelen of in stand houden van kwelders voor de waterveiligheid kan echter in strijd zijn met de doelen gericht op bescherming en herstel van natuurwaarden van kwelders of andere habitats.

Vooral in Engeland en Duitsland is veel belangstelling voor de bijdrage van kwelders aan de waterveiligheid. In de jaren '90 van de vorige eeuw werd in Engeland 'managed realignment' geïntroduceerd als nieuwe kust-verdedigingsmaatregel. In Duitsland worden kwelders als onderdeel van de zeewering beschouwd, omdat ze de impact van golven op de dijk beperken. In Sleeswijk-Holstein is een managementconcept voor kwelders ontwikkeld, waarbij zowel recht wordt gedaan aan de waterkerende functie als aan de natuurwaarden van de kwelders.

Of kwelders de verwachte versnelde zeespiegelstijging kunnen bijhouden, hangt grotendeels af van de beschikbaarheid van sediment. In de Waddenzee is voor de Groningse en Friese kust de bruto-opslibbing in de

verschillende zones van de kwelderwerken gedurende vele decennia gemonitord. Hoewel daarbij over de decennia een variatie in opslibbing wordt waargenomen, lijkt het alsof kwelders de zeespiegelstijging kunnen bijhouden; er worden waarden voor maximale ophoging van 50 cm per eeuw voor de eilanden en 100 cm per eeuw voor de vastelandskust gevonden.

Kennisbehoefte en aanbevelingen

Uit de literatuurstudie blijkt dat er veel kennis beschikbaar is over kwelderontwikkeling. Deze kennis is vooral gericht op ecologie en biodiversiteit in relatie tot abiotische aspecten als erosie, opslibbing en sediment-samenstelling. Hoewel de capaciteit van kwelders en voorland om mee te groeien met de zeespiegel al lang bekend is, ontbreekt het nog aan voldoende gedetailleerde kennis over het gedrag van kwelders vanuit het oogpunt van hoogwaterbescherming. Vooral het gedrag van kwelders onder maatgevende omstandigheden vraagt meer onderzoek. De literatuurstudie heeft geleid tot vragen en aanbevelingen om deze kennisleemte op te vullen.

Is de kennis over het gedrag van kwelders en de invloed van kwelders op de hydrodynamiek representatief voor extreme en maatgevende omstandigheden?

Aanbevelingen:

- Tijdens extreme omstandigheden dienen golfploop op dijkvakken met en zonder een kwelder (als een voorland) te worden bestudeerd. Dit dient in verband te worden gebracht met waterdiepte, golfhoogte en vegetatiedichtheid en -hoogte.
- Omdat de golfdemping sterk locatiespecifiek is, dient de golfreductie op een aantal kenmerkende en van elkaar verschillende locaties te worden gemonitord.
- De informatie verkregen uit bovenstaande aanbevelingen dient te worden gebruikt om modellen te kalibreren om vervolgens de toepassing van kwelders voor de waterveiligheid verder uit te werken.

Welke rol speelt de aan de kwelder grenzende zone (wadplaten en slikken) en de daar voorkomende ecosystemen in kwelderdynamiek en golfreductie?

Aanbevelingen:

- Het is aan te bevelen een uitgebreide internationale literatuurstudie uit te voeren naar het effect van rifbouwende oesters, mosselbanken en zeegrasvelden op het golfklimaat en te na te gaan onder welke condities deze ecosystemen in samenhang met kwelders bijdragen aan waterveiligheid.
- Onderzoek het proces waarbij slikken onder invloed van 'biobouwers', bijvoorbeeld schelpdieren en zeegrasvelden, in de zomer sediment 'opslaan' en in het najaar kwelders 'voeden'.

Hoe kunnen kwelders daadwerkelijk worden toegepast in het waterveiligheidsbeleid?

Aanbevelingen:

- Voor een weloverwogen keuze voor het toepassen van kwelders en andere biobouwers voor waterveiligheid is het belangrijk om criteria te ontwikkelen voor een afweging (waaronder kosten en baten) ten opzicht van traditionele keringen. Andere ecologische aspecten (ecosysteemdiensten) moeten hierin worden meegewogen.
- Naar analogie van het restprofiel bij duinen zou als criterium een restprofiel na erosie/afslag van kwelders moeten worden bepaald. Hiervoor is een studie nodig van de erosiesnelheden van kwelders en de dempende werking van kwelderwerken op erosie onder maatgevende stormvloedcondities.
- Ga na wat de mogelijkheden zijn voor innovatieve waterkeringen waarbij de kwelder onderdeel uitmaakt van de kering (zoals een hybridekering).
- Om na te gaan hoe kwelders in de Waddenzee reageren op stormomstandigheden zou moeten worden geanalyseerd (bijvoorbeeld op basis van remote-sensingbeelden) hoe het kwelderareaal zich ontwikkelde na de stormen van de afgelopen decennia.
- Door internationale kennisuitwisseling door middel van workshops, symposia en werkbezoeken kunnen ervaringen met natuurlijke keringen in hoogwaterbescherming worden gedeeld.

- De 'Integrated Coastal Zone Management'-benadering van Sleeswijk-Holstein kan als richtsnoer dienen voor een betere afstemming tussen verantwoordelijkheid voor waterveiligheid en voor beheer en eigendom; ook in de afstemming tussen waterveiligheidsdoelen en natuurbeleidsdoelstellingen.
- Om meer inzicht te verkrijgen in kwelderontwikkeling in relatie tot klimaat, zouden kwelderontwikkelingen langs de Europese kust met elkaar moeten worden vergeleken.
- Voor het inzetten van kwelders en/of biobouwers om bij te dragen aan de veiligheid is het van groot belang om te investeren in heldere communicatie over de kennis en noodzakelijke kennisontwikkeling met de directe stakeholders (eigenaren/beheerders, bewoners, waterschappen, provincies, gemeenten en rijk). Daarbij zou een bestaande kwelder met veel verschillende breedten (bijvoorbeeld Noard-Fryslân Bûtendyks) als voorbeeldproject kunnen dienen.
- Besteed veel aandacht aan het afstemmen van waterveiligheid op bescherming en herstel van natuurwaarden van kwelders of andere habitats.
- Onderzoek de relatie tussen de aan/afwezigheid van een kwelder en de mate van benodigd onderhoud aan de waterkering.

Wat is het potentieel van kwelderontwikkeling en –uitbreiding voor hoogwaterbescherming in de Waddenzee?

Aanbevelingen:

- Een kansenkaart voor kwelderontwikkeling kan inzicht geven in de mogelijke bijdrage van kwelders op de betreffende locaties, aan de waterveiligheid.
- Een analyse van beheermaatregelen om kweldervorming te beïnvloeden maakt duidelijk wat de voor- en nadelen van deze maatregelen zijn.
- Experimenten langs het Wierumerwad (Fryslân) of de Emmapolder (Groningen) kunnen duidelijk maken wat het effect is van beperkte ophoging van het slik op kweldergroei. Hiervoor kunnen in principe kwelders worden aangelegd over een lengte van ca. 10-15 km dijk.
- Verken de mogelijkheden om te experimenteren met kunstmatige aanvoer van sediment.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding voor de studie

Al enige tijd is er mede naar aanleiding van de aandacht voor de verwachte effecten van klimaatverandering op de zeespiegelstijging en het stormklimaat, zowel op (inter)nationaal als op regionaal en lokaal niveau, belangstelling voor de mogelijke positieve bijdrage van kwelders aan de waterveiligheid.

Kwelders (in Zuidwest-Nederland en de Kop van Noord-Holland schorren genoemd) zijn laaggelegen, met zouttolerante planten begroeide veelal slibrijke gebieden in het getijdengebied die regelmatig worden overstroomd door het zeewater. Kwelders ontwikkelen zich vooral langs luwe delen van de kust met voldoende sedimentaanvoer, zodat ophoging plaatsvindt. Wanneer door sedimentatie een zone zover is opgehoogd dat deze een deel van de dag droog valt, kunnen zich zouttolerante planten vestigen. Deze planten beïnvloeden lokaal de stroming en de inkomende golven, vangen slib in en houden dit vast. In de kwelder vormt zich een geomorfologisch patroon van kreken, oeverwallen en kommen. Dit krekensysteem speelt een belangrijke rol in de aanvoer van sediment en de ontwatering van de kwelder (Dijkema et al., 2001). Kwelders gaan zeewaarts over in slikken en/of zandbanken, waarbij zich soms op de grens ervan een klijfrand heeft ontwikkeld (Allen en Pye, 1992). Kwelders komen vooral langs kusten in de gematigde streken voor; in warmere streken kunnen zich langs stromingsluwe delen van de kust zones met mangroven ontwikkelen (Allen, 2000).

Kwelders vormen dus een ondiepe zone die de golven beïnvloeden door de weerstand die bodem en kweldervegetatie bieden, doordat de golven op de kwelders breken, door het vervormen van golven ('shoaling'), en door refractieprocessen in de ondiepe zone en de kreken (en tegen de eventuele klijfrand). Er zijn zowel in Nederland als elders diverse studies uitgevoerd om het effect van kwelders op de golfreductie te onderzoeken met als doel om de invloed van ondiepe voorlanden mee te kunnen nemen bij het ontwerp van dijken, echter tot dusver niet met bevredigende resultaten.

Dit vormde voor het Deelprogramma Waddengebied van het Deltaprogramma aanleiding om na te gaan welke relevante kennis beschikbaar is, en om te verkennen of kwelders onderdeel kunnen vormen van een waterveiligheidsstrategie in het Waddengebied die zich naast waterveiligheid ook richt op doelstellingen voor de natuur en de ruimtelijke kwaliteit.

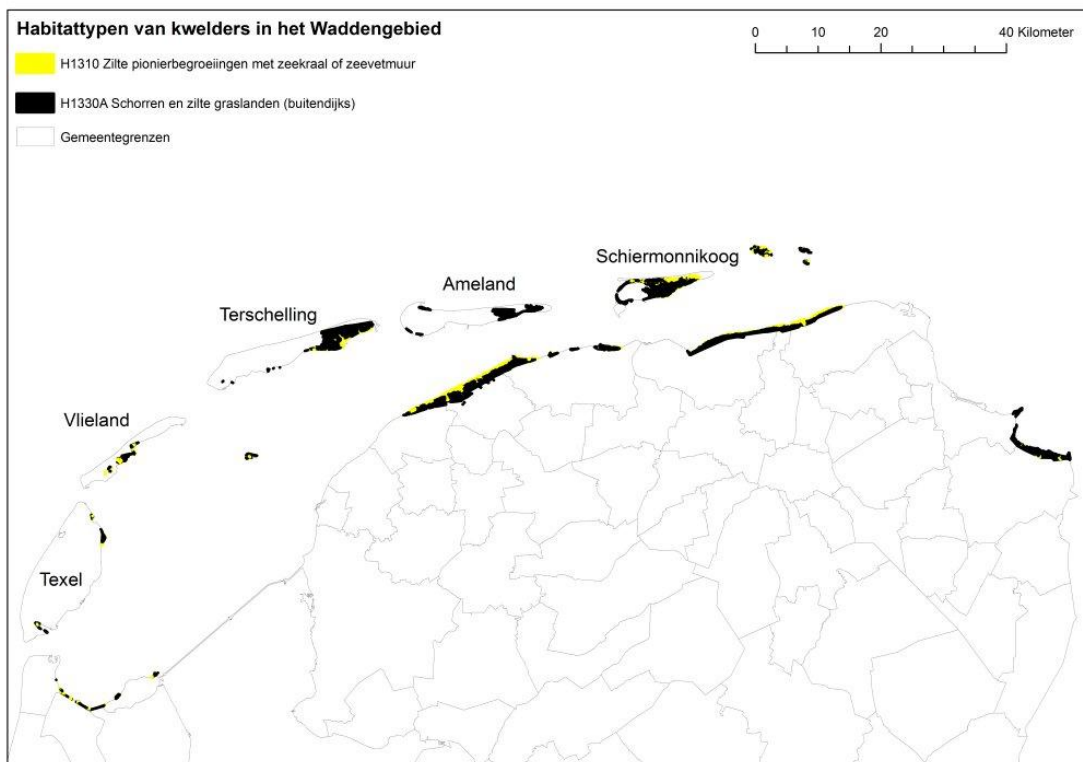
Het Deltaprogramma is een nationaal programma waarin rijksoverheid, provincies, waterschappen en gemeenten samenwerken met als doel om ervoor te zorgen dat er zekerheid is over de lange-termijn waterveiligheid en over de beschikbaarheid van voldoende zoet water. Het Nationaal Waterplan (NWP) vormt het beleidskader voor het Deltaprogramma. Het Deelprogramma Waddengebied is één van de negen deelprogramma's in het Deltaprogramma en wordt vanwege de belangrijke natuurwaarden van het Waddengebied geleid door het ministerie van Economische zaken, Landbouw & Innovatie (EL&I). Het Deelprogramma Waddengebied heeft als doel te onderzoeken hoe de waterveiligheid van het Waddengebied op de lange termijn verzekerd kan worden en om een monitoringplan voor dit bijzondere natuurgebied op te stellen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat et al., 2010). In 2010 zijn acht deelonderwerpen benoemd en in samenspraak met de belangrijkste stakeholders verkend en tot een projectplan uitgewerkt in 'quick scans'. De reductie van golfwerking door kwelders en slibvelden in de Waddenzee en Eems-Dollard is één van de deelonderwerpen. Deltares (H.L. Winterwerp) voerde een 'quick scan' uit waarin de belangrijkste vragen zijn benoemd, en ontwierp een concept-onderzoeksprogramma.

Dit rapport is een voor een brede doelgroep toegankelijke samenvatting van relevant onderzoek naar de golfreducerende werking van kwelders. Tegelijkertijd is separaat via een modelstudie verkend wat onder de huidige en mogelijk toekomstige randvoorwaarden in het Waddengebied de golfreducerende werking van kwelders is. Op basis van de literatuurstudie en de modelstudie worden kennisleemten en randvoorwaarden voor veldstudie, monitoring en pilots gespecificeerd voor verdere kennisontwikkeling rond de toepassing van kwelders voor de waterveiligheid. Beide studies vormen gezamenlijk fase 1 van het onderzoeksprogramma. Op basis van beide studies beslist het Deelprogramma Waddengebied van het Deltaprogramma of kwelders een kansrijke waterveiligheidsstrategie vormen voor het Waddengebied, en welk onderzoek nodig is om deze strategie daadwerkelijk in het Waddengebied toepasbaar te maken.

1.2 Kwelders in het Waddengebied

In het Waddengebied ligt veruit het grootste aaneengesloten areaal kwelders van Europa, en meestal in de oorspronkelijke samenhang met de aangrenzende wadden (zeewaarts) of duinen (op de eilanden). Van de 40.000 ha kwelders in de Waddenzee ligt ca. 9.000 ha in het Nederlandse deel van de Waddenzee (Dijkema et al., 2007). Hier liggen de kwelders zowel langs de rand van het vasteland, als langs de randen van de eilanden (Figuur 1.1). Op de grotere eilandkwelders komen ook duincomplexen voor.

Veel kwelders zijn in het verleden ingepolderd voor agrarisch gebruik. Vanaf de 17^e eeuw begonnen oevereigenaren kwelderaanwas te stimuleren voor landaanwinning, met name langs de vastelandskust. De huidige kwelders langs de vastelandskust zijn het resultaat van het op grote schaal stimuleren van de sedimentatie (Dijkema et al., 2001) door aanleg van kwelderwerken (bezinkvakken).



Figuur 1.1

Kwelders in het Natura 2000-Waddengebied langs de rand van het vaste land en op de eilanden. Het kweldergebied de Slufter op Texel behoort tot de Noordzeekustzone. Habitattype 1320 'Schorren met slijkgrasvegetatie' is niet apart aangegeven (Bron: Alterra Habitattypenkaart)

Het Waddengebied - inclusief de kwelders - vormt een belangrijk natuurgebied en is zowel op nationaal en internationaal niveau aangewezen als te beschermen natuurgebied, o.a. in de EU Vogel- en Habitatrichtlijnen en de Natuurbeschermingswet. De Waddenzee staat sinds 2009 op de Werelderfgoedlijst van Unesco. De natuurdoelen die voor kwelders gelden zijn afkomstig van de PKB Waddenzee, Natura 2000, de Kaderrichtlijn Water en het Trilaterale Wadden Sea Plan. De kwelders in het Waddengebied behoren vooral tot het habitat-type 'Zilte pionierbegroeiingen (met Zeekraal of Zeevetmuur)' (H1310) en 'Schorren en zilte graslanden' (H1330). In figuur 1.1. staan deze habitats in het Nederlandse deel van de Waddenzee weergegeven. Tenslotte is nog habitatype 'Schorren met slijkgrasvegetatie' aanwezig (H1320).

1.3 Doel van de literatuurstudie en specifieke vragen

Het doel van deze studie is een voor een brede doelgroep toegankelijke samenvatting van relevant onderzoek naar de golfreducerende werking van kwelders. De studie vormt een stap in de verkenning van geschikte waterveiligheidsstrategieën in het Waddengebied die zich naast waterveiligheid richten op doelstellingen voor de natuur en voor de ruimtelijke kwaliteit. Tegelijkertijd is via een separate modelstudie verkend wat onder de huidige en mogelijk toekomstige randvoorwaarden in het Waddengebied de golfreducerende werking van kwelders is. Op basis van beide studies worden kennisleemten en randvoorwaarden voor veldstudie, monitoring en pilots gespecificeerd voor verdere kennisontwikkeling rond de toepassing van kwelders voor de waterveiligheid.

Voor de literatuurstudie zijn de volgende specifieke vragen relevant:

1. Wat zijn de factoren die kweldervorming beïnvloeden?
2. Welke factoren bepalen de golfreducerende werking van kwelders?
3. Welke kennis en ervaring is er rond de golfreducerende werking van kwelders in het Waddengebied en elders?
4. In hoeverre wordt de golfreducerende werking van kwelders toegepast in het Nederlandse waterveiligheidsbeleid en in de ons omringende landen?
5. In hoeverre kunnen natuurlijke of semi-natuurlijke kwelders een bijdrage leveren aan de waterveiligheid in het Waddengebied bij een veranderend klimaat?
6. Wat zijn belangrijke vragen rond de toepassing van kwelders in de waterveiligheidsstrategie van het Waddengebied?

1.4 Afbakening

De studie is gericht op relevant (internationaal) wetenschappelijk en toepassingsgericht onderzoek naar de golfreducerende werking van kwelders. In deze studie worden kwelders en de aangrenzende slikken en zandbanken als een samenhangend systeem in het intergetijdengebied gezien, dat onderdeel uitmaakt van de kustzone in de Waddenzee. Deze studie beperkt zich niet tot het Waddengebied, maar betreft hierbij ook kweldersystemen elders, uitgezonderd studies gericht op de golfreducerende werking van mangroven in tropische regio's. Hoewel bekend is dat 'fluid mud' (slibvelden) een dempende werking heeft, is in deze studie beperkt aandacht gegeven aan dit onderwerp omdat uit de 'quick-scan' naar voren kwam dat dergelijke moddergebieden vaak nogal mobiel zijn en daarmee voor de waterveiligheid geen betrouwbare bijdrage kunnen vormen.

1.5 Werkwijze

Om een voor een brede doelgroep toegankelijke studie op te stellen zijn op basis van informatie van experts, handboeken, beleidsdocumenten en wetenschappelijke overzichtsartikelen, de randvoorwaarden voor kweldervorming en het kweldersysteem als onderdeel van de kustzone geschetst. Daarnaast is in de internationale wetenschappelijke literatuur gezocht naar artikelen over de golfreducerende werking van kwelders en aangrenzende slikken. Ook heeft een aantal experts specifieke informatie verstrekt over onder meer het waterveiligheidsbeleid in Nederland en de ons omringende landen.

1.6 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 worden kort de kweldervormende processen geschetst (onderzoeksvraag 1) en wordt ingegaan op de stabiliteit en erosie van kwelders en kwelders als onderdeel van de Waddenkust. Dit vormt de achtergrond voor de in hoofdstuk 3 besproken golfreducerende werking van het kweldersysteem (onderzoeksvraag 2) en de kennis en ervaring rond de golfreducerende werking in het Waddengebied (onderzoeksvraag 3). Hoofdstuk 4 behandelt het beleid rond kwelders en waterveiligheid (onderzoeksvraag 4). In hoofdstuk 5 wordt ingegaan op het effect van klimaatverandering op kweldervorming en op de golfreducerende werking, en op de belangrijke vragen daarbij (onderzoeksvraag 5). Hoofdstuk 6 schetst een aantal kennisleemten en aanbevelingen (onderzoeksvraag 6).

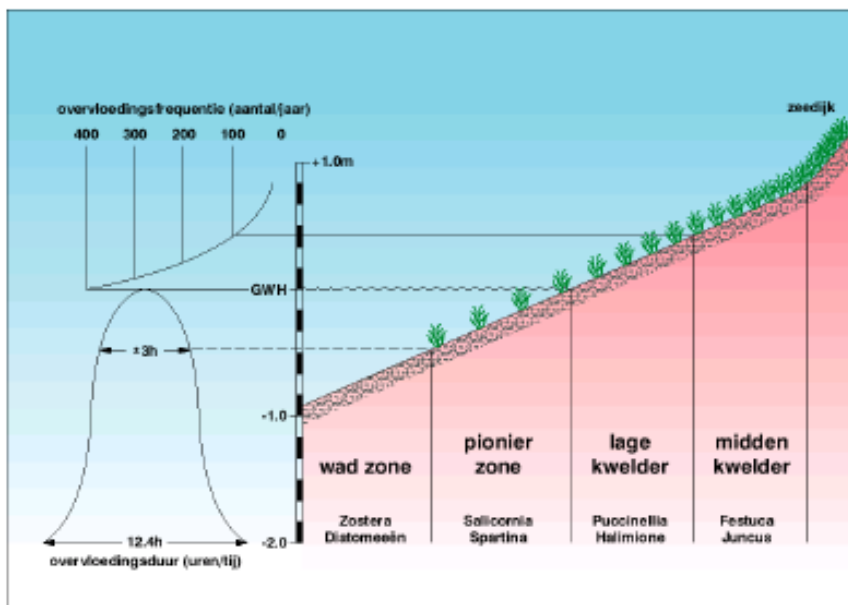
2 Kwelders in het intergetijdengebied

Kwelders, inclusief het krekensysteem, en de aangrenzende slikken en/of zandbanken vormen een samenhangend systeem en maken integraal onderdeel uit van het getijdengebied. Kwelders zijn het resultaat van een wisselwerking tussen externe factoren zoals getij, golf-windklimaat, stormvloeden, zeespiegelstijging en de beschikbaarheid van sediment, en interne processen zoals inklinking, en de ontwikkeling van vegetatie en het effect van de vegetatie op de fysische omstandigheden in het kweldersysteem (Allen, 2000). In dit hoofdstuk worden de belangrijke factoren rond kweldervorming, de stabiliteit en erosie van kwelders en het kweldersysteem als onderdeel van de kustzone (inclusief beheer) geschetst.

2.1 Factoren kweldervorming

2.1.1 Getij

Het getij is een belangrijke factor in kweldervorming. Van nature ontstaan kwelders en schorren door sedimentatie op getijplaten van voldoende hoogte die tegen golven en stroming zijn beschut, bijvoorbeeld omdat ze zich in de luwte van een duin, dijk of bocht in de kust bevinden. In een wisselwerking tussen fysische en biologische processen groeien wadplaten met enkele pionierplanten uit tot een met zout-tolerante planten begroeide kwelder die boven gemiddeld hoogwater (GHW) ligt (figuur 2.1) (Dijkema et al., 2001). Het getij is hierbij van belang voor de verticale ontwikkeling van de kwelder; voor hoger gelegen delen zijn stormvloeden ook van belang voor de opbouw. In het algemeen worden kwelders niet veel hoger dan het hoogste springtijniveau. Ten opzichte van het NAP varieert dit langs de Nederlandse Wadden van +0,66 m in Den Helder, naar +1,33 m in de Eemshaven tot +1,65 m in Nieuwe Statenzijl in de Dollard.



Figuur 2.1

Voorbeeld van zonering en inundatiefrequentie (naar Erchinger in: Dijkema et al., 2001)

Het getijverschil en de gradiënt van de kust bepalen samen de horizontale afmeting van de intergetijdenzone (het gebied tussen hoog- en laagwater, dat tijdens vloed wordt overstroomd). Kwelders komen vooral voor in gematigde streken met een lage kustgradiënt en een relatief groot getijverschil (Haslett, 2009).

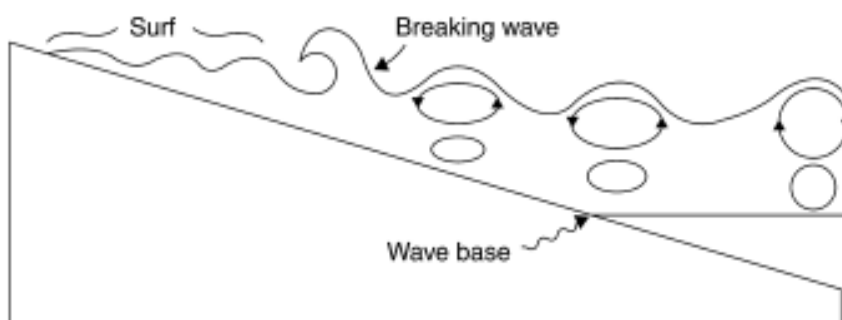
Het getij is van belang voor het transport van sediment. De stroomsnelheden variëren over de getijcyclus en sedimenttransport is proportioneel tot de stroomsnelheid. De stroomsnelheid is bepalend voor de afmeting van over de bodem getransporteerde of in het water gesuspendeerde deeltjes. Elke fractie heeft een kritische stroomsnelheid waarboven het wordt meegenomen en een kritische snelheid waar beneden het bezinkt. De relatief zware zanddeeltjes zullen dicht bij de geulen en platen sedimenteren en de lichtere slibdeeltjes zullen vooral onder stromingsarme condities nabij de kust sedimenteren. Soms bezinken de kleinere slibdeeltjes over de eerder bezonken zandkorrels en is in het profiel van een kwelder een gelaagd patroon van zand en slibdeeltjes herkenbaar (Allen, 2000).

Door asymmetrie van het getij ontstaat nettotransport van sediment in een bepaalde richting. In de Waddenzee duurt eb langer dan vloed, waardoor de stroomsnelheid tijdens vloed hoger is en er meer en grotere deeltjes de Waddenzee in worden getransporteerd.

2.1.2 Golf-windklimaat

Naast het getij vormt het golf- en windklimaat een belangrijk aspect in kweldervorming en is mede bepalend of er erosie of sedimentatie plaatsvindt.

De hoogte van een golf vertoont een relatie met de windsnelheid en met de strijklengte (Haslett, 2009). Golven leveren energie voor sedimenttransport en erosie. Deze energie wordt via golfbeweging overgedragen. In de ondiepe zone beïnvloedt de zeebodem de golfbeweging, waardoor de golf vervormt (figuur 2.2). Hierdoor nemen zowel de golflengte als de golfsnelheid af waardoor de golfhoogte toeneemt. Deze verandering in de golfbeweging veroorzaakt stromingen die het sediment in beweging kunnen brengen. Wanneer het water nog ondieper wordt, zal de golf uiteindelijk breken (Haslett, 2009).



Figuur 2.2

Vervorming van een golf van een cirkelvorm naar een ellips, uiteindelijk resulterend in het breken van de golf, als een oscillerende golf in de ondiepe zone komt (Haslett, 2009)

Door ongelijkmatig reliëf in de zeebodem zal variatie in de verdeling (refractie) van golfenergie over de kust plaatsvinden. De energie kan divergeren (en daarmee deels dissiperen) of juist convergeren en voor inhammen in de kust zorgen. Achter een obstakel (zoals een eiland) kan een luwe zone ontstaan. Als de golf het obstakel is gepasseerd, kan de golf zich ook weer uitbreiden (diffractie) (Haslett, 2009). Als de golf een lange afstand moet afleggen, over een -voor de golf ondiepe- bodem, voordat ze de kust bereikt, zal de golf een deel van de

hoogte en energie verliezen. Tijdens een storm ontstaan meestal golven van verschillende hoogten en met verschillende golflengten en golfperiodes. Wanneer golven een lange afstand afleggen, zal een zekere sortering in golven plaatsvinden (dispersie). De wijze van golfbreken wordt bepaald door zowel de steilheid van de golf, de waterdiepte als de gradiënt van de kustzone. Bij een lage gradiënt (een lange en flauwe helling) komen de golven aanrollen en vindt meestal een geleidelijke dissipatie (damping) van energie plaats. Bij een hogere gradiënt (een steilere hoek) kan een deel van de golfenergie worden gereflecteerd (Haslett, 2009).

2.1.3 Stormvloeden

Als het hard genoeg waait kan de windgedreven opslingering van het astronomisch getij leiden tot een stormvloed. De watervolumina die dan de kwelder opstromen zijn groot waardoor ook de stroomsnelheden hoog zijn. Ook de golfwerking is dan intens. Afhankelijk van de windrichting en de fase van het getij kan gesuspendeerd sediment zeewaarts worden afgevoerd of juist landwaarts (Stratingh en Venema, 1855; Kamps, 1956; Van Straaten en Kuenen, 1957; De Haas en Eisma, 1993). Op de kwelders kan dit leiden tot de afzetting tot enkele dm dikke lagen van vloeibare modder (Stratingh en Venema, 1855; Kamps, 1956; Dijkema et al., 1988; Oost, 1995). Dit gebeurt vooral in de tweede helft van de herfst, een periode die men vroeger de moddermaanden noemde (Kamps, 1956; Oost, 1995). Op deze wijze kunnen ook de hogere delen van de kwelder nog ophogen.

2.1.4 Zeespiegelstijging en bodemdaling

Een matige relatieve zeespiegelstijging¹ vormt een randvoorwaarde voor kweldervorming. Zeespiegelstijging wordt veroorzaakt door veranderingen in het klimaat en de bodemdaling door tectonische processen (zie 2.3.3 en 5.1). Zonder een matige zeespiegelstijging neemt de opslibbing van de kwelder af, omdat kwelders over het algemeen niet veel hoger worden dan het hoogste springtij-niveau. Zeespiegelstijging zorgt dat de grens tussen zee en land landwaarts verschuift, en creëert daarmee ruimte voor kweldervormende processen. Bij een stabiele of een dalende zeespiegel veroudert de kwelder of kan veenvorming op de kwelder plaatsvinden (Allen, 2000). Op vele plaatsen, waaronder het grootste deel van de Waddenkust, ontnemen de waterkeringen de mogelijkheid aan kwelders om landwaarts op te schuiven bij zeespiegelstijging.

2.1.5 Beschikbaarheid en eigenschappen van sediment

De hoeveelheid en samenstelling van zwevend materiaal in het zeewater vormen eveneens belangrijke randvoorwaarden voor kweldervorming. Dit sediment kan worden aangevoerd door in een bekken uitmondende rivieren of door de langsstroom (en bestaat dan uit fluviatiel of van de kust geërodeerd materiaal), maar het sediment kan ook afkomstig zijn van erosie van de randen van het bekken.

De Waddenzee is van nature een systeem met veel zand, slib en organisch materiaal. Onder slib en klei worden deeltjes verstaan tot een afmeting van 0,016 mm. Zanddeeltjes hebben een afmeting tussen 0,016 en 2 mm. Van de zanddeeltjes is het vooral de fractie onder 0,16 mm die zwevend wordt vervoerd. De grovere

¹ De relatieve zeespiegelstijging is de som van absolute zeespiegelstijging als gevolg van veranderingen in het klimaat, en absolute bodemdaling als gevolg van tectonische processen. In dit rapport wordt wanneer er zeespiegelstijging staat, de relatieve zeespiegelstijging bedoeld.

deeltjes blijven grotendeels in de geulen, of bezinken op korte afstand van de geul. Daarom is het onder normale omstandigheden vooral het fijnere zand en het slib dat bijdraagt aan de kweldervorming.

Nog onbekend is in hoeverre de hoeveelheid slib in het water van de Waddenzee komt door processen in de Waddenzee zelf (opwerveling) of door wat er van buiten (van de Noordzee) naar binnen wordt getransporteerd (Van Duren et al., in prep.). In elk geval zorgen stroming en golfwerking ervoor dat veel zwevend materiaal in de waterkolom wordt gebracht, dat vervolgens onder rustige omstandigheden kan neerslaan. De variatie in concentratie slib en gesuspendeerd zand is zowel in ruimte als in tijd groot. Het water kan van tijd tot tijd troebel worden van de hoge concentratie aan gesuspendeerd materiaal. Onder zulke condities kunnen de deeltjes flocculeren en gemakkelijker tot bezinking komen. Dit kan nog verder worden versterkt als zeewater wordt gemengd met zoet water. De manier waarop zeewater en rivierwater met elkaar mixen in estuaria kan vervolgens de sedimentatie nog verder versterken (Haslett, 2009). Ook kunnen organismen kleine deeltjes in zogenaamde fecale pellets doen samenklonteren en daarmee sedimentatie bevorderen.

Recent is de aandacht voor de slibhuishouding toegenomen en is een verkenning geïnitieerd door Rijkswaterstaat en de Waddenacademie vanuit het programma 'Naar een Rijke Waddenzee'. Een belangrijke vraag is of er genoeg slib is om met opslibbing de zeespiegelstijging bij te houden. De verkenning is gericht op het hele Waddensysteem. De focus is op de Kaderrichtlijn Water en het vaarwegonderhoud. Er wordt niet ingezoomd op het niveau van kwelders (Van Duren en Van der Valk, 2010). Vooralsnog lijkt er voldoende slib en gesuspendeerd sediment in de waterkolom aanwezig te zijn om meerdere mm/jaar aan relatieve zeespiegelstijging in de kwelder door sedimentatie op te vangen. Langs de randen van de Waddenzee kan afhankelijk van de omstandigheden sedimentatie variëren van een paar mm per jaar tot meer dan een cm per jaar (Dijkema et al., 2007).

2.1.6 Kweldervegetatie

Kweldervegetatie vormt een belangrijke factor in kweldervorming vanwege de bijdrage aan het invangen van sediment en het vasthouden ervan (Allen, 2000) en voor de ontwikkeling van het krekensysteem (Dijkema et al., 2007). Daarnaast vormt de kweldervegetatie een bron van organisch materiaal in het systeem (Olff, 1997; Allen, 2000).

Kweldervorming begint bij de hoge wadplaten. Algen en bacteriën bevorderen daar het flocculatie- en samenklonteringsproces en beschermen ook samen met diatomeeën de bodem tegen erosie. Ze bevorderen zo de sedimentatie op de platen. Waar de platen hoog genoeg worden, kunnen zich naast algen ook hogere planten vestigen. Deze pionierplanten zijn bestand tegen dagelijkse overstroming met zout water, en kunnen instabiel en vaak zuurstofloos sediment verdragen. De belangrijkste pionierplant is Zeekraal (*Salicornia* spp.², figuur 2.3), die eenjarig is en groeit vanaf enkele decimeters onder GHW. Nadat Zeekraal in de herfst is gestorven, is deze habitat in de winterperiode kaal en gevoeliger voor erosie tijdens de winterstormen. In het volgend voorjaar moet de soort zich weer opnieuw uit zaad vestigen. Zeekraal faciliteert de vorming van krekens en de vestiging van Gewoon kweldergras (*Puccinellia maritima*). Ook het meerjarige Engels slijkgras (*Spartina anglica*³) vangt slib in en is goed bestand tegen erosie en dagelijkse overstromingen.

² *Salicornia* spp. staat hier eigenlijk voor tenminste twee soorten: Kortarige zeekraal (*Salicornia europaea*) en Langarige zeekraal (*S. procumbens*). De eerste komt voornamelijk voor boven GHW; de laatste voornamelijk beneden de GHW. Langarige zeekraal heeft dan ook een fastigiata groeiwijze.

³ Voorheen abusievelijk *S. townsendii* genoemd. Vroeger kwam in Nederland juist *S. maritima* voor, maar deze is na de introductie van *S. anglica* voor landaanwinningsdoelen door de laatste geheel verdrongen. *S. anglica* is een nieuwe soort die ontstaan is als diploïde bastaard van *S. maritima* en *S. alterniflora*.

De pionierzone kan door opslibbing ontwikkelen tot een lage kwelder. Pas op de lage kwelder begint de kreekvorming echt belangrijk te worden. Deze wordt aangejaagd door de dichte vegetatie van de lage kwelder zoals het paars bloeiende Lamsoor (*Limonium vulgare*), en vooral door Gewoon kweldergras (Van Straaten, 1964; Dijkema et al., 1990). De waterstroom wordt geconcentreerd in de lagere delen tussen de plantenpollen (Temmerman et al., 2007), waardoor daar minder sediment tot bezinking kan komen of zelfs uitschuring optreedt. Wanneer het plantendek dichter wordt, ontwikkelen zich in de lage gebieden krekken.



Figuur 2.3

Langerige zeekraal (Salicornia procumbens) links, en Kortarige zeekraal (S. europaea) rechts, op het wad bij Ameland (foto: Ivan Moysiyenko, september 2006)

Rond het niveau van GHW bereikt het meerjarige kweldergras voldoende bedekking om de opslibbing tot de hoogste waarden van de kweldervorming op te voeren, het krekensysteem verder te ontwikkelen en de erosie van de jonge kwelder tegen te gaan (Dijkema et al., 2001). Met het kweldergras zetten de meerjarige levensvormen (waaronder dwergstruiken) de successie voort en vergroten daarmee de erosiebestendigheid en de golfreductie door de kwelder. Als de kwelder nog hoger wordt, neemt meestal (met uitzondering van de oeverwallen) de sedimentatiesnelheid af doordat de gebieden minder frequent worden overstroomd. Door de andere overstromingsfrequentie en -duur verandert ook het plantendek. Gewoon kweldergras verdwijnt en maakt plaats voor planten als Roodzwenkgras (*Festuca rubra*), Zilte rus (*Juncus gerardi*), Fioringras (*Agrostis stolonifera*), Engels gras (*Armeria maritima*) en Melkkruid (*Glaux maritima*) (Dijkema en Bossinade, 1990). Hier komt door de zeldzame overstromingen maar af en toe een dun laagje slib en zeer fijn materiaal tot bezinking.

De zone die niet meer dagelijks overstroomt, is meestal qua vegetatie het meest gevarieerde deel van de kwelder. De snelheid van ophoging en ontwatering bepaalt de snelheid van de vegetatiesuccessie. Als de kwelder zich ongeveer 15 tot 20 centimeter boven GHW bevindt, neemt de diversiteit in plantensoorten weer af. In deze hoge zone kan zich Strandkweek⁴ (*Elytrigia atherica*⁵) vestigen. Strandkweek is een hoge, zoden-vormende grassoort, die andere soorten domineert. Dit is dan het eindstadium van de vegetatiesuccessie op

⁴ Recent vernoemd tot Zeekweek.

⁵ Vroeger *Elymus pycnanthus* geheten.

de kwelder. In een situatie met veel dynamiek duurt de successie vele tientallen jaren. Daar wisselen aangroei en afslag elkaar af en wordt de vegetatie voortdurend verjongd. Begrazing kan de ontwikkeling van een climax-vegetatie uitstellen of tegengaan.

Kwelders boven springvloedniveau kunnen af en toe toch verder ophogen doordat daar bij stormvloeden sediment wordt afgezet, zoals eerder beschreven. Omdat de hoge kwelder niet vaak wordt overstroomd, is het sediment van de hoge kwelder stabiel zodanig dat zich hier ook andere plantensoorten kunnen vestigen. Onder brakke (estuariene) omstandigheden zou de kwelder zelfs zo hoog kunnen komen te liggen dat vestiging van houtige struiken zoals Gewone vlier (*Sambucus nigra*) mogelijk wordt.

2.1.7 Ontwatering en inklinking

Ontwatering via het krekensysteem is voor de meeste kwelderplanten doorslaggevend voor de groei (en daarmee ook voor het invangen van slib) en bevordert de successie. De vegetatie zelf beïnvloedt de ontwikkeling van het krekensysteem (Dijkema et al., 2007; Temmerman et al., 2007). De afstand tot het wad of tot de kreek (de bronnen van het sediment) is een fysische factor voor de snelheid van opslibbing (Dijkema et al., 2007). Het tempo van ophogen van de kwelder gaat over het algemeen langzamer dan de neerslag van sediment, omdat het sediment door ontwatering en onder het eigen gewicht inklinkt.

Omdat slibrijk sediment meer inklinkt dan zandig sediment heeft dit consequenties voor de hoogteligging van de kwelders. Tijdens de vloed stroomt het water met zoveel kracht naar binnen dat ook wat zand meekomt dat, afgeremd door de vegetatie op de oeverwal bij de kreek tot bezinking komt. Iets verderop komt alleen het fijnste zand en slib tot bezinking en nog verderop alleen slib. Gaande vanaf de kreek nemen de zandlaagjes dan ook in dikte af, terwijl het kleiaandeel geleidelijk toeneemt. Door de dikteverschillen van de afzettingen en doordat slib meer inklinkt dan zand, neemt de hoogte af naarmate de afstand tot de kreek toeneemt. Vlak bij de kreek, en met name in buitenbochten, liggen echte oeverwallen die soms decimeters boven het omringende landschap uitsteken.

2.2 Stabiliteit en erosie van kwelders

Kwelders zijn het resultaat van de interactie tussen geomorfologische, hydrodynamische en biologische processen. Kweldervorming is een dynamisch proces met vele feedback-mechanismen. Het kweldersysteem is gevoelig voor veranderingen (Allen, 2000). In het Waddengebied is veel onderzoek gedaan naar de vegetatie en de successie, het effect van beheermaatregelen, sedimentatie en de verandering in het kwelderareaal (bv. Westhoff, 1947; Bakker 1989; Bakker et al., 2002; Dijkema et al., 2007). Ook op andere plaatsen is veel onderzoek verricht naar sedimentatieprocessen in kweldersystemen, vooral naar het kwantificeren van de sedimentatiesnelheden in relatie tot getij en stroming en windsnelheid.

2.2.1 Erosiebestendigheid

Om kwelders met succes in te kunnen zetten als onderdeel van de primaire waterkering, is het belangrijk om inzicht te hebben in de stabiliteit en erosie van kwelders tijdens extreme omstandigheden.

De vegetatie speelt een belangrijke rol in de erosiebestendigheid van de kwelder. Het wortelstelsel houdt de bodem vast en heeft een effect op de bodemstructuur door wateronttrekking en het toevoegen van organische bestanddelen. Vooral het effect van de vegetatie op de bodemstructuur en -samenstelling lijkt belangrijk voor de erosiebestendigheid (Feagin et al., 2009). De weerstand van de bodem tegen erosie wordt

ook bepaald door de korrelgrootte van het sediment en de bodemsamenstelling. De maximale samenhang wordt bereikt als de verhouding tussen zand en slib ongeveer 30% slib is (Houwing, 1995 in: Janssen-Stelder, 2000).

Feagin et al. (2009) namen waar dat aan de rand van een kwelder waarop sediment was aangebracht veel meer erosie optrad dan bij een natuurlijke kwelder, vanwege het hogere aandeel zand.

Zowel tijdens normale omstandigheden als tijdens storm kan erosie en sedimentatie plaatsvinden. Erosie van de bodem treedt op als de bodemschuifspanning groter is dan de weerstand van de bodem. Zowel stroming als golven leveren een bijdrage aan de bodemschuifspanning. Door golven kan materiaal in suspensie komen, maar voor transport van sediment is stroming nodig. Door storm wordt veel materiaal en ook relatief grof materiaal (zand) in suspensie gebracht hetgeen zowel tot erosie als tot ophoging van de kwelder kan leiden. Tijdens storm zal meestal erosie van de platen en pionierzone, en sedimentatie op de hogere zones optreden. Dit kan tot het ontstaan van een klif leiden (figuur 2.4).

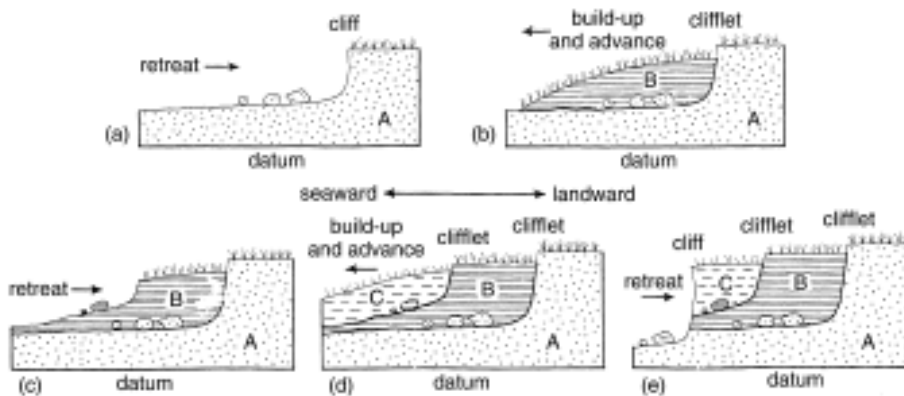


Figuur 2.4

Erosie van de kwelderrand op Ameland, ter hoogte van het Neerlands Reid en de Oerderduinen (foto: R.M.A. Wegman, augustus 2004)

2.2.2 Klifranden

Kliffen zijn een indicatie dat de kwelder zich landwaarts verplaatst en worden vaak in verband gebracht met het meanderen van geulen en getijstroom, toegenomen golfactiviteit of een afname in sedimentaanvoer. Kliferosie is een natuurlijk proces en na verloop van tijd kunnen voor het klif weer nieuwe kwelders aangroeien door opslibbing en het vestigen van pioniervegetatie (figuur 2.5). Het effect van kliferosie op het kwelderareaal is een verandering van kwelderzone in wad (afname in kwelderareaal) of in pionierzone (verjonging van de kwelder) (Dijkema et al., 2007). Een geleidelijke overgang komt vooral tot stand wanneer er voldoende sediment is, en de kwelder voortdurend zeewaarts aangroeit door permanente sedimentatie.



Figuur 2.5

Afwisselend erosie en aanslibbing in een kwelder kan een getrapte kwelderrand veroorzaken (Allen, 1993)

2.2.3 Sedimentatie

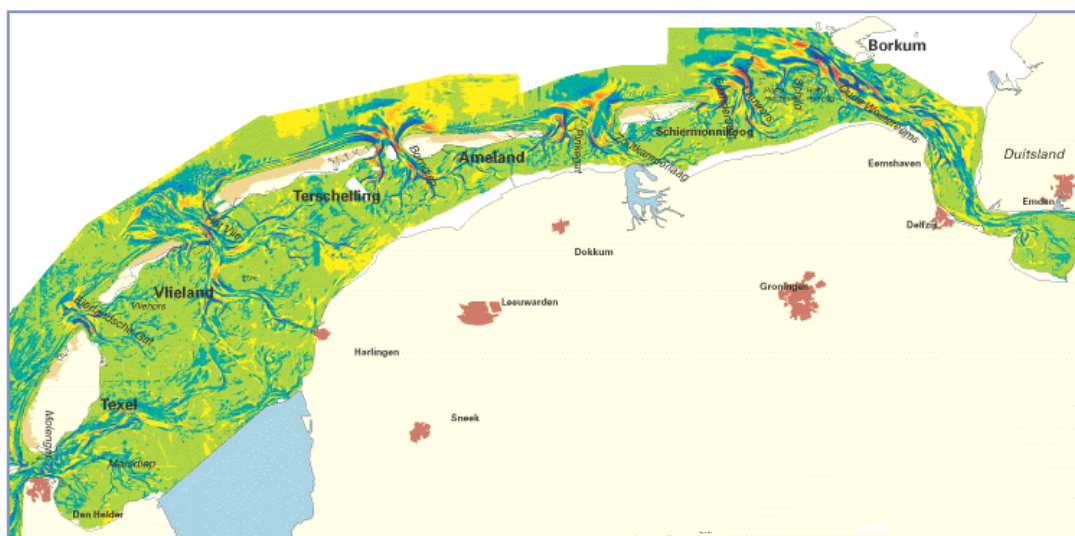
Voorals het sediment van buiten het systeem wordt aangevoerd, kan er op een relatief korte tijdschaal veel variatie zijn in de sedimentatiesnelheid (Détriché et al., 2011). De lange-termijnontwikkeling van kwelders wordt bepaald door de aanvoer van sediment en door de belasting (tijdens normale en stormomstandigheden), waarbij volgens Day et al. (2011) vooral de toevoer van sediment bepalend is voor het aangroeien of het eroderen van kwelders.

In de Waddenzee is voor de Groningse en Friese kust de bruto-opslibbing in de verschillende zones van de kwelderwerken langdurig gemonitord (zie WOT rapportage 'Monitoring van kwelders in de Waddenzee' van Dijkema et al., 2007). Over de decennia wordt een verandering in opslibbing waargenomen, waarbij de opslibbing van de pionierzone de GHW volgt (Dijkema et al., 2007). De vastelandskwelders langs de Friese en Groningse kust kunnen zich momenteel handhaven dankzij de aanwezigheid van de rijshouten dammen. Een verdichting van de rijshouten dammen kan de opslibbing van de pionierzone verhogen (Dijkema, pers. med.).

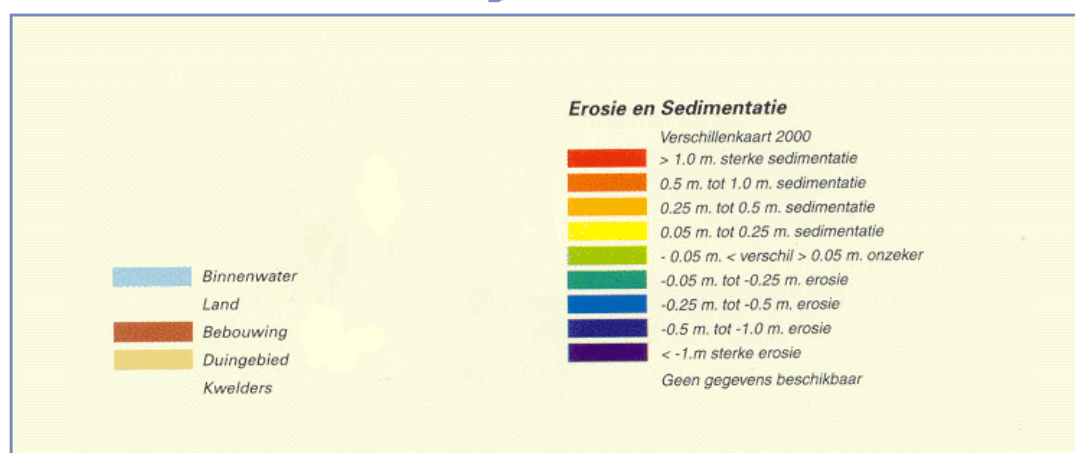
In figuur 2.6 is de erosie en sedimentatie in de Waddenzee weergegeven. Langs de Groninger Waddenzeekust heeft Houwing (2000) aan de hand van metingen vastgesteld dat erosie voornamelijk wordt bepaald door de hoogte van windgolven en daardoor zijn golven (en dus windsnelheden) belangrijk voor de ontwikkeling van kwelders.

In een jaar met veel stormen kan netto-opslibbing van de kwelder plaatsvinden, maar in de jaren daarna zal waarschijnlijk juist erosie in de pionierzone optreden, omdat veel zaden en zaailingen in het stormjaar zijn weggespoeld. Daardoor is de pionierzone minder goed in staat de hogere kwelderzones te beschermen (Janssen-Stelder, 2000). Als klimaatverandering een verandering van de stormduur, -frequentie en -richting tot gevolg heeft, zal dit ook de ontwikkeling van de kwelders beïnvloeden.

In de Mississippidelta werd waargenomen dat ook de hoogte van de kwelder van invloed is op het vasthouden van het sediment. Zowel op hoge als laaggelegen kwelderlocaties trad sedimentatie op, maar op de lager gelegen kwelders werd minder van het neergeslagen sediment vastgehouden waardoor ook de bodemstructuur veranderde (Day et al., 2011). Hierdoor kunnen planten zich moeilijker vestigen.



Legenda:



Figuur 2.6

Erosie en sedimentatie in de Waddenzee (Bron: data RWS, bewerking Deltares)

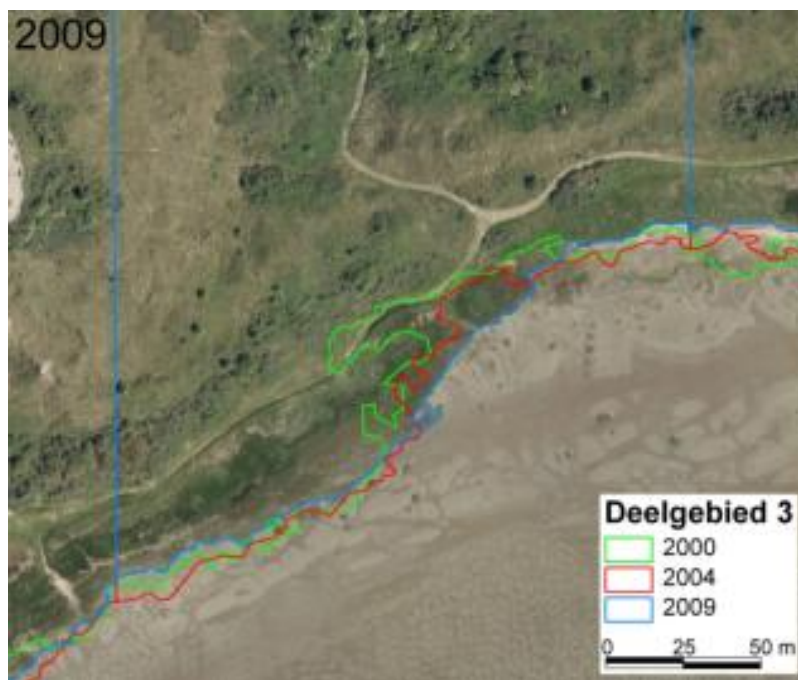
2.2.4 Rol aangrenzende slikken en pionierzone

Of het netto-effect van een storm sedimentatie of erosie is, hangt af van de hoeveelheid en de eigenschappen van het sediment dat aanwezig is zeewaarts van de kwelder. Dit is namelijk de voornaamste bron van sediment dat tijdens storm naar een kwelder kan worden getransporteerd. De afstand van de kwelder tot een getijgeul en de grootte en oriëntatie van deze geul is bepalend voor de transportcapaciteit naar de kwelder (Houwing, 2000; Janssen-Stelder, 2000). Dit betekent dat zowel de platen als de configuratie van de geulen voor de kwelder, van belang zijn voor de ontwikkeling ervan. Als er onvoldoende sediment wordt aangevoerd door de getijgeul, kan de aanwezigheid van een getijgeul vlak voor de kwelder juist leiden tot erosie, omdat dan hogere golven de kwelder kunnen bereiken. Nieuwe kwelders kunnen zich dus alleen daar ontwikkelen waar de aanvoer van sediment groot genoeg is. Dit is niet overal langs de vastelandskusten van de Waddenzee het geval: de potentie kan dus in eerste instantie worden afgeleid uit de waargenomen sedimentatiesnelheden (Figuur 2.6). Zones met een redelijk hoog potentieel lijken te zijn: 1) het gebied

westelijk van Friesland Buitendijks waar al decennia lang een sterke opslibbing plaats vindt en 2) het gebied westelijk van de Bocht van Watum (Eems-estuarium).

2.2.5 Pendelbeweging

Uit onderzoek op Ameland naar het gedrag van de kwelderrand onder de Oerderduinen blijkt dat de rand van de kwelder een pendelbeweging maakt die samenhangt met de grootschalige natuurlijke dynamiek van de eilandstaart. Tot ca. 1979 groeide de kwelder aan; daarna nam deze weer af (Sanders et al., 2005). Figuur 2.7 laat gedurende de laatste tien jaar het gedrag zien van wisselende afslag en aangroei van een stuk van de kwelderrand aldaar.



Figuur 2.7

Detail met afslag en aanwas van de kwelderrand tussen 2000, 2004 en 2009 op Ameland ter hoogte van de Oerderduinen (topografische ondergrond © Kadaster, 2009)

Resumerende hangt de stabiliteit van kwelders dus nauw samen met het voorland ervan: de wadplaten en geulen en hun sedimentaanbod. De natuurlijke dynamiek blijkt in hoge mate sturend voor kwelderontwikkeling, evenals het sedimentaanbod en de optredende stormvloed. Langs de Waddenkust van Friesland en Groningen zijn via kwelderwerken gunstige omstandigheden voor kweldervorming gecreëerd waardoor de kwelders zich kunnen handhaven. Wil een kwelder met enige betrouwbaarheid meerjarig kunnen worden ingezet als onderdeel van de waterkering, dan dient de kwelder een bepaalde minimale breedte te hebben zodat er voldoende kweldervoorland overblijft na erosie. Verschillende publicaties noemen dat er uiteindelijk ca. 80 meter kwelder over dient te blijven vóór de dijk (zie hoofdstuk 3). Hoeveel 'afslag-buffer' nodig is, is onbekend, en hangt af van de mate van herstel die mogelijk is tussen twee opeenvolgende erosiegebeurtenissen.

2.3 Kwelders als onderdeel van de Waddenkust

De kwelder is een overgangszone tussen het mariene en terrestrisch milieu (Oloff et al., 1997). Over het algemeen wordt een kwelder landwaarts begrensd door een verhoging (bijvoorbeeld een duin, dijk, kade of klifrand) en gaat zeewaarts (al of niet met een klifrand) over in slikken of zandplaten, en een geul die zorgt voor de aanvoer van water en sediment.

2.3.1 Natuurlijke buffer

Kwelders en de aangrenzende slikken maken integraal onderdeel uit van de Waddenkust. De Waddenkust kan worden getypeerd als een open barrière-kust met verschillende bekkens (Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2002). Het Waddengebied speelt een belangrijke rol in de kustverdediging van Noord-Nederland, en vormt een natuurlijke klimaatbuffer. De eilanden vormen een natuurlijke buffer tegen de deining en de kracht van de (hoge) golven. De golfenergie wordt geremd door de eilanden en door de wadplaten. De landaanwinningswerken en de kwelders van Noord-Nederland, en daarna de dijken vormen de volgende verdedigingslijnes.

2.3.2 Doelstellingen kwelders

Lange tijd waren de doelen voor kwelders gericht op agrarisch gebruik. Natuurlijk gevormde kwelders werden al vroeg in de geschiedenis gebruikt voor begrazing en het oogsten van hooi. In de Middeleeuwen begon men met het bedijken van de natuurlijk gevormde kwelders. Vanaf ongeveer de 17^e eeuw begonnen oevereigenaren kwelderaanwas te stimuleren door het graven van greppels. Buitendijks ontstonden gronden met een kunstmatig afwateringssysteem bedoeld om zoveel mogelijk slib in te vangen (Dijkema et al., 2001). Later werd een landaanwinningmethode toegepast waarbij bezinkvelden werden omgeven door rijshouten dammen die de golfslag en de stroming verminderden. Als de landaanwinningswerken voldoende waren opgehoogd, werd de kwelder ingepolderd en werden nieuwe bezinkvelden voor het ingepolderde deel gemaakt.

In de periode 1969-1980 werden nieuwe doelen voor de landaanwinningswerken benoemd (Dijkema et al., 2001):

1. voldoen aan de verplichtingen in de contracten met de oevereigenaren (in hoofdzaak streven naar 300 m beweidbare kwelder in de zogenaamde delimitatiezone);
2. kustbescherming, opgevat als handhaving van de status quo van het voorland voor de zeedijk (1969);
3. bescherming en herstel van de natuurwaarden (1980).

De landaanwinningswerken zijn in 1991 omgedoopt in kwelderwerken. Zonder de vroegere 'werken' zouden de vastelandskwelders er nu niet meer zijn, en zonder de huidige rijshouten dammen zouden deze kwelders weer verdwijnen (Dijkema et al., 2001). Veel van de buitendijkse kwelders zijn nu natuurgebieden.

Het Waddengebied is een van de weinige Europese gebieden waar geomorfologische processen op een grote schaal plaats kunnen vinden. Al in de eerste natuurbeheerplannen voor het Waddengebied, van eind jaren '80 van de vorige eeuw, is gekozen voor de beleidslijn om de dynamische processen zoveel mogelijk hun gang te laten gaan en zo weinig mogelijk in te grijpen. Dit is in de Planologische Kernbeslissing (PKB) vastgelegd. De natuurdoelen die voor kwelders gelden, zijn afkomstig van de PKB Waddenzee, Natura 2000, de Kaderrichtlijn Water en het Trilaterale Wadden Sea Plan.

PKB-Waddenzee

In de PKB-Waddenzee is vastgelegd dat in de Waddenzee zoveel mogelijk ruimte moet zijn voor natuurlijke processen. In de Nota van Toelichting bij de PKB-Waddenzee staan als doelstellingen voor kwelders: i) een

groter areaal aan natuurlijke kwelders, ii) een grotere natuurlijke morfologie en dynamiek en iii) een verbeterde vegetatiestructuur. Bij natuurherstel en ontwikkeling wordt o.a. gedacht aan vergroting van het kwelderareaal en het herstel van geleidelijke zoet- en zoutovergangen.

In de Nota van Toelichting is ook aangegeven dat menselijke ingrepen gericht op de waarborging van de veiligheid voor de bewoners en gebruikers van het waddengebied in beginsel zijn toegestaan. Doelstellingen voor de veiligheid zijn i) veiligheid is een essentiële randvoorwaarde voor bewoonde gebieden, en ii) vergroting van de veiligheid tegen hoogwater vergt meer veerkracht in het kustgebied. Een belangrijke strategie daarvoor is kustverbreding, die ertoe bijdraagt dat beter gebruik kan worden gemaakt van natuurlijke processen (aangroeien en afhalen/afkalven van de kustlijn) (Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, 2007).

Natura 2000-gebied Waddenzee

De Waddenzee is aangewezen als Natura 2000-gebied, een Europees netwerk van beschermde natuurgebieden, als belangrijk kerngebied in de nationale Ecologische Hoofdstructuur (EHS), en wordt door de Natuurbeschermingswet 1998 beschermd. Voor alle Natura 2000-gebieden moeten beheerplannen worden opgesteld.

De EU Habitatrichtlijn onderscheidt drie kwelderhabitats (Ministerie van Economische zaken, Landbouw & Innovatie, 2011):

- zilte pioniersbegroeiingen (H1310) die zowel eenjarige pioniervegetatie met Zeekraal op het kleiige wad en de lage kwelder als eenjarige pioniervegetatie met Zeevetmuur op de zandige overgang tussen kwelder en duin, de achterduinse strandvlakten en ingedijkte zandplaten omvat;
- slijkgraslanden (H1320) die vooral in Zuidwest-Nederland voorkomt;
- schorren en zilte graslanden (H1330) die een groot aantal vegetatietypen van kwelders (schorren) en zilte graslanden van zowel buitendijkse als binnendijkse gebieden omvat;

De aangrenzende slikken voor de kwelders behoren tot het type:

- slik- en zandplaten (H1140).

Voor de habitattypen zijn doelstellingen en kwalificerende soorten vogels (en planten) benoemd.

In de richtlijn staat dat de kwaliteit, dat wil zeggen de aanwezigheid van alle opeenvolgende stadia van een kwelder en de zoet-zoutovergangen, behouden of verbeterd moet worden.

Natura 2000 geeft aan dat voor kwelders (Habitattype 1330) dient te worden gestreefd naar het behoud van de oppervlakte en de verbetering van de kwaliteit. De Staat van Instanthouding van dit habitattype wordt in de Waddenzee als matig ongunstig beoordeeld. De kwaliteit kan worden verbeterd door de aanwezige variatie aan hoogtezones, geomorfologische vormen (groene stranden, sluffers, zandige kwelders, kleiige kwelders) en beheervormen (beweide en onbeweide kwelders) te behouden of te herstellen.

In de tabel Kernopgaven staat onder 'Diversiteit van schorren en kwelders' een behoudsopgave voor de schorren en zilte graslanden (buitendijks) in de Waddenzee met alle successiestadia, zoet-zoutovergangen, verscheidenheid in substraat en getijregime, mede als hoogwatervluchtplaats voor vogels (Ministerie van Economische zaken, Landbouw & Innovatie, 2011).

Kaderrichtlijn Water

De Kaderrichtlijn Water (KRW) heeft tot doel om de kwaliteit en kwantiteit van oppervlakte-, grond- en zeewater te beschermen. Daarmee moet de diversiteit en de kwaliteit van zoete, brakke en zoute watersystemen gewaarborgd blijven. Kwelders worden in de Kaderrichtlijn Water beschouwd als graadmeters voor waterkwaliteit. Rijkswaterstaat monitort het oppervlak van de kwelders en de samenstelling van de vegetatie en rapporteert hierover aan Brussel.

Benoemd is dat voor de bescherming tegen structurele erosie van de kwelders langs de vastelandskust onderhoud nodig is van de rijshouten dammen en dat dit in de praktijk het vullen, reconstrueren, verlengen en verhogen van de dammen betekent.

Indien er mogelijkheden zijn om kustbescherming te combineren met ontwikkeling van natuur, wil Rijkswaterstaat dit toepassen. Ook is een doel om de natuurlijke dynamiek zo weinig mogelijk te beperken zodat zich nieuwe platen, geulen en jonge duin- en kweldergebieden kunnen ontwikkelen. Voorts wil men het natuurlijk areaal aan kwelders, mosselbanken en zeegrasvelden optimaliseren (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009).

Uit een studie om voor de KRW de parameters voor de toestand van kwelders vast te stellen, blijkt dat het huidige areaal langs het vasteland van de Waddenzee lager is dan de historische referentie, en dat het areaal eilandkwelders in de oostelijke Waddenzee hoger is (Dijkema et al., 2005b). In de westelijke Waddenzee zijn de voorwaarden voor kweldervorming veranderd ten gevolge van de aanleg van de Afsluitdijk en door bedijkingen langs de vastelandskust. Op de oostelijke Waddeneilanden is er als gevolg van de aanleg van stuifdijken meer kwelderareaal dan op grond van de historische referentie verwacht mag worden. Een van de typen kwelders die voor de KRW zijn onderscheiden betreft 'zandige eilandkwelders' waarbij het wantij van Terschelling de scheidslijn vormt tussen 'Waddenzee west' en 'Waddenzee oost'. Gesteld wordt dat 'goede' kwelders eisen stellen aan het omvang van het areaal vanwege de kwetsbaarheid van kleine locaties, biodiversiteit en het mogelijk maken van cyclische ontwikkeling (Dijkema et al., 2005b).

Trilaterale afspraken kwelderbeheer

Tussen Denemarken, Duitsland en Nederland zijn de volgende doelen voor kwelders in de Waddenzee overeengekomen:

- vergroting van het areaal natuurlijke kwelders;
- vergroting van de natuurlijke morfologie en dynamiek, waaronder natuurlijke afwateringspatronen van kunstmatige kwelders, op voorwaarde dat de huidige oppervlakte niet wordt verkleind;
- verbetering van de natuurlijke vegetatiestructuur van kunstmatige kwelders, inclusief de pionierzone;
- gunstige omstandigheden voor trekkende en broedende vogels.

Werelderfgoed

In 2009 is de Waddenzee tot werelderfgoed benoemd. Daarbij zijn de criteria 'gevarieerd', 'dynamisch en jong' en 'oorspronkelijk' benoemd om kwelders als erfgoed te behouden.

Programma Rijke Waddenzee

Eén van de ontwikkelingstrajecten in het programma 'Naar een Rijke Waddenzee' betreft 'Overgangen vaste land - natte wad' in het cluster 'De Randen van het Wad'. Daarin wordt gestreefd naar verzachting van en bredere gradiënten in de overgang van het natte wad naar de vastelandskust vanwege ecologische doelstellingen en klimaatdoelstellingen. Centrale invalshoeken zijn onder meer (Stuurgroep Naar een Rijke Waddenzee, 2010):

- 'Jonge kwelders', omdat jonge kweldervegetatie belangrijk is vanuit het oogpunt van biodiversiteit. Benoemd is dat er in het samenhangende waddensysteem een tekort is aan jonge kwelders.
- 'Zoet-zout', omdat nu op vele plaatsen door dijken, sluizen en kaden de zoete en zoute watersystemen van elkaar zijn gescheiden waardoor o.a. vismigratie wordt bemoeilijkt.
- 'Klimaat', omdat een geleidelijke overgang van het natte wad naar de kust bijdraagt aan de klimaatbestendigheid van het Waddengebied. Vooral jonge kweldervegetatie is in staat sediment in te vangen zodat de zeespiegelstijging kan worden bijgehouden en de golfenergie op dijken wordt verminderd.
- 'Landschapsbeleving', omdat juist de overgangen tussen land en water aantrekkelijk zijn en daarmee een van de belangrijkste kwaliteiten leveren van het Waddengebied. Mooie kusten, rijke dijken, afgewisseld met kwelders bieden een hoge kwaliteit voor de landschapsbeleving.

Beheerstreefbeeld en monitoring kwelders

Voor kwelders staat zowel in de PKB Waddenzee als in het Trilaterale Wadden Sea Plan het doel 'vergroting van het areaal meer natuurlijke kwelders' voorop. Hieruit heeft Rijkswaterstaat een streefbeeld voor het beheer van kwelderwerken afgeleid (Van Duin et al., 2007):

- Handhaving huidig areaal vastelandskwelders binnen de kwelderwerken: compensatie voor kwelders die door indijkingen in het verleden verloren zijn gegaan.
- Natuurlijke ontwikkeling van de kwelders: het beheer van de kwelderwerken is op de langere termijn gericht op het zoveel mogelijk benaderen van een natuurlijke kwelderstructuur. Voorwaarden zijn behoud van de huidige oppervlakte en een zo gering mogelijk ruimtebeslag op het voorliggende wad.
- Verbeterde natuurlijke vegetatiestructuur, inclusief de pionierzone: het behoud en de ontwikkeling van een volledige successiereeks van pionierzone naar kwelderzones, met bijbehorende dynamiek.

Al 50 jaar worden de ontwikkelingen in de kwelders gemonitord om te beoordelen of de langjarige ontwikkelingen aansluiten bij de doelen die worden nagestreefd. Ook zijn er langjarige experimenten met beheer uitgevoerd zoals het aanpassen van de dimensionering van de rijshouten dammen en de ontwatering en beweiding van de kwelders. Het beheer van de kwelderwerken is op basis van de resultaten van deze monitoring en van praktijkervaring aangepast aan de natuurdoelstelling (Dijkema et al. 2010). Ook in Duitsland en Denemarken zijn kwelderwerken aangelegd en worden de ontwikkelingen gemonitord.

In de Waddenzee is het behoud van kwelders langs de vastelandskust vooral gericht op de instandhouding van de gunstige omstandigheden voor kweldervorming. Op enkele locaties, zoals bij Balgzand, is daarentegen wel sediment aangebracht. Op een aantal plaatsen, zoals bij de Grië op Terschelling of het Neerlands Reid te Ameland, wordt erosie van de kwelder voorkomen door beschoeiing (Van Loon-Steensma, 2011).

Beweiding kan de ontwikkeling van een climax-vegetatie uitstellen (door ganzen en hazen) of kan die tegen- gaan (door vee). Intensieve beweiding kan een kwelder in een jong stadium met weinig plantensoorten houden (Dijkema et al., 2007).



Figuur 2.8

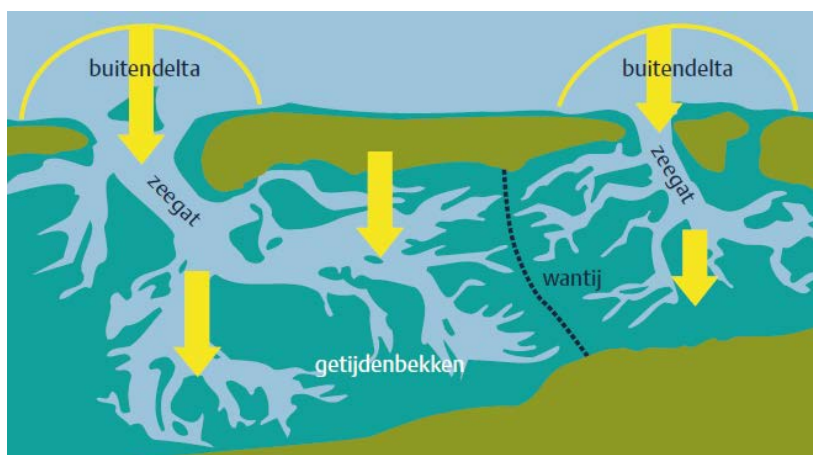
Kwelderwerken langs Friese Waddenzeekust (Noarderleech) (foto: J.M. van Loon-Steensma, oktober 2011)

2.3.3 Geschiedenis Waddengebied

Gedurende de laatste IJstijd lag een groot deel van de Noordzee droog. De rivieren Eems, Weser, Elbe en de Eider voerden hun water noordwaarts af naar een brede vallei (Figge, 1980). Diepe valleien schuurden uit. Toen na de laatste IJstijd de zeespiegel weer steeg, werden rond 8000 voor heden in Nederland en Nedersaksen deze valleien het eerst door de zee overstroomd (Beets en Van der Spek, 2000). Op de meeste andere plekken lag de zee, die toen nog 20 m lager stond, 10 tot 15 km zeewaarts van haar huidige positie (Vos en Van Kesteren, 2000). Kleine barrière-eilanden of strandruggen waren waarschijnlijk aanwezig, gevormd uit de resten van de Pleistocene landtongen (Flemming en Davis, 1994). Omdat de zeespiegelstijgingssnelheid (1 m/eeuw) op dat ogenblik nog niet kon worden bijgehouden door de sediment-afzettingssnelheid, verdronken grote stukken overstroomd land, zodat het gebied onder de laagwaterlijn kwam te liggen. Aan de landwaartse zijde lag een nauwe zone van zandige en modderige wadplaten en kwelders. De barrière-eilanden van het gebied zullen in de loop van de periode na de laatste IJstijd geleidelijk landwaarts zijn verschoven onder invloed van de snel stijgende zeespiegel (Figuur 2.9). Enerzijds verdronken de eilanden, anderzijds werd het zand afgevoerd en afgezet in het Waddengebied. De toename in getijslag resulteerde in sterkere getijstroomingen die waarschijnlijk meer sediment de waddenbekkens binnen brachten (Vos en Van Kesteren, 2000).

Rond 5000 voor heden begon de snelheid van afzetting van modder en zand het te winnen van de snelheid van zeespiegelstijging, waardoor de getijdeplaten hier en daar in omvang toenamen ten koste van platen onder de laagwaterlijn (Van Heteren en Van der Spek, 2003). Rond die tijd lag de keten van Waddeneilanden van Nederland en Nedersaksen nog enkele km's meer noordelijk dan tegenwoordig: ter hoogte van Terschelling lag de kust nog 9,5 km meer zeewaarts (Sha, 1990). Vanaf diezelfde tijd verliep de landwaartse migratie van de Waddeneilanden met een gemiddelde snelheid van ca. 2 m/jaar. Het zand werd grotendeels de lagunen van de Wadden ingespoeld en ving de zeespiegelstijging min of meer precies op (Van der Molen en De Swart, 2001).

Gedurende de volgende millennia nam de zeespiegelstijgingssnelheid geleidelijk af en de sedimentatie won het van de zeespiegelstijging. Als gevolg daarvan slibde het meer landwaartse deel op en breidden de kwelders zich zeewaarts uit (Vos en Van Kesteren, 2000). De afzettingen van zand en klei worden op veel plaatsen in en rond de Waddenzee afgewisseld met veenlagen die perioden van verlanding vertegenwoordigen (Behre, 2004). Veel van deze zoetwatermoerassen verdronken echter opnieuw en werden bedekt door getijafzettingen.



Figuur 2.9

Van nature is er een transport van sediment naar het Waddengebied en bewegen de eilanden richting vastelandskust (Löffler et al., 2008)

De zandige barrière-eilanden beschermden de bewoners die daardoor het gebied in bezit konden nemen vanaf ca. 2500 jaar geleden. Hun woonplaatsen laten perfect de oude kustlijnen en rivierlopen zien. Kort na 100 A.D. trad er een toename in stormvloedniveaus op. Tot aan de Late Middeleeuwen moesten de bewoners zichzelf beschermen door terpen aan te leggen (Vos en Knol, 2005). Een groot deel van het land lag nog buitendijks. De eerste grote dijkstelsels werden aangelegd aan het eind van de 10^e eeuw (Van der Spek, 1994).

Geleidelijk aan werden de dijkringen verbonden en verhoogd, en rond de 13^e eeuw was een aaneensluitend systeem van winterdijken aanwezig. Gedurende dijkbreuken overspoelde het zeewater laagliggende gebieden die gedaald waren door drainage, oxidatie van het veen, afbranden van de toplaag en compactie. Dit maakte het erg moeilijk om de gebieden die waren overstroomd weer droog te krijgen. Op deze manier ontstonden baaien zoals de Dollard en de Jadebusen.

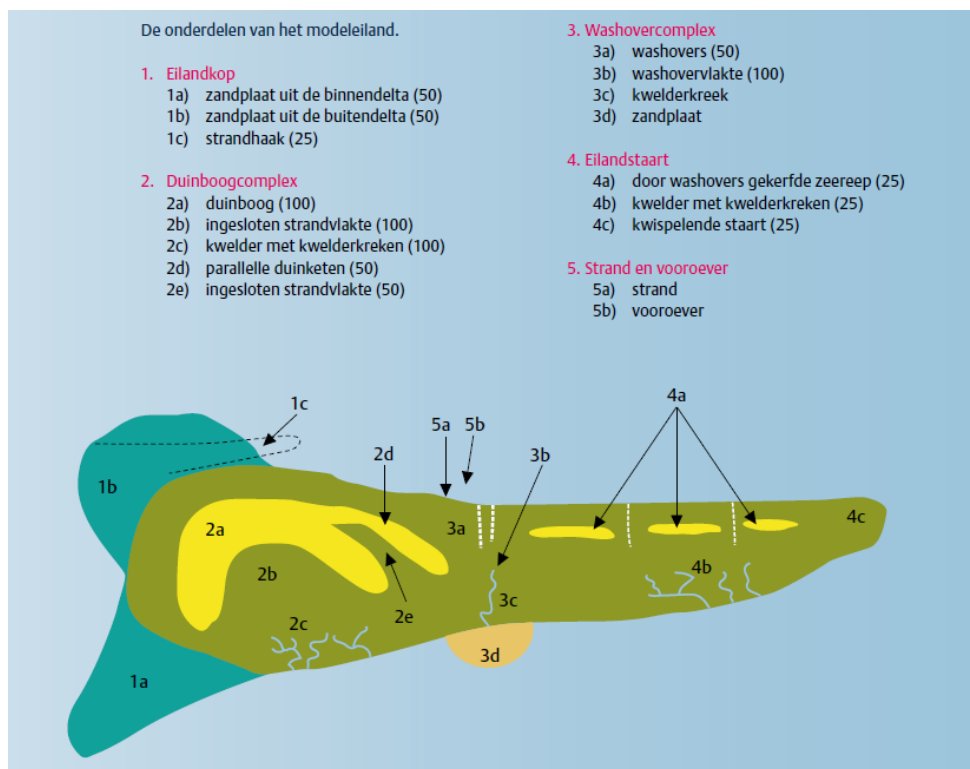
Later werden grote delen van het gebied ingedijkt hoewel plaatselijk ook forse stukken land verloren gingen, bijvoorbeeld op het Bernsersielser Watt waar huisfundamenten, putten, kloosterstenen, graven en keramiek worden gevonden (Heinze, 2000). Terwijl daar stormvloeden waarschijnlijk nog tot in de Late Middeleeuwen het gebied in Wadden veranderden, verzandde tegelijk de Harlebucht die als nieuw polderland werd ingedijkt. De kustlijn werd geleidelijk recht getrokken. De inhammen en uitstekende punten die zo bevorderlijk waren voor kweldervorming, verdwenen.

Het blijkt dat de aanvoer en neerslag van zand en slib in de Wadden een zeespiegelstijging van 20 cm per eeuw kan bijhouden. Een groot deel van het sediment wordt onttrokken aan de Noordzeekustzone. Bij een te snelle zeespiegelstijging zou het Waddengebied kunnen 'verdrinken' - dat wil zeggen volledig beneden de laagwaterlijn komen te liggen - omdat er niet genoeg sediment naar het waddengebied getransporteerd kan worden. Door Van Goor et al. (2003) is op basis van een modelstudie berekend dat het Amelandse Zeegat en het Eierlandse Gat naar verwachting qua sedimenttransport een zeespiegelstijging van 56 cm/eeuw kunnen bijhouden (met een waarschijnlijkheid van 90% voor het Amelandse Zeegat en van 99% voor het Eierlandse Gat). Die waarschijnlijkheid neemt af voor een hogere zeespiegelstijging en verwacht wordt dat wanneer de zeespiegelstijging meer dan 80 cm/eeuw bedraagt het Waddengebied zou kunnen 'verdrinken' (Van Goor et al., 2003).

2.3.4 Kweldervorming op de Waddeneilanden

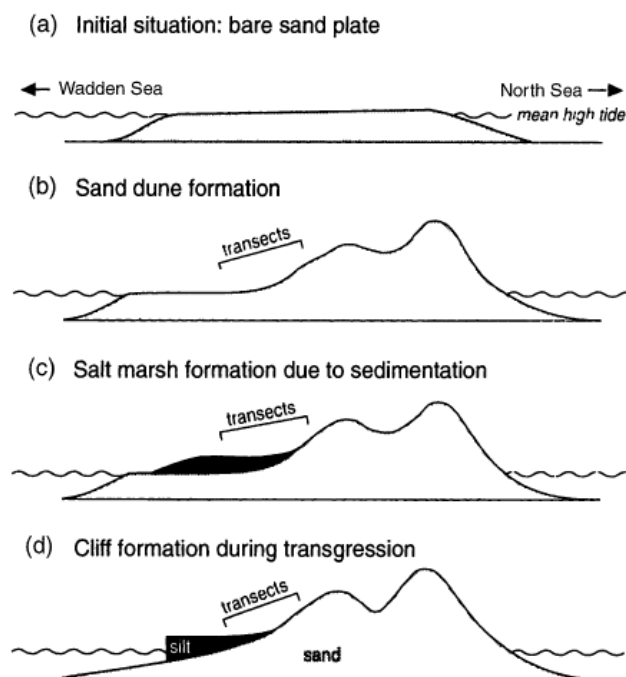
Löffler et al. (2008) beschrijven via het 'modeleiland' kweldervorming op de Waddeneilanden als volgt (Figuur 2.10). In de ondiepe zone voor de kust ontstaan zandbanken waarop zich duinen vormen⁶. Via 'washover'-processen wordt zand en slib vanuit open zee naar het gebied achter de barrière getransporteerd. Wind zorgt voor verstuiving van zand en daarmee voor de verdere vorming van duinen waardoor zich achter de duinen een luw gebied ontwikkelt waarop zich pioniervegetatie vestigt. Deze vegetatie vangt vervolgens slib in vanuit het wad en er hoogt een vruchtbare kleilaag op. Op een gegeven moment is de kwelder zo hoog dat nog maar sporadisch overstroming vanuit het wad plaatsvindt (Figuur 2.11). Als een kwelder vanuit zowel de Noordzee als de Waddenzee wordt overstroomd, neemt de afwisseling in processen als overstroming, afslag en aangroei toe, wat terug is te zien in de grote variatie van de kweldervegetatie (Löffler et al., 2008).

⁶ In navolging van de landschapsecoloog en vegetatiedeskundige H. Doing benadert Schiermonnikoog het meest het modeleiland.



Figuur 2.10

Modeleiland met daarin de hoofdvormen 1) Eilandkop, 2) Duinboogcomplex, 3) Washover-complex, 4) Eilandstaart en 5) Strand en Vooroever (Löffler et al., 2008)



Figuur 2.11

Schematische ontwikkeling van een kwelder op een barrière- eiland (een Waddeneiland) (Olff et al., 1997)

3 **Golfreductie in het voorland van waterkeringen**

Zoals in hoofdstuk 2 beschreven, spelen kwelders als onderdeel van de kustgradiënt, inclusief de kwelder-vegetatie, een belangrijke rol in de dissipatie van golfenergie. Kwelders vormen als het ware een natuurlijk voorland⁷, dat de golfenergie al dempt voordat de golf een kunstmatige dijk of dam bereikt. Dit principe heeft geleid tot interesse vanuit zowel beleid als onderzoek in de mogelijke bijdrage van kwelders aan de waterveiligheid. Met het oog op de verwachte effecten van klimaatverandering zoals de toenemende zeespiegelstijging en mogelijke toename van de golfaanval op dijken, is deze interesse toegenomen. Na een korte inleiding over golven in het Waddengebied (3.1) wordt in dit hoofdstuk ingegaan op de verschillende factoren en aspecten die de golfreducerende werking van het voorland beïnvloeden. In hoofdstuk 2 is aandacht besteed aan erosie en sedimentatie in de Waddenzee.

3.1 Golven in het Waddengebied

De golven die de kwelder bereiken, zijn afhankelijk van de golven en de golfvoortplanting in het Waddengebied. Deze worden bepaald door een scala aan factoren (Winterwerp, 2011):

- de golven op de Noordzee, buiten de ring van Waddeneilanden: een deel van deze golven dringt door tot in het Waddengebied;
- de waterstand en stromingen in de Waddenzee, welke in belangrijke mate worden bepaald door getijfase en windopzet op de Noordzee;
- de windsnelheid en -richting in het Waddengebied, verantwoordelijk voor lokaal opgewekte golven en windopzet, in relatie tot de strijklengte van de wind;
- de bodem van het Waddengebied:
 - o de bodemligging van het Waddengebied (platen, geulen, bodemhellingen, strijklengte, oriëntatie, strekdammen, etc.);
 - o bodemstructuur (ruwheid bij golfdemping door wrijving);
 - o bodemsamenstelling (de 'slibinvloed', bepalend voor weerstand tegen erosie);
 - o eventuele vegetatie en andere biota zoals oesterriffen, die de bodemruwheid groter maken.

De golfaanval op de vastelandskwelders langs de Friese en Groningse Waddenzeekust wordt mede bepaald door de ligging en oriëntatie van geulen en wantijen, en varieert hierdoor in de lengterichting van de kust. Achter de eilanden liggen geulen meer parallel aan de kust, waardoor diep-watergolven (vanaf de Noordzee) minder ver landwaarts kunnen doordringen (situatie Friese kust) dan op die locaties, waar de hoofdgeulen meer loodrecht op de kust staan en dichtbij de kust lopen (Groninger kust). Bovendien zijn de barrière-eilanden (Schiermonnikoog, Rottumerplaat en Rottumeroog) voor de Groningse kust kleiner dan de eilanden voor de Friese kust. Dit resulteert langs de Groningse kust in hogere turbulentie en minder fijn afgezet materiaal in de kwelders dan langs de Friese kust, waar diep-watergolven worden gedissipeerd op de platen en een hoger slibgehalte wordt gevonden (De Glopper, 1986 in: Janssen-Stelder, 2000). De ligging en

⁷ Het (diepe of ondiepe) flauw oplopende gedeelte (maximaal talud van 1:10) vóór en aansluitend aan de dijk (Van der Meer, 2002).

oriëntatie van de geulenstelsels en de eventuele verandering hiervan op lange termijn, is een belangrijke factor voor de golfaanval op en ontwikkeling van de kwelders.

3.2 Golfdemping door kwelders en slikken

Golfdemping door kwelders en slikken kan door verschillende factoren/processen plaatsvinden. Kwelders kunnen golven dempen/reduceren door:

- het bodemprofiel (in feite de vooroever⁸ van de dijk);
- vegetatie, hoewel dat effect klein zal zijn tijdens stormomstandigheden indien er veel water op de kwelder zou staan;
- interne wrijving in de bodem (kan ook in niet-verweekte zachte slikken optreden);
- indirect kunnen kwelders de golfevolucie beïnvloeden door hun effect op de lokale stroming: de kwelders vormen deel van de lokale bathymetrie, en beïnvloeden dus de stroming, en daarmee de stroom-golfinteractie.

Wel is de golfreducerende werking van kwelders en slikken in belangrijke mate afhankelijk van de optredende waterstanden: naarmate het water hoger staat, vindt minder interferentie plaats tussen de golven en de bodem (zie 2.1.2).

3.2.1 Bodemprofiel en golfreductie

Hoogte en afmeting

Kwelders en slikken beïnvloeden (mits de waterstand niet te hoog is) de golfhoogte zowel door golfbreking als door wrijving. Ook zijn het bodemprofiel, de golfhoogte, de steilheid van de golven en de wind van invloed op de golfbreking.

In de literatuur is een wijde range te vinden in de verhouding tussen golfhoogte (H) en waterdiepte (h) waarbij de golven breken (H/h), variërend van 0,45 voor een horizontale bodem, tot waarden van 0,6 tot zelfs 1,59 (Battjes en Stive, 1985; Kaminsky en Kraus, 1993 in: Holthuijsen, 2007).

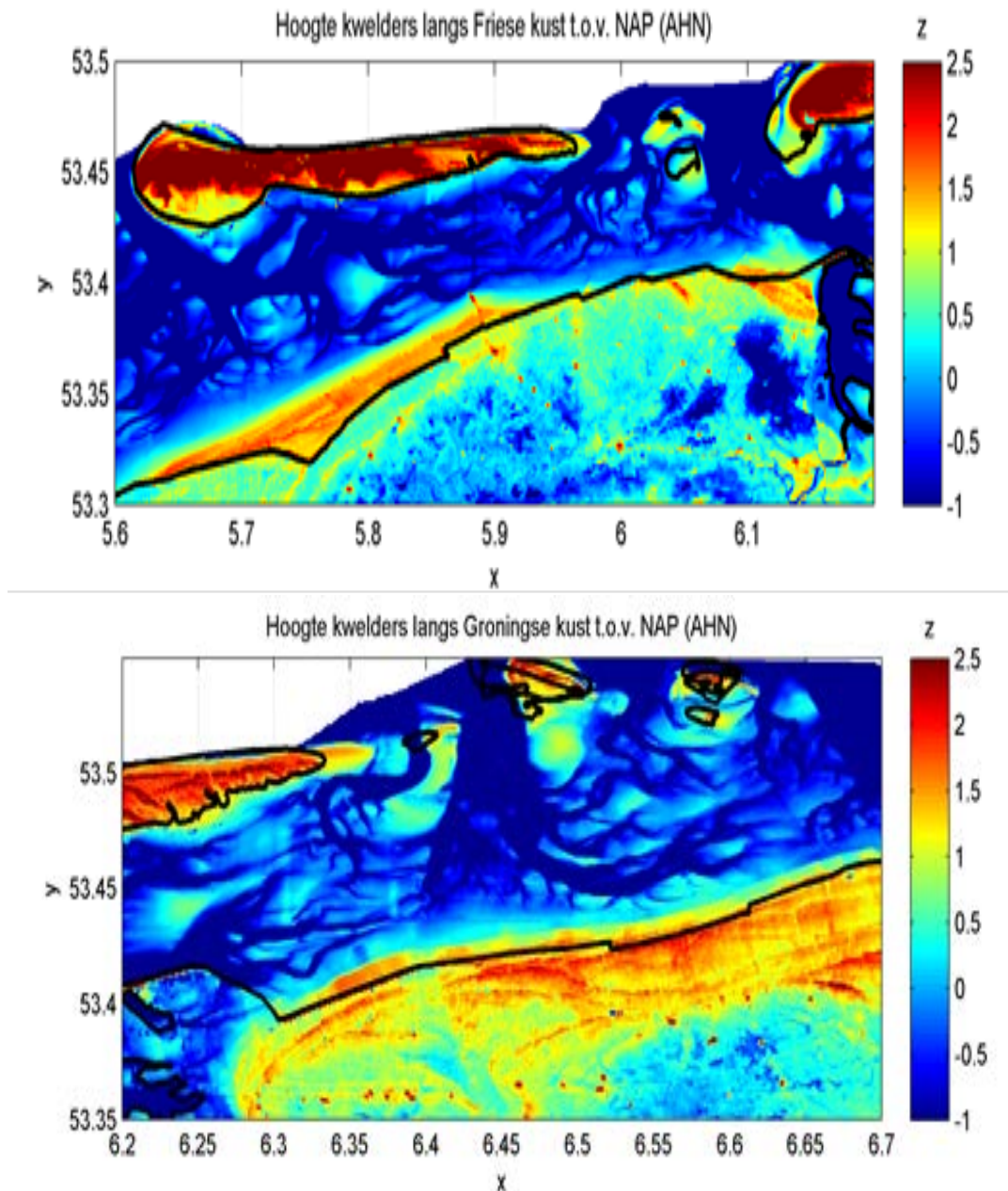
In figuur 3.1 staat de hoogte van de (semi-natuurlijke) kwelders langs de randen van de Waddenzee weergegeven.

Niet alleen de hoogte van de kwelders en slikken beïnvloedt de golfvoortplanting, maar ook kwelderwerken hebben (mits de waterstanden niet te hoog zijn) een golfreducerende werking. De palenrijen en rijshouten dammen hinderen de golfvoortplanting waardoor lage golven optreden in de bezinkvakken. Voor de vastelandskwelders in de Waddenzee werd voor de significante golfhoogte ($H_{1/3}$, die ruwweg 2x zo groot is als de H_{rms} ⁹) een gemiddelde waarde $H_{1/3}/h$ van 0,1 (dus ongeveer $H_{rms}/h=0,05$) voor de platen en kwelders gevonden, en een waarde van 0,2 (dus ongeveer $H_{rms}/h=0,1$) voor de pionierzone tijdens hoogwater (Janssen-Stelder, 2000). Deze lage waarden voor de Waddenzee worden veroorzaakt door de aanwezigheid van de palenrijen (J. Groeneweg, pers. med.). Afhankelijk van de hoogte van de palen, kan 25-50% van de golfenergie worden gedissipeerd (Erchinger, 1994 in: Houwing, 2000).

⁸ De vooroever is het gedeelte van de kuststrook zeewaarts van de laagwaterlijn tot de zeebodem, ook wel onderwateroever genoemd.

⁹ H_{rms} = 'root-mean-square wave height'.

Ook voor golfdamping door wrijving worden in de literatuur verschillende waarden genoemd voor een verhouding tussen de waterdiepte en de golfhoogte, maar deze zijn sterk afhankelijk van plaatselijke omstandigheden. Voor de slikken van de Brouage (Frankrijk) is gevonden dat niet golfbreking, maar wrijving op het slik dominant is (Le Hir et al., 2000). Hier werd een ratio van de gemiddelde golfhoogte (H_{rms}) in relatie tot de waterdiepte (h) gevonden van $H_{rms}/h=0,15$. Voor het estuarium van de Seine is een ratio van $H_{rms}/h=0,28$ gevonden (Le Hir et al., 2000).



Figuur 3.1

Hoogtekaart van de Waddenkust (Bron: www.openearth.nl)

Golfdamping door bodemwrijving is alleen van belang over grote afstanden (meerdere golflengten). Hiertoe dient de kwelder dus voldoende breed te zijn. De meeste golfenergie wordt gedissipeerd in de eerste tientallen meters van de kwelder. Volgens Mol (2004) wordt de meeste golfenergie gedissipeerd over de

eerste 10-50 m van de kwelder. Möller et al. (1999) vonden een reductie van de golfhoogte van ca. 50% over de eerste 10-20 m van de begroeide kwelder. Voor de minimale breedte van een kwelder moet echter niet alleen worden gekeken naar de golfdempende eigenschappen, maar ook naar de afname van de kwelder door storm. Na storm moet er immers nog voldoende breedte beschikbaar zijn om een volgende storm te kunnen doorstaan wil een kwelder serieus dienst doen als onderdeel van een waterkering.

Ruimtelijke en temporele variabiliteit

Het kwelderoppervlak is niet gelijkmatig en stabiel, maar vertoont zowel ruimtelijke als temporele variabiliteit, en reliëf in de vorm van krekken, kreekranden, kliffen en poelen. Ook vegetatie varieert zowel in ruimte als in tijd in hoogte, dichtheid en structuur (zie 3.2.2). Deze ruimtelijke en temporele variabiliteit van kwelders heeft invloed op de golfdempende werking. Zo treedt bijvoorbeeld tussen de slikken en het begroeide deel van de kwelder, 'shoaling' en reflectie op, door de rand zelf en door de vegetatie op de kwelder. Hierdoor neemt de golfhoogte bij de klifrand plaatselijk toe (Möller et al., 2002; Mol, 2004). De reflectie is afhankelijk van de waterhoogte ten opzichte van de klifrand. Kliffen kunnen een hoogte hebben van enkele centimeters tot een meter. Als de klifrand niet wordt overstroomd, kan er volledige reflectie optreden, en bij hogere waterstanden kan een minimale reflectie van 30% optreden (Callaghan et al. 2010). Toename van de golfhoogte bij de klifrand veroorzaakt veelal snellere erosie van de klifrand en leidt daarmee tot verkleining van de kwelder (Figuur 3.2).



Figuur 3.2

Klifrand kwelder Neerlands Reid te Ameland (foto: J.M. van Loon-Steensma, september 2011)

Aanpassing bodemprofiel

Kwelders reageren net als stranden en duinen op een verandering in input van energie met een geomorfologische aanpassing. Stormcondities kunnen leiden tot verticale erosie en laterale terugtrekking van de kwelder, en tot sedimentatie (en daarmee tot ophoging) van de aangrenzende slikken. Deze respons is vergelijkbaar met de processen bij een zandstrand. Verschillen tussen strand en kwelder in respons en processen hebben onder meer te maken met de verschillen in cohesiekrachten tussen de deeltjes. Zowel duinen als kwelders fungeren als een lange-termijnopslag voor sediment dat onder extreme omstandigheden beschikbaar komt voor korte-termijn processen. Net als duinen vormen kwelders een soort *back-up*, voor als de voorliggende zand- en slikbanken extreme golven niet voldoende kunnen dempen.

Het afvlakken van de gradiënt tijdens extreme gebeurtenissen betekent in feite dat het intergetijdenprofiel wordt verlengd en het gebied waarover dissipatie van golfenergie kan plaatsvinden, toeneemt (Pethick, 1992).

3.2.2 Invloed vegetatie

Kweldervegetatie heeft vooral effect op de bodemwrijving en heeft alleen een golfreducerende werking als de waterstand niet te hoog is. In tabel 3.1 staan weerstandcoëfficiënten uit het Amerikaanse civieltechnisch handboek van CERC (1984).

Tabel 3.1

Weerstandcoëfficiënt bij verschillende soorten oppervlak (CERC, 1984)

Soort oppervlak	Weerstandcoëfficiënt (f)
Gladde, zandige bodem	0,01
Dichte plukken kweldergras	0,07 - 0,47
Dichte grasvegetatie, stoppels of houtige opslag	0,16 - 0,86
Dichte struiken of bomen met lage ondergroei	0,59 - 1,11

Er zijn op verschillende plaatsen veldmetingen verricht aan de golfdemping in begroeide kwelders. Uit metingen in Norfolk (UK) kwam naar voren dat hier de gemiddelde reductie in golfhoogte op de onbegroeide zandplaat 15% (maximaal 34%) en op de begroeide kwelder gemiddeld 61% (met maxima tot 98%) bedroeg. De dissipatie van golfenergie bedroeg op de begroeide kwelder gemiddeld 82%, terwijl dat op het onbegroeide zand 29% was (Möller et al., 2001). Ook kwam naar voren dat de reductie in golfenergie in de begroeide kwelder hoger is wanneer er relatief weinig water op de kwelder staat (<1,1 m). Op de onbegroeide zandplaat is de dissipatie bij elke waterdiepte erg variabel. Wanneer er veel water op de kwelder staat (>1,3 m), neemt de golfdempende werking af. Op basis van deze gegevens hebben Möller et al. (2001) berekend wat de bijdrage van een begroeide kwelder is aan de waterveiligheid ten opzichte van een kale zandplaat. Vooral als er relatief weinig water op de kwelder staat (<0,7 m) heeft het verwijderen van de vegetatie in de model-simulatie (>3 maal) hogere golven aan de voet van de kering tot gevolg. Uit de simulatie blijkt dat bij waterdiepten >1,3 m het verwijderen van de vegetatie nauwelijks effect heeft op de golfhoogte. De verandering in golfhoogte kan worden vertaald in golfoverslag.

Möller et al. (1999) analyseerden ook de veranderingen in de golfspectra voor metingen in Norfolk (UK). Bij de overgang van de zandplaat naar de rand van de begroeide kwelder schoof de spectrale piekperiode van de golven op naar hogere frequenties en deels weer terug bij verdere voortplanting van de golven over de kwelder. Daarnaast viel op dat voornamelijk hoge frequenties en lage amplitudes werden gedempt door de zandplaten en alle frequenties en amplitudes door de kwelders. Vooral voor golfdemping door slikken kan deze herverdeling van frequenties van belang zijn omdat slikken alleen bij een beperkt aantal frequenties veel energie kunnen dissiperen.

In de pionierzone heeft vooral de invasieve exoot Engels slijkgras (*Spartina anglica*) invloed op de golfreductie. Deze soort kan wel meer dan 1 m hoog worden en biedt met zijn massa vlezige wortelstokken goed weerstand tegen kusterosie. In de Westerschelde werd voor slijkgras van 0,4 m hoogte een significante golfdemping gevonden bij een waterhoogte van maximaal 1 m boven de kwelder (Mol, 2004). Hoe kleiner de waterdiepte, hoe groter de golfdemping. Zo werd bij een waterdiepte van 0,35 m een golfreductie van 87% gevonden (Mol, 2004).

In het Yangtze-estuarium is de golfdemping door *Spartina alterniflora* gemeten. Tijdens de meetperiode kwamen golfhoogten tot 1,5 m voor, wat aanzienlijk hoger is dan de hoogten die in veel studies in NW-Europa worden genoemd (bv. Möller, 2001). Ook hier bleek er een sterk verband tussen de golfhoogte en de waterdiepte te zijn. De golfdemping boven de begroeide kwelder was tot tweemaal zo groot als boven het slik (gemeten per afstand). Een deel van de demping komt door een steilere verticale gradiënt boven de kwelder, maar ca. 80% kan aan de kweldervegetatie kan worden toegeschreven (Yang et al., 2012). De golfhoogte nam vooral af over de eerste 7,5 m (30%). Over de eerste 20 m nam de golfhoogte af met zo'n 50% en over de eerste 50 m van de kwelder met bijna 80%. Yang et al. (2012) leiden hieruit af dat de gemiddelde afstand waarop de golfhoogte wordt gedempt 80 m is, met de aantekening dat bij hoogwater meer dan 100 m nodig zal zijn om de hoogst gemeten golfhoogten te dempen. Als wordt aangenomen dat 80% van de demping door vegetatie wordt veroorzaakt, dan zou bij een onbegroeide kwelder 400 m nodig zijn om de golfhoogte te reduceren (Yang et al., 2012). Ook de verticale gradiënt van de kwelder is belangrijk omdat deze bijdraagt aan de golfdemping, en omdat deze gradiënt bepalend is voor de hoogte van het water boven de hoge kwelder.

In het Waddengebied is de golfreductie in de Paezmerlannen gemeten en zijn de golven op de kwelder met SWAN (zie paragraaf 3.5.1) gemodelleerd om de invloed van de kwelder op de golfdemping te onderzoeken. Deze kwelder bevindt zich achter een zomerdijk. De invloed van de vegetatie is meegenomen door een hogere bodemwrijving aan te nemen. In deze studie werden waarden van $H/h=0,37$ voor een onbegroeide, en $0,15-0,25$ voor het begroeide deel van de kwelder gevonden. Het gaat hierbij om waterstanden van maximaal 0,8 m (Effing, 2005).

Naast de waterstand, is de demping door vegetatie ook afhankelijk van de eigenschappen van de begroeiing zoals hoogte, stijfheid/flexibiliteit, dichtheid, vorm en stengeldiameter. Uit veldmetingen in Essex (UK) blijkt dat vooral de hoogte van de kweldervegetatie effect heeft op de golfdemping, maar dat het moeilijk is om een direct significant verband aan te tonen tussen de dichtheid en het type kweldervegetatie en golfdemping (Möller, 2006). Ook in de Yangtze delta werd een verband tussen de golfdemping en de waterhoogte/plantenhoogte ratio gevonden (Yang et al., 2012). Verder vonden Yang et al. (2012) dat wanneer een geschikte factor voor 'drag' (de stromingsweerstand, die in plaats en tijd varieert door verschillen in de karakteristieken van de vegetatie en abiotische factoren) wordt gebuikt, diverse van de reeds ontwikkelde modellen kunnen worden toegepast om de golfdemping door de kweldervegetatie te voorspellen.

De variabiliteit in golfdemping tussen de jaren heeft onder meer te maken met seizoensgebonden veranderingen in vegetatiestructuur en -hoogte (Möller, 2006). Vooral rond de kwelderrand wordt de vegetatieontwikkeling, en daarmee de golfdemping, beïnvloed door het seizoen.

3.2.3 Demping door riet- en biezenvelden

Op sommige plaatsen, waaronder de Baltische kust, worden uitgestrekte riet- en biezenvelden langs de kust aangetroffen. Ook riet- en biezenvelden hebben een golfdempende werking, die afhangt van de waterdiepte en de hoogte van de vegetatie. Uit onderzoek langs de Baltische kust blijkt dat planten op locaties die aan de wind zijn blootgesteld, een relatief grotere stengeldiameter hebben (en daardoor steviger zijn en minder gemakkelijk meebuigen met de stroom) dan planten op meer beschutte locaties. Ook had zich op de aan wind blootgestelde locatie een klifrand in het riet ontwikkeld, die mede bepalend was voor de golfreductie (Möller et al., 2011).

In het Baltische gebied heersen minder zoute omstandigheden dan langs onze kusten, maar vergelijkbare omstandigheden kunnen in Nederland langs onze kust worden aangetroffen waar onder invloed van (zoete) kweldruk of anderszins, Riet (*Phragmites australis*), Heen of Zeebies (*Bolboschoenus maritimus*), of Ruwe bies (*Schoenoplectus tabernaemontani*) worden aangetroffen. Een voorbeeld hiervan is de kwelderrand onderlangs

de Oerderduinen op Ameland alwaar (restanten van) riet- en biezenvelden een duidelijk dempende werking hebben op de afslag van de kwelderrand (zie Figuur 3.3). Voorwaarde is wel dat de begrazing ervan door landbouwhuisdieren niet al te zwaar mag zijn.

Er is bij riet- en biezenvelden niet alleen sprake van golfdemping, maar ook van fysieke weerstand tegen kusterosie omdat deze hoge, overjarige soorten zich vegetatief uit kunnen breiden en daarmee een dichte mat van rhizomen (wortelstokken) kennen (zie Figuur 3.4). Heen vormt zelfs nog een extra 'wapening' via stevige wortelknollen.



Figuur 3.3

Riet- en biezenveld (bruingekleurde strook) voor de kwelderrand onderlangs de Oerderduinen op Ameland (Google Earth 2005)



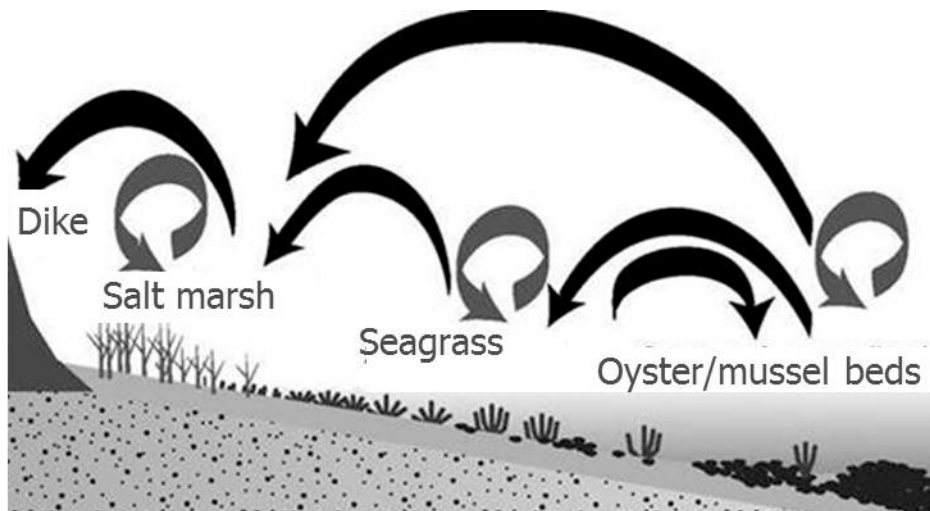
Figuur 3.4

Dichte mat van wortelstokken van Riet op de kwelderrand van Rømø (foto: P.A. Slim, oktober 2011)

3.2.4 Demping door gradiënt van biobouwers

Organismen die biotische en abiotische omstandigheden zodanig kunnen veranderen dat zij in plaats en tijd een effect hebben buiten de eigen leefomgeving worden ook wel 'ecosystem-engineers' of 'biobouwers' genoemd. Net als kwelders fungeren zeegrasvelden, oesterriffen en mosselbanken, die afzonderlijk en in onderlinge samenhang bijdragen aan het invangen en vastleggen van sediment in de kustzone, als opbouwende ecosystemen van de kust (Borsje et al., 2011). Deze ecosystemen kunnen elkaar in opbouw positief beïnvloeden.

Meyer et al., (1997) en Henderson en O'Neil (2003) beschrijven dat oesterriffen golfenergie dempen en bijdragen aan de stabilisatie van andere estuarine habitats. Oesterriffen bevorderen sedimentatie en zijn een levende golfbreker die kunnen aangroeien met snelheden die de hoogst voorspelde zeespiegelstijging ruim overtreffen. Ze helpen daarmee kusterosie en ecologisch habitatverlies tegen te gaan, hetgeen zonder natuurlijke buffers dramatische proporties aan kan nemen (Reed, 1995, 2002; Zedler, 2004). Hieruit blijkt dat biobouwers en door biobouwers gefaciliteerde soorten een bijdrage kunnen leveren aan duurzame kustverdediging. Voorwaarde daarbij is wel dat zij duurzame structuren moeten vormen, willen ze met enig vertrouwen kunnen worden ingezet voor de kustverdediging.



Figuur 3.5

Gradiënt van biobouwers die de bodem stabiliseren, sediment vastleggen en daarmee de kust beschermen. Pijlen geven positieve effecten aan van stabilisatie, vastlegging en bescherming (De Vries et al., 2007)

De Vries et al. (2007) en Van Katwijk et al. (2007) beschrijven de rol van biobouwers op verschillende ruimtelijke schalen in het ecosysteem. Ophoging van wadplaten (tot een nieuw evenwicht is bereikt) kan worden gerealiseerd door de inzet van schelpdierbanken, al dan niet in combinatie met zeegras. De schelpdierbanken vangen extra sediment (zand en slib) in, produceren (pseudo-)faeces, stabiliseren het sediment, en door hun ophoging ontstaat een golfreductie richting de kust, waardoor deze kan ophogen (Figuur 3.5).

In de Oosterschelde is onlangs een grootschalige proef uitgevoerd waarbij door middel van nieuw aangelegde oesterriffen erosie van intergetijdengebied wordt voorkomen of zelfs omslaat in aanwas. Hierdoor worden dijken op lange termijn minder belast door golven of dieper wordend water. Er blijkt veel broedval van nieuwe oesters op te treden en naar verwachting zal zich een levende schelpenbank ontwikkelen. Ook is te zien dat achter de riffen zand wordt vastgehouden (Fiselier et al., 2011). Bij een recente dijkversterking in de ZW-Delta is een aantal voor de dijk liggende oesterputten hersteld als compensatiemaatregel voor aantasting van habitats door dijkversterking. Deze oesterputten werden vroeger gebruikt om oesters te verwateren, maar

blijken nu een groeiplaats van talloze andere mariene organismen (zowel onderwaterfauna, zoöbenthos als algen).

Op basis van de modelsimulaties voor de Nederlandse kust concluderen De Vries et al. (2007) o.a. dat:

1. Schelpdierbanken de golfwerking dempen en de stroming afzwakken. Zodoende is de erosie tussen de banken en de kwelder minder, vergeleken met de situatie wanneer er geen schelpdierbanken voor de kwelder aanwezig zijn.
2. Schelpdierbanken eveneens zorgen voor minder erosie in gebieden die niet direct achter de schelpdierbanken gelegen zijn, maar wel tussen de kwelder en de banken in.
3. De optimale dimensies van de schelpdierbanken niet eenduidig is. Wel zijn er enkele algemene regels af te leiden:
 - Hoe korter de afstand van de schelpdierbanken tot de kwelder, des te groter het effect op hoogte nabij de kwelder. Een afstand van 80 m heeft nog steeds een significant effect op de hoogte vlakbij de kwelder. Schelpdierbanken kunnen echter in werkelijkheid niet op elke willekeurige afstand van de kwelder worden geplaatst. Deze afstand is afhankelijk van de inundatieduur, de golfwerking en de getijstroming.
 - De dichtheid van de schelpdierbanken is aan een bepaald minimum gebonden. Onder dit minimum bestaat namelijk de kans dat er een onomkeerbare proces van openbreking van de schelpdierbanken optreedt. De optimale dichtheid is tevens afhankelijk van de golfwerking en getijstroming.
 - De schelpdierbanken moeten tenminste 4 m breed zijn om optimaal de golven te kunnen dempen en de getijstroming af te zwakken. Bij een grotere breedte van de schelpdierbanken treedt geen verandering op in het sedimentatie- en erosiepatroon achter en tussen de schelpdierbanken.
 - De bodemschuifspanningen tussen de schelpdierbanken en de kwelder nemen af, waardoor er mogelijk meer overlevingskansen is voor pioniervegetaties achter de schelpdierbanken.

De biota op de wadplaat gelegen tussen schelpdierbank en kwelder zijn tevens van belang bij de ophoging. Zeegras zou in deze gebieden een heel goede golfremmer en bodemstabilisator zijn en daardoor ophoging mogelijk maken. Onderzoek aan vier zeegrassoorten wijst uit dat *Halodule wrightii*, *Syringodium filiforme*, *Thalassia testudinum* en *Zostera marina* (deze laatste soort komt voor in Nederland) per meter zeegrasveld de golfenergie met 40% kan reduceren wanneer de lengte van de zeegrasbladeren gelijk is aan de waterdiepte. De energiereducerende werking van zeegrassen blijkt onder die omstandigheden gelijk te zijn aan die van kwelders (Fonseca en Cahalan, 1992). Bos et al. (2007) lieten zien dat tijdens het groeiseizoen in de Waddenzee relatief kleine zeegrasveldjes op jaarbasis 5 tot 7 mm sediment kunnen invangen. Chen et al. (2007) toonden aan dat een toename van de breedte van een zeegrasveld in de richting van de golf, resulteert in een grotere demping. Bradley en Houser (2008) toonden aan dat de golfhoogte juist toeneemt in de eerste 5 m van het zeegrasveld, maar daarna exponentieel afneemt over de resterende breedte van het veld. Verder neemt golfdemping toe wanneer de zeegrassen bloeien en vermindert de golfdemping als de scheutdichtheid en de bladlengte afnemen (Chen et al., 2007). Voor *Zostera noltii*, een relatief kleine zeegrasoort die in Nederland vooral in de zone voor de kwelders voorkomt, is aangetoond dat een minimumscheutdichtheid vereist is om golfdemping te initiëren (Paul en Amos, 2011). De mate waarin golfdemping plaatsvindt, is afhankelijk van de golffrequentie en verandert richting kust als de minimumdichtheid wordt overschreden. Bij lage oscillatiesnelheden volgen de bladeren de golfbeweging, maar bij hogere oscillatiesnelheden gedragen de bladeren zich meer rigide en bewegen ze uit fase. De dempende werking van zeegras is efficiënter bij hogere golffrequenties (Bradley en Houser, 2008). Als zeegrassen derhalve voorkomen als brede, ondiepe velden is de invloed op golfenergie aanzienlijk (Fonseca en Cahalan, 1992). Zeegras komt meestal niet uniform over de gehele bodem voor.

Omdat reductie van hydrodynamische energie een bepaalde breedte van het zeegrasveld behoeft en een bepaalde minimum scheutdichtheid voordat een maximaal effect wordt bereikt, is de verwachting dat een uitbreiding van het zeegrasareaal in de Waddenzee, voornamelijk voorkomend in het intergetijdengebied, een gunstig effect heeft op sedimentaccumulatie en op reductie van hydrodynamische energie.

Er zijn aanwijzingen dat de accumulatie van sediment in het groeiseizoen door met name eenjarige zeegras-populaties (Bos et al., 2007), en onder invloed van mosselbanken en oesterriffen (De Vries et al., 2007) bijdraagt aan de ophoging van kwelders in het najaar en de winter. In de zomer (wanneer het sediment toch al zelden de kwelder kan bereiken) accumuleert er meer sediment op de wadplaten, waarna het in najaar en winter ten goede kan komen aan de kwelder, juist in de periode dat hoge waterstanden en stormen meer frequent optreden. Dit sluit aan bij bevindingen dat de capaciteit van de zeegrasbladeren om golfenergie te dempen, afneemt als de golfhoogte toeneemt en omstandigheden meer turbulent worden, en wanneer de scheutdichtheid vermindert (Bradley en Houser, 2008), zoals in het najaar en de winter.

Het proces waarbij slibvelden, onder invloed van schelpdieren en zeegrasvelden, in de zomer sediment 'opslaan' en in het najaar kwelders 'voeden' dient in het kader van kustverdediging nader onderzocht te worden (Oost, 1995).

3.2.5 Golfdemping door slibvelden

Kenmerken van slibvelden zijn (Winterwerp, 2011):

- Het slib is zacht, en wordt mogelijk onder invloed van golven nog zachter: de slibvelden zouden kunnen verweken (waarna ze zich als een viskeuze vloeistof gaan gedragen);
- Demping van golven met ca. 10% kan optreden;
- Zachte slibvelden zijn waarschijnlijk niet erg stabiel, vanwege hun zachtheid (lage dichtheid en consistentie).

Bij verweking van slibvelden kan 'fluid mud' worden gevormd. Demping van golfenergie door 'fluid mud' kan oplopen tot 90%. Winterwerp et al. (2008) doen aanbevelingen voor nader onderzoek naar de verweking van slibvelden in de Waddenzee en de invloed hiervan op golfdemping tijdens stormcondities. Hun studie gaf aan de hand van analyse van bodemonsters vooralsnog geen bevredigende resultaten betreffende de demping door verweking van slib in de Waddenzee. Waarnemingen elders geven namelijk wel belangrijke aanwijzingen dat verweking en sterke golfdemping zou kunnen optreden tijdens stormcondities. Het probleem bij slibvelden is echter dat ze snel eroderen en zich verplaatsen, waardoor er voor waterveiligheid niet vanuit kan worden gegaan dat er op een bepaald moment op een bepaalde locatie een dergelijk slibveld aanwezig is.

3.2.6 Effect op de lokale stroming

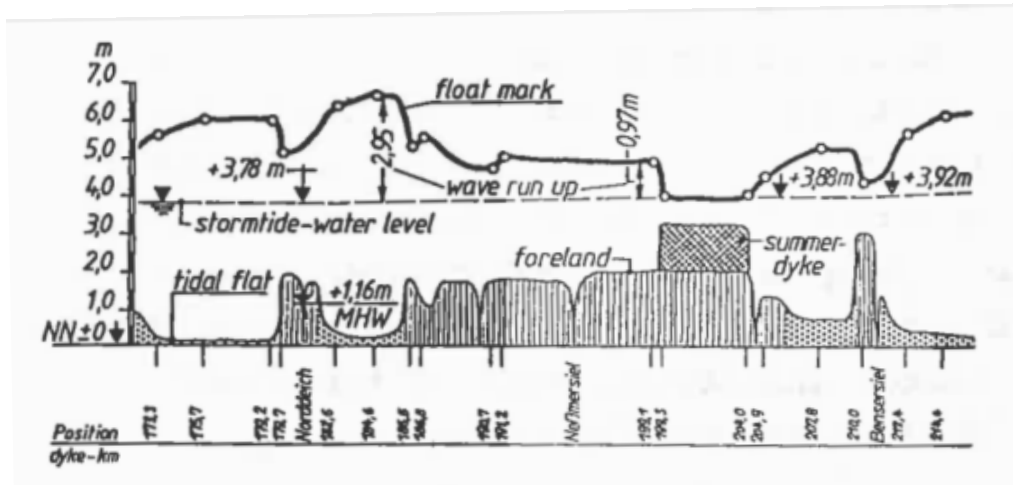
Grillige en vertakte krekens en geulen helpen mee om de golfenergie van golven van gemiddelde omvang te dissiperen via het vertragen van de stroming en het afvlakken van de waterhoogte (Bayliss-Smith et al., 1979; Leonard et al., 1995). Volgens Pethick (1992) hangt de vorm en afmeting van krekens meer af van het getijprisma, dan van de kwelder.

3.3 Golfploop bij kwelders: de praktijk

In de praktijk blijkt dat waarnemingen van de effecten van stormvloed vaak moeilijk te vergelijken zijn omdat niet alle relevante parameters op een onderling consistente manier zijn geregistreerd en omdat de basisrapporten vaak niet worden gepubliceerd. Dit geldt ook voor de golfploop op dijken.

Figuur 3.6 geeft de hoogte van de veekranden na een vrij hoge stormvloed op de zeedijken bij de noordkust van Oost-Friesland (tussen Norddeich en Bensersiel). Hieruit komt naar voren dat de hoogteligging van het

voorland (zie deel met zomerdijk in figuur 3.6) de golfloop sterk bepaalt en dat de golfloop op deze locatie sterk wordt beïnvloed door de aanwezigheid van kwelders/ondiepe voorlanden (Erchinger, 1989).



Figuur 3.6

Veekrand op zeedijken bij de noordkust van Oost-Friesland (DE) (Erchinger, 1989)

Bij een vergelijkbaar onderzoek naar veek in Nederland kwam naar voren dat het zeer aan het soort veek ligt welk golfbereik door de veeklijn wordt weergegeven. Veek is het opdrijfseel (o.a. afkomstig van het voorland) dat bij hoog water door de golven op de dijk wordt afgezet (Figuur 3.7). Het blijft min of meer ter plaatse van de hoogst opgetreden golfloop liggen, maar de precieze relatie hiermee is niet bekend. Wel geeft de veekrand een indicatie voor de belasting die de dijk heeft weerstaan.

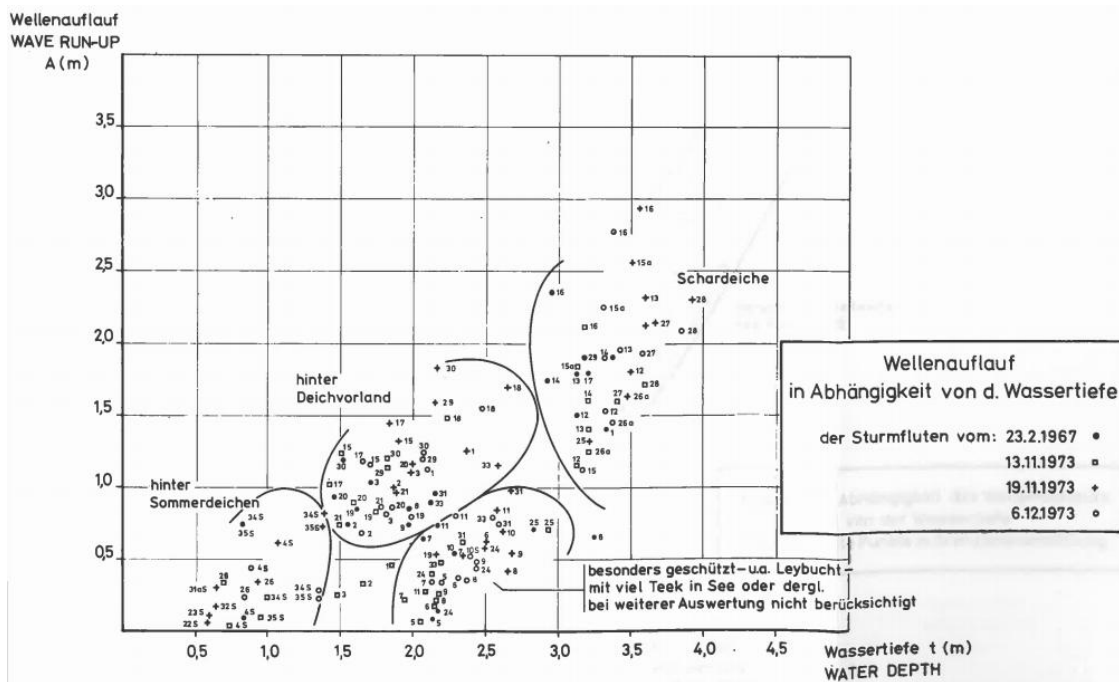


Figuur 3.7

Veek tot aan de buitenberm (foto waterschap Noorderzijlvest in: Den Heijer et al., 2007)

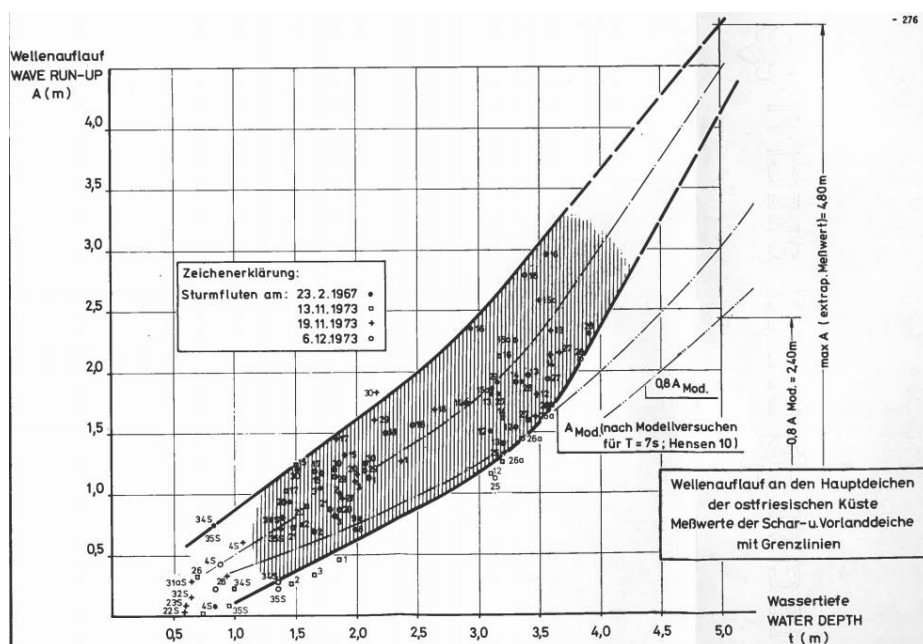
De golfloop is afhankelijk van de golfhoogte, golfperiode, de geometrie van de dijk en de aanwezigheid van ondiep voorland. Door ondiep voorland breken voornamelijk de hoge golven waardoor de golfhoogteverdeling verandert. Ook het golfspectrum verandert door dissipatie van energie op het voorland. Er zijn al diverse studies uitgevoerd om de invloed van ondiepe voorlanden mee te kunnen nemen bij het ontwerp van dijken, echter tot dusver niet met bevredigende resultaten. Omdat de golfhoogte afhankelijk is van de waterdiepte, neemt de golfloop af bij afnemende waterdiepte. Dit blijkt ook duidelijk uit een analyse van de ligging van de

veekrandligging in Oost-Friesland (zie figuur 3.8 en 3.9), waarbij de afgeleide golfhoogte op verschillende locaties langs de kust is uitgezet tegen de waterdiepte (voor een viertal stormen).



Figuur 3.8

Veekrandmetingen uitgezet tegen waterdiepte (Erchinger, 1974)



Figuur 3.9

Golfploop uitgezet tegen de waterdiepte, geldigheidsgebied aangegeven (Erchinger, 1974)

In Nederland zijn na de zware storm die op 31 oktober en 1 november 2006 over Nederland trok en zorgde voor hoge waterstanden (in Delfzijl 4,83 m +NAP), de 'veekranden' opgemeten. Uit de metingen door

waterschap Noorderzijlvest in de dijkvakken tussen Lauwersmeer en Delfzijl bleek dat de gemiddelde veekrandhoogte bij een dijkvak met een flauwer talud lager waren dan bij dijken met een steiler talud (Den Heijer et al., 2007).

3.4 Experimenten met golfreductie

De golfdempende werking door kwelders heeft tot diverse onderzoeken en experimenten geleid om de mogelijke bijdrage van ondiepe voorlanden aan de golfreductie te kwantificeren en daarmee toepasbaar te maken voor de waterveiligheid.

In 1980 werden in de UK in het waterloopkundig laboratorium (het toenmalige Hydraulics Research Station) experimenten uitgevoerd om het risico van golfoverslag bij verschillende waterkeringsconfiguraties te onderzoeken. In één van de opstellingen is geprobeerd om met een brede vooroever/berm van triplex een ruwe kwelder met een klifrand van 2 m na te bootsen. De waterdiepte voor de berm was 4 m, zodat op de berm (c.q. kwelder) 2 m water stond. Uit het experiment werd afgeleid dat een 80 m brede kwelder voor een reductie in golfhoogte van 40% kon leiden (Brampton, 1992).

Bij een brede kwelderrand kan er daarom volgens Brampton (1992) worden volstaan met een lagere dijk. Als er echter erosie optreedt, kunnen hogere golven de dijk bereiken en moet de dijk worden verhoogd en versterkt (Brampton, 1992). Brampton (1992) maakt bij de studie uit 1980 wel de aantekening dat er zo weinig informatie beschikbaar is over de dempende werking van kwelders, dat numerieke modellen of de opgeschaalde informatie niet kunnen worden geverifieerd. Tot in de jaren '90 van de vorige eeuw was in de UK de informatie uit deze studie naast ervaringskennis nog steeds de voornaamste bron van kennis voor dijkbeheerders.

Ook in Nederland is in het begin van de jaren '90 van de vorige eeuw onder meer in het Waterloopkundig Laboratorium onderzoek gedaan naar het effect van (zeer) ondiepe voorlanden op golfoploop en golfoverslag bij dijken in combinatie met eventuele lange golven. Ook in deze studies is bij situaties die niet aan de definitie voldoen (te flauw talud, te steile of lange berm) via interpolatie een afschatting gemaakt van de golfoploop en overslag. De bevindingen zijn meegenomen in de formules in het 'Technisch rapport over golfoploop en golfoverslag' (Van der Meer, 2002). Een voorland wordt hierin gedefinieerd als het gedeelte vóór de dijk en aansluitend daarop. Dit kan horizontaal zijn tot een maximaal talud van 1:10. Het voorland kan diep of zeer ondiep liggen. De golfhoogte die altijd in golfoploop- en golfoverslagberekeningen moet worden gebruikt, is de inkomende golfhoogte die te verwachten is aan het einde van de het voorland (en dus bij de teen van de dijk). Deze wordt berekend op 50 m uit de dijkvoet of 100 m uit het dijk kruin (J. Groeneweg, pers. med.).

3.5 Modelling

3.5.1 Golfmodelling

Golfmodelling is in de rapportage over de modelstudie over de golfreducerende werking van kwelders verder toegelicht. In deze paragraaf wordt volstaan met een korte toelichting.

Van der Meer (2002) noemt dat door (zeer) ondiepe voorlanden voor dijken, waaronder kwelders en aangrenzende slikken, afwijkende spectra kunnen voorkomen. In de praktijk is het vanwege heterogeniteit moeilijk om het effect van ondiepe voorlanden mee te nemen in de berekening voor golfoploop en golfoverslag, bovendien is een precieze grens tussen een ondiep en een zeer ondiep voorland niet te geven. Bij een ondiep voorland breken golven en wordt de golfhoogte lager, maar blijft nog wel een spectrum bestaan dat op het oorspronkelijke inkomende spectrum lijkt. Bij een zeer ondiep voorland is nauwelijks nog een spectrum

met een piek te bekenen omdat de golven door breken erg klein worden en er veel verschillende golfperiodes zijn. Ook kunnen bij een zeer ondiep voorland door het breken van de golven lange golven ontstaan ('surfbeat') (Van der Meer, 2002).

De voortplanting en ontwikkeling van windgolven kan worden gemodelleerd met het programma SWAN (SimulatingWAVesNearshore). Hiermee kunnen golfvoortplanting, golfgeneratie door wind, niet-lineaire golf-golf interacties en dissipatie voor een gegeven bodemtopografie, windveld, waterstand en stroming worden berekend. Het model neemt eventuele reflectie door een klifrand niet mee (Callaghan et al., 2010). Kweldervegetatie kan worden meegenomen door verhoogde bodemwrijving. Wel is bij modellering de ruimtelijke en temporele heterogeniteit in vegetatiehoogte, dichtheid en structuur een aandachtspunt (Möller et al., 2001).

Het model SWAN is op diverse locaties gebruikt om golfomstandigheden te simuleren. Vaak wordt daarbij op basis van metingen de weerstandcoëfficiënt voor de vegetatie gekwantificeerd. Zo is in de Westerschelde de invloed van wind en getij (met gemeten waarden en geëxtrapoleerde omstandigheden) op golfhoogte en stroming in relatie tot de hydrodynamische krachten op het bodemsediment (de wrijvingskrachten op de bodem) onderzocht. Uit de metingen bleek dat deze krachten landwaarts van de kwelderklifrand sterk afnemen. Ook bleek dat bij een eroderende kwelder de door golven veroorzaakte krachten op de bodemdeeltjes van het voor de kwelder liggend slik, twee maal zo hoog waren dan bij een aangroeiende kwelder. Uit het weglaten van de voor de kwelders liggende slikken (verhogingen) in het gebruikte model, bleek dat de slikken een belangrijke invloed hebben op de golven die de kwelders bereiken. De golfhoogte is immers afhankelijk van de waterdiepte. Bij het ontbreken van slikken neemt het potentieel om sediment in suspensie te brengen toe (Callaghan et al., 2010).

In het kader van het WaterINNovatiebron (WINN)-project 'IJsselmeer zoekt verdieping' zijn met een model de effecten van de aanleg van eilanden, ondiepten en vooroevers op de golfaanval op dijken bij verschillende inrichtingsmogelijkheden onderzocht voor het Markermeer (Verheij, 2006). In eerste instantie zijn verkennende 1D berekeningen met SWAN-1D naar de golfcondities (hoogte, periode) uitgevoerd om een globaal idee te krijgen van deze effecten. Er is gevarieerd met de afstand tot de dijk, de golfbrekerhoogte en de breedte van de golfbreker. Daarna zijn voor vooraf vastgestelde combinaties van meerpeil en stormcondities, zoals die ook gebruikelijk zijn bij de bepaling van de hydraulische randvoorwaarden, meer gedetailleerde 2D berekeningen met SWAN-2D uitgevoerd om de golfhoogte aan de teen van geselecteerde dijkvakken te berekenen. Op basis hiervan zijn met Hydra-M op probabilistische wijze berekeningen gemaakt om het effect van de beschouwde inrichtingsvarianten op de benodigde kruinhoogten in beeld te brengen.

Op basis van deze modelstudie werd gevonden dat:

- Golfreducerende constructies een goed middel kunnen zijn om dijkverhoging te voorkomen. Afhankelijk van situering, afstand tot de dijk en hoogte van de golfreducerende constructie zijn verlagingen van de maatgevende belastingen van 0,5 tot wel 2 m te bereiken;
- De effectiviteit van golfreducerende constructies sterk afneemt bij afstanden tot de dijk van meer dan 500 m, maar als tussen de dijk en een op grotere afstand gelegen golfbreker een moeras (kwelder) aanwezig is, is de verlaging van de belasting zeer groot;
- Aanliggende constructies als bermen en stranden ook zeer effectief zijn, maar dit afhankelijk is van de hoogteligging van berm of strand. Een aanliggende berm kan de belasting met 0,5 m verlagen, en een aanliggend strand kan de belasting tot 1,5 m verlagen (Verheij, 2006).

SWAN is ook gebruikt door Alkyon (2008) om het effect van het verhogen van kwelders te onderzoeken. Een verhoging van een strook kwelder met 0,3 m in golfsimulatiemodel SWAN resulteert in een reductie van de golfhoogte met ~20% en een reductie van de golfperiode met ~10%, gemiddeld over verschillende gemodelleerde stormen.

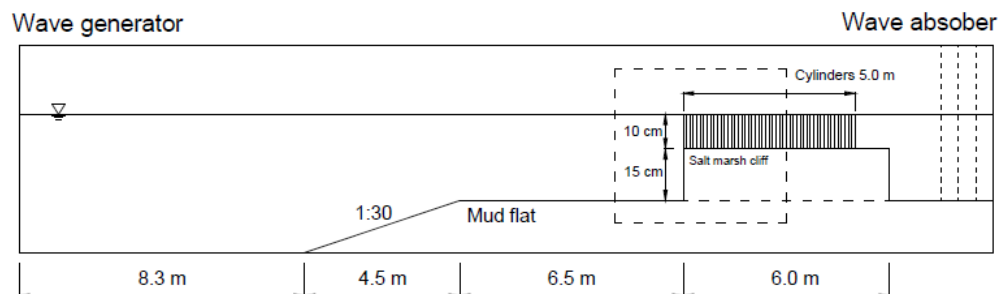
3.5.2 Weerstand van vegetatie in modellen

Vanwege het complexe karakter van vegetatie, hoogte en topografie (met geulen en richels etc.) is het moeilijk om de waterstroming en demping van golven in de kwelderzone modelmatig te beschrijven. Daarom wordt in studies naar golfdemping vaak gebruik gemaakt van versimpelde theoretische modellen van demping door rijen van verticale cilinders of van eendimensionale veldstudies in laag dynamische kwelders of zeegrasvelden. Deze benaderingen gaan er vanuit dat vegetatie een sterk dempend effect heeft op de golven die over de kwelder stromen, en van een ruimtelijke en temporele component in de demping. Zo wordt er vanuit gegaan dat golven exponentieel dempen naarmate ze verder landinwaarts komen van de klifrand (Brampton, 1992). Maar deze aanname wordt niet door veldmetingen gestaafd. In werkelijkheid is er een temporele variabiliteit.

Voor handboeken en technische voorschriften is geprobeerd om weerstandcoëfficiënten af te leiden (zie tabel 3.1). De metingen hiervoor zijn echter meestal in een laboratoriumopstelling uitgevoerd, met stroming in één richting en gelijkvormige cilinders (als imitatie van kweldervegetatie). In werkelijkheid zijn er allerlei substromingen binnen de kwelder die afhangen van de specifieke omstandigheden.

Door Suzuki (2011) werden in een laboratoriumopstelling en met numerieke simulatie met een 2DV-model¹⁰ gekeken naar de golfdemping door vegetatie en door een klifrand. Om inzicht te krijgen in het effect van vegetatie op golven en stroming, en om de door vegetatie veroorzaakte dissipatie van golfenergie te kwantificeren, hebben Suzuki et al. (2009) met numerieke modellen (CADMAS-SURF/3D) en laboratorium-experimenten gekeken naar het effect van rigide of flexibele cilinders op stroming nabij de bodem, en op turbulentie. Figuur 3.11 toont de laboratoriumopstelling waarin de vegetatie werd nagebootst door houten stokken van 10 cm hoog en een diameter van 6 mm, met een dichtheid van 1000 stokken/m².

Zowel de golfhoogte als de snelheid werd gemeten. Suzuki voerde de proef ook uit met vierkante stokken. De gevonden waarden kwamen overeen met de met CADMAS-SURF/3D gesimuleerde waarden, zodat volgens Suzuki et al. (2009) de basale effecten van kweldervegetatie op de hydrodynamische omstandigheden kunnen worden gesimuleerd met een numeriek model, zolang een passende gridgrootte wordt gekozen.



Figuur 3.11

Proefopstelling in het laboratorium om effectop de vegetatie te meten (Suzuki et al., 2009)

Voor het 'Ruimte voor de Rivier'-project 'de Noordwaard' is het effect van grienden en wilgen op de golfdemping onderzocht.

¹⁰ Een 2DV model is een 'laterally averaged' 2D model.

4 Kwelders, waterveiligheidsbeleid, onderhoudskosten

4.1 Nederland

In het Voorschrift Toetsen op Veiligheid (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007) wordt aangegeven hoe het voorland meegenomen kan worden in de berekening van de veiligheid (Figuur 4.1). Het blijkt echter in de praktijk moeilijk om ondiepe voorlanden mee te nemen in de formules voor toetsingen en ontwerp van dijken omdat in de praktijk vaak situaties voorkomen met meerdere taludhellingen in een dijkprofiel, eventueel nog gecombineerd met meerdere bermen (Van der Meer, 2002).

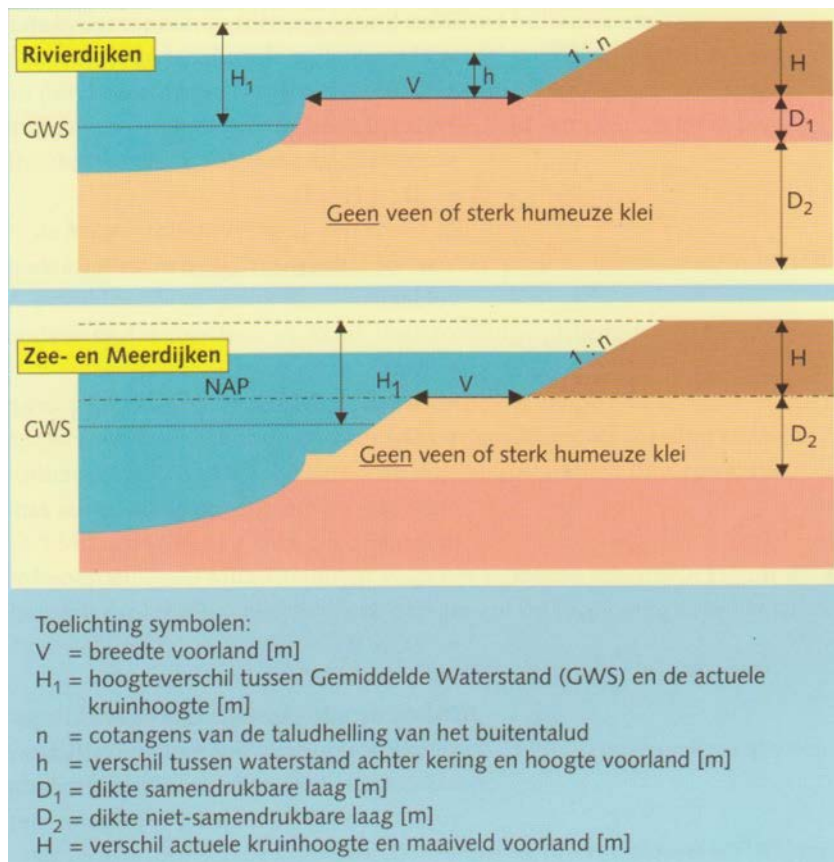
Ondanks dat is het echter tegenwoordig de praktijk om voor het ontwerp van de dijk de maatgevende condities (waterstand plus golfklimaat van de maatgevende stormvloed) te berekenen op 50 m uit de dijkvoet of 100 m uit de dijkruin. Brede kwelders zijn dus van invloed op de maatgevende condities en worden beschouwd als voorland. Daarbij wordt geen rekening gehouden met rijshouten dammen of eventuele ruwheid door de vegetatie; in het winter-halfjaar is er met name in de pionierzone vaak geen vegetatie aanwezig, maar op de lage kwelder en middenkwelder natuurlijk wel. Een deel van de kwelders is dus al impliciet onderdeel van de zeewering. Voor het deel direct voor de dijk geldt dit echter niet (pers. med. J. Groeneweg). Waar kwelders mede bepalend zijn voor de maatgevende condities is het voorkómen van te sterke kweldererosie van belang. Hoewel 'kustbescherming, opgevat als handhaving van de status quo van het voorland voor de zeedijk' eind jaren '60 van de vorige eeuw als één van de nieuwe doelen voor de landaanwinningswerken werd benoemd (Dijkema, 2001), lijken maar weinig waterkeringsbeheerders en kweldereigenaren zich bewust van het belang om kweldererosie te voorkomen voor de waterveiligheid (pers. med. J. Groeneweg).

Met het oog op de rol van kwelders voor de waterveiligheid, is ook de eigendom- en beheersituatie een aandachtspunt: de kwelders zijn vaak geen eigendom van de waterkeringsbeheerder (Figuur 4.2). Als een kwelder een functie voor de waterveiligheid krijgt, gaat de kwelder ook onderdeel uitmaken van de waterkering. Dit betekent dat de kwelder onderdeel wordt van de beheerzones die voor de waterkering worden aangewezen. Daarvoor is goede afstemming nodig met eigenaren en beheerders. Ook moet worden nagegaan wat de bevoegdheden van de waterkeringsbeheerders zijn als de kwelders buiten de beheerzones liggen. Verder moet worden nagegaan of de waterveiligheidsfunctie en eventuele beheermaatregelen passen bij de natuurdoelstellingen die voor de kwelders gelden (zie 2.3.2).

Gegeven het feit dat de kwelders deels al in de waterveiligheidsberekeningen zitten, is het mogelijk om op grond van de bestaande modellen na te gaan wat de impact is van nieuwe aanleg van kwelders op de waterveiligheid van de achterliggende dijken. Dit wordt binnen het Deltaprogramma Deelprogramma Wadden in de aparte modelstudie inzichtelijk gemaakt.

Naast golfdemping, vervullen kwelders in principe ook een rol voor de waterveiligheid omdat ze een gunstige invloed uit kunnen oefenen op de buitenwaartse macrostabiliteit van de dijk en de intreeweerstand bij 'piping' (zandmeevoerende wellen). Bij het ontwerp van de Waddendijken is daar geen rekening mee gehouden. Wel zijn op diverse plaatsen (bijvoorbeeld langs de Groninger kust) de kweldergronden meegenomen bij het ontwerp van de teenconstructie van de dijk omdat kwelders beschermen tegen erosie en er daardoor met geen of een lichtere teenbestorting kan worden volstaan (J. Veenstra en O. van Dijk, pers. med.).

Bij toename van het volume van de kwelder, c.q. vergroting van het afslagprofiel kan een grotere reductie van de bij de teen inkomende golfhoogte worden gerealiseerd, waardoor reductie van de vereiste kruinhoogte en de zwaarte van de harde bekleding op het buitentalud kan worden bewerkstelligd. Dit is naast de erosie/afslag van het voorland een aandachtspunt bij de nadere uitwerking van innovatieve dijkconcepten.

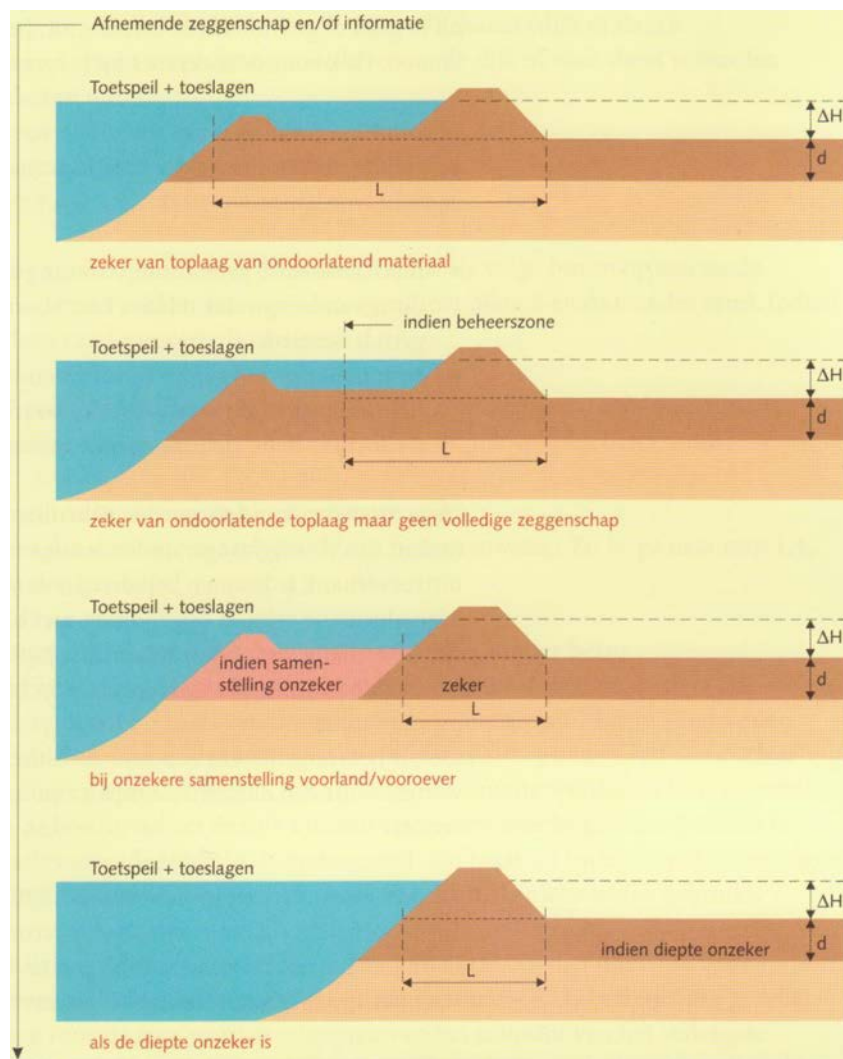


Figuur 4.1

Wijze waarop met betrekking van 'piping' voorland in de berekening van de waterkering kan worden meegenomen (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007)

Niet alleen vanuit het oogpunt van waterveiligheid (zie hoofdstuk 3), maar ook vanuit het oogpunt van ruimtelijke kwaliteit, natuurdoelen en kosten is het aantrekkelijk om kwelders of - indien stabiel genoeg - biobouwers in het ontwerp van een waterkering mee te nemen. Dit betekent dat de waterkeringszone breder wordt, en de mogelijkheid biedt om een meer geleidelijke overgang tussen de dijk en het wad te creëren. Misschien zijn, zoals in Duitsland, zelfs groene zeedijken (zonder asfalt) tot in de kwelder mogelijk. Dit zijn dijken met een flauw buitentalud. Ook zou gedacht kunnen worden aan een hybride kering. Dit is een combinatie van een harde kering met een zacht voorland. Hiervoor zou een soort 'BKL' moeten worden bepaald, met een waterkering, afslagprofiel en zones. Dit wordt binnen het Deltaprogramma Deelprogramma Wadden verkend in de studie naar innovatieve dijkconcepten.

Om daadwerkelijk kwelders of biobouwers mee te nemen in het waterveiligheidsbeleid is het beschikbaar maken van standaardprotocollen voor het toetsen van effectiviteit en stabiliteit van ecologische kustverdediging en van modellen voor toepassing van eco-engineering, een uitdaging voor de toekomst (Borsje et al., 2011). Dit sluit aan bij de brief van het Kabinet over het rapport van de Adviesgroep Waddenzebeleid (commissie Meijer), waarin 'stimulering van nieuwe kwelderontwikkeling ten gunste van de veiligheid van het achterland' wordt aanbevolen.



Figuur 4.2

Aandachtspunten bij het meenemen van het voorland in de waterkering (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007)

Naast het in 1969 benoemde doel voor kwelderwerken als 'kustbescherming, opgevat als handhaving van de status quo van het voorland voor de zeedijk', zijn in Nederland ook doelstellingen vastgesteld voor kwelders gericht op het in stand houden van het kwelderareaal en bescherming en herstel van natuurwaarden (o.a. PKB, Trilaterale afspraken, Natura 2000, KRW) (Dijkema et al., 2001).

Het ontwikkelen of in stand houden van kwelders voor de waterveiligheid kan conflicteren met de doelen gericht op bescherming en herstel van natuurwaarden van kwelders of andere habitats (zoals het plan WaddenWerken voor de Afsluitdijk (Lammers, 2009).

4.2 Verenigd Koninkrijk

In de UK zijn de dijken ontworpen op lagere maatgevende omstandigheden (waterstanden die eens per ca. 100 jaar voorkomen) dan in Nederland¹¹. Zoals in 3.2.1 en 3.2.2 beschreven, reduceren kwelders vooral de golfhoogte als de waterdiepte niet te groot is. Daarom hebben in de UK de kwelders voor de dijk een aanwijsbare functie in de waterkering.

In de UK wordt een onderscheid gemaakt in 'sea defence' en 'coastal defence'. 'Sea defence' betreft maatregelen om overstromingen te voorkomen, terwijl 'coastal defence' naast maatregelen om overstromingen te voorkomen ook betrekking heeft op het voorkomen van erosie en andere bedreigingen van de kust. Onder meer vanwege dit onderscheid is het kustbeheer in de UK versnipperd. De 'Coastal Protection Act' (1949) stelt dat de lokale autoriteiten verantwoordelijk zijn voor de bescherming tegen erosie van de kust, en dat de Environmental Agency verantwoordelijk is voor de bescherming tegen overstroming. Na de toename van erosie langs de kust en de waarneming dat het *ad hoc* karakter van lokale maatregelen vaak een negatief effect had op aangrenzende delen van de kust (onder beheer van een aangrenzend district), werd in de jaren '80 van de vorige eeuw het initiatief genomen tot een nauwere samenwerking tussen alle betrokken autoriteiten. Dit heeft geleid tot de 'Standing Conference on Problems Associated with the Coastline' (SCOPAC), met overheidsfunctionarissen en gekozen leden van de districts- en provinciale besturen (councils), de Environmental Agency, de havenautoriteiten en English Nature (de nationale organisatie voor natuurbehoud). Intussen zijn er ook lokale groepen ontstaan die zich richten op de bescherming van de kust. Geprobeerd is om deze 'coastal managing groups' zo goed mogelijk aan te laten sluiten bij de natuurlijke kusteenheden, met als doel een integrale en holistische aanpak te bewerkstelligen.

De focus van beheerplannen van een organisatie als SCOPAC richt zich vooral op bedreigde kust. Maar het is ook belangrijk om de nog gave en landschappelijk waardevolle kusten te beschermen. In Engeland en Wales is hiervoor een vereniging tot bescherming van de kust opgericht, die probeert om op vrijwillige basis afspraken te maken over bescherming en beheer.

Net als in Nederland zijn in de UK na de overstromingsramp van 1953 omvangrijke maatregelen getroffen om de waterveiligheid op orde te brengen. Veel van de toen aangelegde waterkeringen bereiken het eind van hun ontwerpperiode en zijn aan vervanging of onderhoud toe (Möller et al., 2001). Onder andere vanwege de kosten van het aanpassen van de waterkeringen en vanwege het besef dat klimaatverandering voor nieuwe opgaven zorgt, wordt op verschillende plaatsen nagedacht over alternatieve, en potentieel meer kosten-effectieve en duurzame maatregelen voor de bescherming van de kust (onder andere in ComCoast, www.comcoast.com). Naast methoden als zandsuppletie en het aanbrengen van vooroevers werd in de jaren '90 van de vorige eeuw ook 'managed realignment' geïntroduceerd als een zogenaamde zachte maatregel. Bij 'managed realignment' wordt een harde kustverdediging een stuk landinwaarts verplaatst zodat voormalig ingepolderde grond weer wordt toegevoegd aan het intergetijdengebied. Omdat hiermee de breedte van de kustzone en het intergetijdengebied toeneemt alsmede de ruwheid van de helling (vanwege ontwikkeling van kweldervegetatie) werd aangenomen dat de golfenergie voor de nieuwe kering minder is dan voor de oude, zodat kan worden volstaan met een lagere kering (Möller et al., 2001).

In 1994 is door het toenmalige Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF) een regeling getroffen: 'the Salt Marsh Habitat Scheme' waarbij aan boeren en eigenaren gedurende een periode van 20 jaar een

¹¹ De Waterkeringen in het Waddengebied zijn ontworpen op maatgevende waterstanden van 1/10.000 jaar voor Noord-Holland, 1/4000 jaar voor de vastelandskust van Friesland, Groningen, Wieringen en Texel, en 1/2000 voor de overige Waddeneilanden. Bij deze extreme omstandigheden is de waterstand zo hoog dat er veel water op de kwelder staat.

vergoeding wordt betaald om kwelders te realiseren op voormalig agrarisch land. Voor bouwland was een vergoeding beschikbaar van £ 525 en voor grasland van £ 195 per hectare per jaar. Deze regeling is alleen getroffen op locaties die een rol konden spelen bij waterveiligheid.

King en Lester (1995) noemen voor Essex minstens 20 gebieden waar kwelders voor de dijk een rol spelen bij de bescherming van huizen of gebouwen. Maar meestal wordt vooral landbouwgrond beschermd en bevindt eventuele bebouwing zich op hoger gelegen gronden die niet kwetsbaar zijn voor overstroming. Volgens de auteurs profiteren in Engeland de eigenaren van de kwelders vaak niet van de hoge waarde van de kwelder als kustverdediging. De eigenaar van een kwelder gebruikt de kwelder meestal voor beweiding, voor de jacht of voor natuur en landschap. Vooral de beheerders van de waterkeringen en de eigenaren van de landerijen achter de waterkering met aanpalende kwelder, profiteren van de waterveiligheidsfunctie van de kwelder.

4.3 Duitsland

Net als in Nederland, is het merendeel van het huidige areaal aan kwelders langs de Duitse Waddenkust artificieel. In Duitsland worden kwelders als onderdeel van de zeewering beschouwd, omdat ze de impact van golven op de dijk beperken (Hofstede, 2003).

In het waterveiligheidsbeleid van Sleeswijk-Holstein is vastgelegd dat het onderhouden van de kwelderwerken een publieke taak is. Onderhoud of ontwikkeling van kwelders door landaanwinningswerken ten behoeve van de waterveiligheid kan echter strijdig zijn met de natuurfunctie van de kwelders. In het natuurbeleidsplan van Sleeswijk-Holstein is het geven van ruimte aan natuurlijke processen een van de doelstellingen. Om een managementconcept voor kwelders te ontwikkelen waarbij zowel recht wordt gedaan aan de waterkerende functie als aan de natuurwaarden van de kwelders werd in 1994 in Sleeswijk-Holstein een interdepartementale werkgroep ingesteld. De werkgroep had als taak om i) algemene richtlijnen te ontwikkelen voor het beheer van kwelders, ii) bestaande technieken te evalueren, iii) een regionaal kwelderbeheerplan te ontwikkelen en iv) een monitoringsplan op te stellen.

Ook werd een integrale kweldercommissie ingesteld met daarin vertegenwoordigers vanuit de deelstaat, waterbeheerders, NGO's en gemeenten en die als taak had om informatie te verzamelen en beschikbaar te stellen, en het kweldermanagementconcept te monitoren. Na vijf jaar toepassing van het kweldermanagementconcept bleek dat het concept in Sleeswijk-Holstein goed werkte (Hofstede, 2003). In 2007 bracht het Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein een nieuwe versie uit van het 'Vorlandmanagementkonzept (VMK) in Schleswig-Holstein; Forschung' uitgebracht. Gezien de uitgebreide ervaring met deze 'Integrated Coastal Zone Management' (ICZM)-aanpak van kwelders in samenhang met dijken wordt aanbevolen om voor het optimaler ontwikkelen van de Nederlandse kwelders de aanpak van Sleeswijk-Holstein goed te bestuderen en voor zover toepasbaar en wenselijk, op te nemen in een eventuele ICZM-benadering van de Nederlandse kwelders.

4.4 Denemarken

Kwelders maken in Denemarken geen onderdeel uit van de waterveiligheidsstrategie. Dit wordt voornamelijk veroorzaakt door de strijdigheid van de ontwikkeling en het beheer van kwelders met de natuurwaarden (T. Piontkowitz, pers. med.). Bovendien is het Deense AgriFish agentschap (www.agrifish.dk), dat deel uitmaakt van het Deense Ministerie voor Voedsel, Landbouw en Visserij, verantwoordelijk voor het beheer van de sedimentatievelden voor de kwelders. Tegenwoordig bevinden zich in het Deense deel van de Waddenzee ca. 800 ha landaanwinningswerken voor de kwelders. Een deel van de kwelders wordt gebruikt voor begrazing door schapen.

4.5 Projecten toepassing kwelders in kustbeheer

4.5.1 ComCoast

In het Europese project ComCoast (COMbining functions in COASTal Defences Zones) is met het oog op versnelde zeespiegelstijging door klimaatverandering via een aantal pilots de mogelijke toepassing van kwelders verkend als veilige en aantrekkelijke wijze van kustbeheer (www.comcoast.org). Het project werd in 2007 afgerond. Nederlandse pilots betroffen Polder Breebaart, Ellewoutsdijk, Perkpolder en de Pettemer en Hondsbossche Zeewering. Naast Nederland participeerden Denemarken, Duitsland, België en de UK in ComCoast.

Voorbeelden van ComCoast-oplossingen waren:

1. golfoverslagbestendige dijken;
2. verbetering van de golfreducerende werking van de vooroever, en
3. aanleg van kwelderachtige omstandigheden met getijbeweging in de primaire zeewering door gebruik van in- en uitlaatwerken of door binnendijs verleggen van de zeewering.

Er bleek buitengewoon veel aandacht nodig voor communicatie, stakeholderoverleg, draagvlak en governance.

4.5.2 Eco-engineering

Concept

Door een aantal natuurorganisaties is het idee van klimaatbuffers ontwikkeld. Het idee van natuurlijke klimaatbuffers betekent het herstel van natuurlijke landschapsvormende processen, die gebieden weerbaarder en veerkrachtiger maken, zodat ze een buffer vormen tegen de gevolgen van klimaatverandering. Dit vergt een radicale omslag in het denken over hoogwaterbescherming, dat in Nederland traditioneel defensief van aard is, en waarbij wordt gezocht naar methoden om negatieve effecten op natuur te minimaliseren (en elders te compenseren) en naar methoden die zich richten op het maximaliseren van ecosysteempotenties. Voor zo'n omslag is een breed maatschappelijk draagvlak nodig waarbij beleidsmakers, ontwerpers, uitvoerders en beheerders de voordelen gaan inzien van beschermende maatregelen die zijn gebaseerd op ecosysteemfuncties en ecosysteemdiensten.

Organisatie

Als voorbeeld van een andere benadering kan dienen het publiek-privaat samenwerkingsverband van baggeraars, ingenieursbureaus, overheden en kennisinstituten ('EcoShape'), dat binnen het programma 'Building with Nature' de mogelijkheden onderzoekt om veiligheid, natuurlijkheid, economisch potentieel, leefbaarheid en duurzaamheid met elkaar te verenigen en elkaar te versterken. In plaats van het bouwen van 'harde' infrastructurele werken in de kustzone, die meestal ten koste gaan van natuur, kunnen natuurlijke processen en ecosysteemfuncties en -diensten ook ingezet worden voor het realiseren van kostenefficiënte en duurzame kustverdediging die bovendien sociaaleconomische meerwaarde oplevert (Ecoshape Foundation, 2011; www.ecoshape.nl).

Inhoud

Recentelijk is een eerste verkenning naar 'Perspectief natuurlijke keringen' door het consortium 'Ecoshape' uitgevoerd ten behoeve van het Deltaprogramma. De hoofdvraag in de verkenning was 'Hoe kunnen natuurlijke oplossingen bijdragen aan de lange-termijnveiligheid en aan het integrale karakter van het Deltaprogramma, waarbij hogere natuurwaarden en een grotere kostenefficiëntie worden bereikt'. Daarbij is onder meer gekeken naar kwelders en oesterriffen (Fiseler et al., 2011). Geconcludeerd wordt dat zowel kwelders als oesterriffen bijdragen aan de stabiliteit van het dijklichaam en door hun golfremmende werking gunstig

bijdragen aan (kosten voor) beheer en onderhoud. Afhankelijk van de hoogteligging is er ook sprake van een golfreducerend effect tijdens maatgevende omstandigheden. Er bestaat volgens de auteurs voldoende perspectief voor een ontwikkeling van traditionele waterkeringen naar meer natuurlijke varianten. In vergelijking met traditionele keringen leiden natuurlijke keringen in veel gevallen tot een aanzienlijke kostenbesparing. Daarnaast bieden zij de mogelijkheid van een grotere flexibiliteit bij de aanleg. Wanneer ambities op het gebied van natuur, landschap en recreatie worden meegenomen, neemt het perspectief voor natuurlijke keringen alleen maar toe. Borsje et al. (2011) laten zien dat het mogelijk is om op landschapsschaal waterkerende dijken en dammen te versterken met of zelfs te vervangen door ecologische elementen zoals duinen en moerassen (kwelders), met enorme ecologische en potentieel sociaaleconomische meerwaarde.

De bevindingen binnen Building with Nature lijken op punten te contrasteren met de waterbouwkundige visie op biobouwers in Nederland (Witteveen + Bos en Wetterskip Fryslân, 2009). Volgens deze visie heeft de bodemruwheid van het voorland (schelpenriffen, zeegras, kwelders) geen invloed op de hydraulische randvoorwaarden tijdens maatgevende condities. Tijdens gemiddeld tij (+1,0 m NAP) zal de ruwheid van de bodem wel invloed hebben op de golfbelasting, maar in hun waterbouwkundige visie is dit zeer gering. Voor een mosselbed ligt de golfhoogtereductie in de ordegrootte van een half keer de hoogte van het mosselbed. Bij zeegras zal de golfhoogtereductie minder zijn, omdat het niet uniform over de gehele bodem groeit. De golfremmende werking van kwelders door het uitgestrekte voorland worden in de visie wel onderkend, maar daarbij wordt aangevoerd dat de aanleg (of het stimuleren) van uitgestrekte kwelders ten koste gaat van andere habitats in de Waddenzee. Verder zouden kwelders volgens de waterbouwkundige visie tijdens maatgevende omstandigheden maar een beperkte invloed hebben (afhankelijk van de hoogte en de breedte van de kwelders). Uit hoofdstuk 3 van onderhavige studie komt echter naar voren dat een breedte van 100 m waarschijnlijk al voldoende is om een sterke reductie van de golfoploop te realiseren.

4.6 Reductie in onderhoudskosten waterkeringen en meerwaarde van kwelders

Via de golfreducerende werking zorgt een aan de dijk grenzende kwelder voor een lagere belasting van de dijk, en kan daarmee tot een reductie in onderhoud, of tot lagere eisen aan de dijkbekleding leiden. Om kwelders mee te laten tellen bij de eisen voor dijkbekleding is het belangrijk om het effect van kwelders te kwantificeren. Zoals eerder genoemd, is daarbij de heterogeniteit van het kwelderprofiel, de kweldervegetatie en de bodemsamenstelling een belangrijk aandachtspunt.

King en Lester (1995) noemen in het artikel 'The Value of Salt Marsh as a Sea Defence' dat beheerders van de waterkering in de UK er in het algemeen vanuit gaan dat een brede strook kwelder voor de dijk zorgt voor een forse kostenreductie bij het herstel van waterkeringen. Tabel 4.1 geeft op basis van door de National Rivers Authority van East Anglia verstrekte gegevens, een indicatie van de relatie tussen de breedte van een kwelder, de dijkhoogte en de onderhoudskosten van de betreffende dijk (King en Lester, 1995). Zij schatten dat (in de Engelse situatie, waarbij dijken zijn ontworpen op lagere maatgevende omstandigheden) bij een kwelder van zes meter breedte voor de dijk een dijkhoogte van zes meter volstaat, terwijl een dijkhoogte van twaalf meter nodig zou zijn als er geen kwelder was (King en Lester, 1995). Het verband tussen de breedte van de kwelder en de hoogte van de aangrenzende dijk betreft een vuistregel en geen wettelijke norm (K. Thomas, pers. med.).

Volgens King en Lester (1995) blijkt uit de tabel dat vooral de kwelderstrook dichtbij de dijk tot een potentiële reductie in onderhoudskosten leidt, en dat het verdwijnen van de kwelder een kostbare aangelegenheid vormt voor dijk aanleg en -onderhoud. Een smalle strook kwelders is echter kwetsbaarder voor erosie dan een brede strook kwelders.

De ervaring bij Wetterskip Fryslân is dat een kwelder voor de dijk ook voor extra onderhoud zorgt, omdat na extreme waterstanden de aangespoelde plantenresten (veek) moet worden opgeruimd ter bescherming van de grasmat op de dijk (O. van Dijk, pers.med.).

Tabel 4.1

Vergelijking van de aanlegkosten en onderhoudskosten van een dijk met daarvoor een strook kweldergrond (King en Lester, 1995, op basis van gegevens National Rivers Authority)

Breedte kwelder (in m)	Hoogte van de dijk (in m)	Kosten aanleg nieuwe dijk (in £ m ⁻¹)	Onderhoudskosten (in £ m ⁻¹ jaar ⁻¹)
80	3	400	1
60	4	500	5
30	5	800	15
6	6	1500	25-30
0	12	3000-5000	50

5 Kwelders en een veranderend klimaat

Om kwelders te kunnen waarderen als bescherming tegen golfaanval op dijken, is het van belang te onderzoeken hoe het kweldersysteem reageert op de effecten van een veranderend klimaat zoals een versnelde zeespiegelstijging, een ander stormklimaat en een hogere temperatuur. Op basis van de IPCC-scenario's zijn door het KNMI voor Nederland klimaatscenario's ontwikkeld en door de 2^e Deltacommissie zijn aanvullende studies verricht om inzicht te krijgen in de mogelijke range in de effecten en bijbehorende onzekerheid. Zoals tabel 5.1 laat zien, is de onzekerheid over de effecten groot. Er is nog geen inzicht in veranderingen in het stormklimaat door klimaatverandering.

Tabel 5.1:

Verschillende klimaatscenario's met effect op temperatuur en zeespiegelstijging (Van den Hurk, 2006; Deltacommissie, 2008)

	2050		2100	
	Temperatuur (°C na 1990)	Zeespiegel (cm na 1990)	Temperatuur (°C)	Zeespiegel (cm na 1990)
KNMI'06 – G	+1	+15-25	+2	+35-60
KNMI'06 – G+	+1	+15-25	+2	+35-50
KNMI'06 – W	+2	+20-35	+4	+40-85
KNMI'06 – W+	+2	+20-35	+4	+40-85
Deltacommissie 2008		+15-35		+55-120

Er zijn al diverse verkenningen uitgevoerd naar het effect van klimaatverandering op het Waddengebied, zoals de studie 'Modelling the impact of climate change on the Wadden Sea ecosystems' (Brinkman et al., 2001) in het kader van het Nationaal Onderzoek Programma Mondiale Luchtverontreiniging en Klimaatverandering (1990-1995 en 1995-2000) en de onderzoeksagenda van de Waddenacademie (Kabat, 2009). De implicaties van klimaatverandering voor het kustbeheer worden behandeld in de verkenning 'Coastal Protection and Sea Level Rise; Solutions for Sustainable Coastal Protection in the Wadden Sea Region' (Trilateral Working Group on Coastal Protection and Sea Level Rise, 2005) en het rapport 'Managing European Coasts; Past, Present and Future' (Vermaat et al., 2005). Ook in deze studies komt naar voren dat er nog vele vragen zijn omtrent het effect van klimaatverandering op het kwelderecosysteem. Gezien echter het voorkomen van kwelders in gebieden met een hogere getijslag, hogere temperaturen, meer geëxponeerde condities, kan nu al worden afgeleid dat een zekere mate van vergroting van die factoren niet leidt tot teloorgang van de kwelders.

5.1 Zeespiegelstijging

Zoals in hoofdstuk 2 beschreven, vormt een matige relatieve zeespiegelstijging een voorwaarde voor kwelderontwikkeling (Allen, 2000). Of kwelders echter de verwachte versnelde zeespiegelstijging kunnen bijhouden, hangt grotendeels af van de beschikbaarheid van sediment. Het evenwicht tussen de snelheid van zeespiegelstijging en de snelheid waarmee de kwelder kan ophogen door verticale sedimentatie is precair. Hoewel er over de decennia een verandering in opslibbing wordt waargenomen, kunnen kwelders volgens Dijkema et al. (2007) de zeespiegelstijging bijhouden; zij noemen waarden van 50 cm/eeuw voor de eilanden en 100 cm/eeuw voor de vastelandskust.

Onderzoek naar het effect van bodemdaling door aardgaswinning op de kwelderontwikkeling in Ameland laat zien dat de oostelijke Amelandse kwelders in staat zijn een bodemdaling (lees relatieve zeespiegelstijging) bij te houden tot ca. 1-1,5 cm/jaar, afhankelijk van de afstand tot de kust (tabel 5.2, Eysink, 2005; Dijkema et al., 2005a). Er zit echter wel een bovengrens aan het meegroeivermogen.

Ook buiten het bodemdalingsgebied vindt opslibbing plaats. Zowel uit historisch onderzoek als uit recente metingen blijkt dat de gemiddelde opslibbing voor de kwelder in de Paezmerlannen >10 mm/jaar bedraagt en te vergelijken is met die langs de rest van de Friese en Groninger kust (Van Duin et al., 2007).

Tabel 5.2

Vergelijking tussen de opslibbing op Ameland en twee scenario's van zeespiegelstijging (Van Dobben en Slim, 2010)

Ameland	Opslibbing
Neerlands Reid	6,2 ± 9,0 mm/jaar (95% betrouwbaarheidsinterval)
De Hon	5,1 ± 6,6 mm/jaar (95% betrouwbaarheidsinterval)
Scenario's	Zeespiegelstijging¹²
IPCC	4,4 ± 3,3 mm/jaar (range)
Veerman	8,8 ± 3,2 mm/jaar (range, excl. bodemdaling)

Wel is het zo dat de vastelandskwelders langs de Friese en Groningse kust zich momenteel kunnen handhaven dankzij de aanwezigheid van de rijshouten dammen. Zonder deze kwelderwerken zou er meer (laterale) erosie plaatsvinden. Een verdichting van de rijshouten dammen leidt tot gunstiger omstandigheden voor sedimentatie en kan het meegroeivermogen van de pionierzone verhogen (Dijkema, pers. med.). Pethick (1992) benadrukt dat erosie van kwelders een natuurlijke reactie is op zeespiegelstijging. Pogingen om de kwelderrand te beschermen via harde maatregelen betekenen dat de zone met slik in het intergetijdengebied wordt gehinderd bij het aanpassen aan de nieuwe golfomstandigheden. Dit wordt nog eens versterkt als uit de kwelder geërodeerd materiaal verdwijnt.

Door zeespiegelstijging neemt het getijprisma toe. Toename van de getijslag kan tot hogere sedimentatiesnelheden van de kwelders leiden, waarschijnlijk omdat er dan meer en grover materiaal naar de kwelders kan worden getransporteerd (Houwing, 2000). Ook kan door een groter getijvolume de golfaanval veranderen doordat geulen een groter dwarsprofiel krijgen, waardoor golven gemakkelijker bij de kwelder terecht komen (Janssen-Stelder, 2000), hetgeen tot verbreding van de kwelderkreken kan leiden, en waardoor zelfs poelen kunnen ontstaan (Pethick, 1992).

Volgens Feagin et al. (2009) is kweldervegetatie beter in staat om op langzame veranderingen te reageren zoals zeespiegelrijzing of veranderingen in de getijstromen, dan om schoksgewijze verstoringen aan de kwelderrand op te vangen. Daarom is het volgens Feagin et al. (2009) verstandig om het beheer en management niet alleen te focussen op het voorkomen van erosie door extreme gebeurtenissen, maar ook te richten op lange-termijndoelen op het gebied van sedimentatie processen op het niveau van het landschap.

¹² Volgens peilmetingen in de haven van Nes op Ameland is het gemiddeld hoogwater over de periode 1984-2001 met gemiddeld 2 mm/jaar gestegen.

5.2 Stormklimaat

Als klimaatverandering ook een verandering van de stormduur, frequentie en richting tot gevolg heeft, zal dit ook de ontwikkeling van de kwelders beïnvloeden. Een belangrijke vraag is in hoeverre kwelders afslaan tijdens storm en hoe lang het duurt de schade hiervan te herstellen. Omdat de golfenergie kwadratisch toeneemt met de windkracht, kan een relatief geringe verandering in het windklimaat een relatief grote impact hebben op de hoge intergetijdenzone (Allen en Pye, 1992). Stormen zorgen voor een sterke vloedstroom die relatief veel sediment landwaarts kan meevoeren. Maar een permanente verhoging van de golfenergie kan ook tot erosie leiden.

In een jaar met veel stormen kan netto-opslibbing van de kwelder plaatsvinden. In het jaar daarna zal echter erosie van de pionierzone optreden, omdat veel zaden en zaailingen in het stormjaar zijn weggespoeld. Daardoor is de pionierzone minder goed in staat de kwelder te beschermen (Janssen-Stelder, 2000).

5.3 Temperatuurstijging

Een verhoging van de gemiddelde en maximum temperatuur, het aantal warme dagen en de frequentie van hittegolven kan met name voor hoge delen van de kwelders invloed hebben.

Hogere temperaturen zijn voordelig voor C4-planten, zoals veel Chenopodiaceae (Ganzenvoetachtigen, zoals bv. melde) en slijkgras. Deze soorten bevorderen de opslibbing. De kans op vorst en het aantal vorstdagen neemt af, waardoor er minder kans is op vorstschade aan de vegetatie. Vorstgevoelige soorten als Engels slijkgras (*Spartina anglica*) en Gewone zoutmelde (*Atriplex portulacoides*) worden daardoor bevoordeeld. Doordat Engels slijkgras ook een polyploïde soort is (en een 'keystone species') zijn de eventuele uitbreiding van deze soort en de gevolgen daarvan, nog waarschijnlijker (Van der Staaï en Ozinga, 2008). In navolging van de ontwikkelingen in ZW-Nederland zal ook de rol van *Spartina* in het Waddengebied groter worden en zich daar uitbreiden. Door verhoogde invang van slib neemt het areaal pionierzone toe, en als gevolg daarvan zal de successie van de kwelder versnellen.

Ook zal de gemiddelde temperatuur van het zeewater toenemen waardoor onder meer de kinematische viscositeit zal afnemen met een afname van de mobiliteit van niet-cohesieve sedimenten en een toename van de valsnelheden van korrels (snellere afzetting) tot gevolg.

6 Conclusies, kennisleemten en aanbevelingen

Uit de literatuurstudie blijkt dat er veel kennis beschikbaar is over kwelderontwikkeling. Deze kennis is vooral gericht op ecologie en biodiversiteit in relatie tot abiotische aspecten als erosie, opslibbing en sediment-samenstelling. Ook blijkt dat er in Nederland en in internationaal opzicht belangstelling is voor de rol van kwelders en voorland bij hoogwaterbescherming. De interesse voor de potentiële capaciteit van kwelders om de gevaren van zeespiegelstijging als gevolg van klimaatverandering op te vangen is vooral recent gegroeid. In dit hoofdstuk worden op basis van de verkenning naar aanleiding van de onderzoeksvragen (zwart) conclusies getrokken en kennisleemten benoemd. Dit resulteert in een aantal vragen (rood) en aanbevelingen om deze kennisleemten op te vullen.

Onderzoeksvraag:

Welke kennis en ervaring is er rond de golfreducerende werking van kwelders in het Waddengebied en elders?

Op zowel internationaal als nationaal niveau blijkt dat er een beperkt aantal relevante studies beschikbaar is over de golfdempende werking van kwelders (inclusief krekens en klifrand), kweldervegetatie en de aangrenzende slikken (zie hoofdstuk 3). Dit betreft zowel modelmatige studies als veldstudies. In Nederland zijn nog nauwelijks veldmetingen gedaan naar de golfreducerende werking van kwelders, maar is wel een aantal verkenningen uitgevoerd met het model SWAN.

Relatief veel onderzoek is verricht naar de fysische aspecten die kweldervorming bepalen, en naar de vegetatieontwikkeling (hoofdstuk 2). Het areaal aan kwelders in de Nederlandse Waddenzee en de ophoging wordt al meer dan 50 jaar gemonitord.

Uit zowel de veldstudies als modelmatige verkenningen blijkt dat kwelders een aantoonbare golfreducerende werking hebben, afhankelijk van optredende waterstanden op de kwelder. Er komt evenwel ook naar voren dat het bijzonder moeilijk is om de kenmerken van een kwelder modelmatig te beschrijven vanwege de grote ruimtelijke en temporele heterogeniteit, en vanwege de complexiteit en dynamiek van het kweldersysteem. Zowel hydrodynamische, fysisch-chemische als biologische aspecten beïnvloeden het kweldersysteem en er zijn vele terugkoppelingsmechanismen. Toch lijkt het mogelijk om op basis van de gevonden resultaten algemene vuistregels te geven over de golfdempende werking van kwelders. Door verschillende auteurs wordt aangegeven dat vooral in de eerste tientallen meters vanaf de rand van de kwelder een sterke golfreductie plaatsvindt en dat voor een significante bijdrage in elk geval een strook kwelders van 10-80 m breed nodig is.

Voor de meeste veldstudies geldt dat de gevonden resultaten locatiespecifiek zijn. Zowel windomstandigheden (windkracht en -richting), getijverschil, getijstromingen, en de beschikbaarheid van sediment hangen af van de locatie en het tijdstip. Golfkracht is afhankelijk van windrichting, golfperiode en golfhoogte, en de getijfase en waterdiepte, terwijl stroming varieert met de getijfase. Het getij zelf varieert over een periode van 14 dagen en het getijverschil hangt af van de locatie. Bovendien heeft elke kwelder een dynamisch en locatiespecifiek krek patroon.

Hoewel in sommige veldstudies ook golfhoogten tijdens stormcondities zijn gemeten, is er nauwelijks ervaring met extreme omstandigheden. Juist extreme omstandigheden worden in onderzoek vaak niet meegenomen omdat ze zeldzaam zijn en moeilijk te meten. Hoge kwelders worden als stabiele systemen gezien met weinig energie-input. Een extreme gebeurtenis kan in zulke systemen juist tot disproportionele reacties leiden door

het verstoren van het evenwicht en het in gang zetten van lange-termijnveranderingen (kweldervormende processen). De relatie met waterveiligheid is daardoor moeilijk te kwantificeren (terugkoppeling van kwelders op de hydrodynamica).

Uit veebrandmetingen bij vrij hoge stormvloed langs de Oost-Friese kust blijkt dat kwelders de golfoploop reduceren. Of dit voor maatgevende stormvloed ook het geval is dient nader te worden uitgezocht, maar wordt wel waarschijnlijk geacht op grond van de relatie tussen de golfhoogte en de waterdiepte.

Vraag 1: *Is de kennis over het gedrag van kwelders en de invloed van kwelders op de hydrodynamiek representatief voor extreme en maatgevende omstandigheden?*

Aanbeveling 1: Tijdens extreme omstandigheden dienen golfoploop op dijkvakken met en zonder een kwelder (als een voorland) te worden bestudeerd. Dit dient in verband te worden gebracht met waterdiepte, golfhoogte en vegetatiedichtheid en -hoogte.

Aanbeveling 2: Omdat de golfdemping sterk locatiespecifiek is, dient de golfreductie op een aantal kenmerkende en van elkaar verschillende locaties te worden gemonitord.

Aanbeveling 3: De informatie verkregen uit aanbeveling 1 en 2 dient te worden gebruikt om modellen te kalibreren om vervolgens de toepassing van kwelders voor de waterveiligheid verder uit te werken.

Onderzoeksvraag:

Welke factoren bepalen de golfreducerende werking van kwelders?

Golfreductie wordt veroorzaakt door breking op het kwelderklif en als de kwelder breed genoeg is, ook door wrijving. Voor een significante golfdemping door de kwelder worden in de literatuur breedten van 10-80 m genoemd. Het merendeel van de Fries-Groningse vastelandskwelders voldoet hier ruimschoots aan.

De golfreducerende werking van kwelders en slikken is in belangrijke mate afhankelijk van de optredende waterstanden. De maximale hoogte van kwelders is echter begrensd, tot ca. 15-30 cm boven GHW (hoofdstuk 2). Tijdens hoge waterstanden (maatgevende omstandigheden) is vooral de hoogteligging van de kwelder van belang voor de golfreductie (hoofdstuk 2 en 3). De vraag is in hoeverre de vegetatie dan kan voorkomen dat de kwelder afslaet en er een grotere waterdiepte voor de dijk ontstaat met hogere golven tot gevolg. Bij lagere waterstanden doet ook de vegetatie zelf mee in het reduceren van de golfhoogte door een verhoogde bodemwrijving en daarmee samenhangend energieverlies (hoofdstuk 3). Hiervoor moet de kwelder wel breder zijn dan meerdere golf lengten. Reductie van golfhoogten tijdens normale omstandigheden kan bijdragen aan een reductie van de slijtage van de waterkering, en daarmee van belang zijn voor de kosten van het dijkonderhoud.

Omdat afslag vooral vanaf de klifrand optreedt, dient de breedte groter te zijn dan de genoemde 10-80 m. Deze moet namelijk na een stormvloed minimaal aanwezig zijn om een eventuele volgende stormvloed op te vangen.

Onderzoeksvraag:

Wat zijn de factoren die kweldervorming beïnvloeden?

Hoofdstuk 2 behandelt zowel de externe factoren (getij, golf-windklimaat, zeespiegelstijging als sedimenthuishouding) als de interne factoren (vegetatieontwikkeling, inklinking en kreekvorming). Ook beheer beïnvloedt kweldervorming. In de Waddenzee heeft de constructie van rijshouten dammen om kweldersedimentatie te bevorderen grote invloed op de sedimentatie en optredende golven. Constructie van rijshouten dammen is een

belangrijk mechanisme voor het sturen van kwelderontwikkeling. Deze en andere concepten van eco-engineering, mede in het licht van de verwachte effecten van klimaatverandering, rechtvaardigen nader onderzoek.

Vraag 2: *Welke rol speelt de aan de kwelder grenzende zone (wadplaten en slikken) en de daar voorkomende ecosystemen in kwelderdynamiek en golfreductie?*

Aanbeveling 4: Voer een uitgebreide internationale literatuurstudie uit naar het effect van rifbouwende oesters, mosselbanken en zeegrasvelden op het golfklimaat en naar de condities waaronder deze ecosystemen in samenhang met kwelders toepasbaar kunnen zijn voor waterveiligheid.

Aanbeveling 5: Onderzoek de processen waarbij slikken onder invloed van 'biobouwers', bijvoorbeeld schelpdieren en zeegrasvelden, in de zomer sediment 'opslaan' en in het najaar kwelders 'voeden'.

Onderzoeksvraag:

In hoeverre wordt de golfreducerende werking van kwelders toegepast in het Nederlandse waterveiligheidsbeleid en in de ons omringende landen?

Onderzoeksvraag:

In hoeverre kunnen natuurlijke of semi-natuurlijke kwelders een bijdrage leveren aan de waterveiligheid in het Waddengebied bij een veranderend klimaat?

Recent is de belangstelling voor de bijdrage van kwelders aan de waterveiligheid zowel vanuit de overheid (landelijk, regionaal en lokaal) als bewoners toegenomen. In Duitsland is ruime ervaring met het toepassen van kwelders voor de waterveiligheid, en worden kwelders als onderdeel van de zeewering beschouwd. Ook in Engeland speelt kweldervorming, via 'managed realignment' vooral op lokale schaal een rol voor de veiligheid.

Het blijkt dat voor het ontwerp van waterkeringen in het Waddengebied in de berekeningen voor de maatgevende condities op 50 m uit de dijkvoet of 100 meter uit de dijkkruij de kwelders als voorland zijn verdisconteerd. Er wordt daarbij evenwel geen rekening gehouden met de golfdempende werking van de vegetatie. Het aan de dijk grenzende deel wordt niet meegewogen in de golfbelasting van de dijk. Waar kwelders mede bepalend zijn voor de maatgevende condities is het voorkómen van te sterke kweldererosie van belang. Hiervan lijken zich maar weinig waterkeringsbeheerders en kweldereigenaren zich bewust te zijn. Daarbij is ook de eigendom- en beheersituatie een aandachtspunt: de kwelders zijn veelal geen eigendom van de waterkeringsbeheerder.

Gegeven het feit dat kwelders al deels in de waterveiligheidsberekeningen worden meegenomen, is het mogelijk om op grond van de bestaande modellen na te gaan wat de impact is van nieuwe aanleg van kwelders op de waterveiligheid van de achterliggende dijken.

Willen kwelders worden ingezet voor dijkveiligheid (kostenreductie bij gemiddelde stormvloeden of misschien zelfs beperking van golfoverslag bij maatgevende condities) dan dienen de kwelders ook redelijk bestand te zijn tegen klimaatverandering.

Werkbare handleidingen en toetsingscriteria voor de waterveiligheid van de Nederlandse kust zijn alleen beschikbaar voor gangbare keringen. Omdat de stabiliteit en betrouwbaarheid van ecologische keringen nog niet goed kunnen worden bepaald, wordt het principe van eco-engineering nog weinig toegepast.

Vraag 3: *Hoe kunnen kwelders daadwerkelijk worden toegepast in het waterveiligheidsbeleid?*

Aanbeveling 6: Voor een weloverwogen keuze voor de toepassing van kwelders en andere biobouwers voor waterveiligheid is het belangrijk om criteria te ontwikkelen voor een afweging (waaronder kosten en baten) met traditionele keringen. Andere ecologische aspecten (ecosysteemdiensten) dienen hierin meegewogen te worden.

Aanbeveling 7: Naar analogie van het restprofiel bij duinen zou als criterium een restprofiel na erosie/afslag van kwelders moeten worden bepaald. Hiervoor is een studie nodig van de erosiesnelheden van kwelders en de dempende werking van kwelderwerken op erosie onder maatgevende stormvloedcondities.

Aanbeveling 8: Ga na wat de mogelijkheden zijn voor innovatieve waterkeringen waarbij de kwelder onderdeel uitmaakt van de kering (zoals een hybride kering).

Aanbeveling 9: Om na te gaan hoe kwelders in de Waddenzee reageren op stormomstandigheden, zou moeten worden geanalyseerd (bijvoorbeeld op basis van remote-sensingbeelden) hoe het kwelderareaal zich ontwikkelde na de stormen van de afgelopen decennia.

Aanbeveling 10: Neem initiatief tot internationale kennisuitwisseling door middel van workshops, symposia en werkbezoeken waarbij ervaringen met natuurlijke keringen in hoogwaterbescherming kunnen worden gedeeld.

Aanbeveling 11: De 'Integrated Coastal Zone Management'-benadering van Sleeswijk-Holstein kan als richtsnoer dienen voor een betere afstemming tussen verantwoordelijkheid voor waterveiligheid en voor beheer en eigendom. Ook kan het als richtsnoer dienen in de afstemming tussen waterveiligheidsdoelen en natuurbelidsdoelstellingen.

Aanbeveling 12: Om meer inzicht te verkrijgen in kwelderontwikkeling in relatie tot klimaat, dienen kwelderontwikkelingen langs de Europese kust met elkaar te worden vergeleken.

Aanbeveling 13: Voor het inzetten van kwelders en of biobouwers ten behoeve van de veiligheid is het opzetten van een heldere communicatie over de kennis en noodzakelijke kennisontwikkeling met de directe stakeholders (bewoners, eigenaren, beheerders, waterschappen, provincies, gemeenten en rijk) van groot belang. Daarbij zou een bestaande kwelder met veel verschillende breedten als voorbeeld kunnen dienen (bijv. Noard-Fryslân Bûtendyks).

Aanbeveling 14: Besteed veel aandacht aan de afstemming van doelen gericht op waterveiligheid met doelen gericht op bescherming en herstel van natuurwaarden van kwelders of andere habitats.

Aanbeveling 15: Onderzoek de relatie tussen de aan/afwezigheid van een kwelder en de mate van benodigd onderhoud aan de waterkering.

Vraag 4: *Wat is het potentieel van kwelderontwikkeling en –uitbreiding voor hoogwaterbescherming in de Waddenzee?*

Nieuwe kwelders kunnen zich alleen daar ontwikkelen waar de aanvoer van sediment groot genoeg is. Dit is niet overal langs de vastelandskust het geval.

Aanbeveling 16: Construeer een kanskaart voor kwelderontwikkeling in relatie tot de mogelijke bijdrage van kwelders op de betreffende locaties aan de waterveiligheid.

Aanbeveling 17: Analyseer beheermaatregelen om kweldervorming te beïnvloeden en breng in beeld wat de voor- en nadelen van deze maatregelen zijn.

Aanbeveling 18: Experimenteer langs het Wierumerwad (Fryslân) of de Emmapolder (Groningen) met beperkte ophoging van het slik om kweldergroei mogelijk te maken. In principe zouden hier over een lengte van ca. 10-15 km dijk kwelders kunnen worden aangelegd.

Aanbeveling 19: Verken de mogelijkheden om te experimenteren met kunstmatige aanvoer van sediment.

Literatuur

Alkyon, 2008. Simulation field for storm winds, flow fields, and wave climate in the Wadden Sea, Rapport A2108. Emmeloord, Alkyon.

Allen, J.R.L., 1993. Muddy alluvial coasts of Britain: field criteria for shoreline position and movement in the recent past. *Proceedings of the Geologists' Association*, 104: 241–262.

Allen, J.R.L., 2000. Morphodynamics of Holocene salt marshes: A review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews* 19(12): 1155-1231.

Allen, J.R.L. en K. Pye, 1992. Coastal saltmarshes: their nature and importance. In: J.R.L. Allen en K. Pye (Eds.), *Saltmarshes; Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance*. Cambridge, Cambridge University Press: 1-18.

Bakker, J.P., 1989. Nature management by grazing and cutting: on the ecological significance of grazing and cutting regimes applied to restore former species-rich grassland communities in the Netherlands. Dordrecht [etc.], Kluwer Academic Publishers.

Bakker, J.P., P. Esselink, K.S. Dijkema, W.E. van Duin en D.J. de Jong, 2002. Restoration of salt marshes in the Netherlands. *Hydrobiologia* 478: 29-51.

Battjes, J.A. en M.J.F. Stive, 1985. Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves. *Journal of Geophysical Research*, 90, C5: 9159-9167.

Bayliss-Smith, T.P., R. Healey, R. Lailey, T. Spencer en D.R. Stoddart, 1979. Tidal flows in salt marsh creeks. *Estuarine and Coastal Marine Science* 9(3): 235-255.

Beets D.J. en A.J.F. van der Spek, 2000. The Holocene evolution of the barrier and the back-barrier basins of Belgium and the Netherlands as a function of late Weichselian morphology, relative sea-level rise and sediment supply. *Netherlands Journal of Geosciences* 79 (1): 3-16.

Behre, K-E., 2004. Coastal development, sea level change and settlement history during the later Holocene in the Clay District of Lower Saxony (Niedersachsen), Northern Germany. *Quaternary International* 112: 37-53.

Borsje, B.W., B.K. van Wesenbeeck, F. Dekker, P. Paalvast, T.J. Bouma, M.M. van Katwijk en M.B. De Vries, 2011. How ecological engineering can serve in coastal protection. *Ecological Engineering* 37: 113–122.

Bos, A.R., T.J. Bouma, G.L.J. de Kort en M.M. van Katwijk, 2007. Ecosystem engineering by annual intertidal seagrass beds: Sediment accretion and modification. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74: 344-348.

Bradley, K. en C. Houser, 2009. Relative velocity of seagrass blades: Implications for wave attenuation in low-energy environments. *Journal of Geophysical Research* 114: F01004.

Brampton, A.H., 1992. Engineering significance of British saltmarshes. In: J.R.L. Allen en K. Pye (Eds.), *Saltmarshes; Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance*. Cambridge, Cambridge University Press: 115-122.

Brinkman, A.G., B.J. Ens, K. Kersting, M. Baptist, M. Vonk, J. Drent, B.M. Janssen-Stelder en M.W.M. van der Tol, 2001. Modelling the impact of climate change on the Wadden Ecosystems. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate change. Bilthoven.

Callaghan, D.P., T.J. Bouma, P. Klaassen, D. van der Wal, M.J.F. Stive en P.M.J. Herman, 2010. Hydrodynamic forcing on salt-marsh development: Distinguishing the relative importance of waves and tidal flows. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 89(1): 73-88.

CERC (Coastal Engineering Research Centre), 1984. *Shore Protection Manual*, Vol. 1 and 2, US Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

Chen, S.N., L.P. Sanford, E.W. Koch, F. Shi en E.W. North, 2007. A Nearshore Model to Investigate the Effects of Seagrass Bed Geometry on Wave Attenuation and Suspended Sediment Transport. *Estuaries and Coasts* 30(2): 296-310.

Day, J.W., G.P. Kemp, D.J. Reed, D.R. Cahoon, R.M. Boumans, J.M. Suhayda en R. Gambrell, 2011. Vegetation death and rapid loss of surface elevation in two contrasting Mississippi delta salt marshes: The role of sedimentation, autocompaction and sea-level rise. *Ecological Engineering* 37(2): 229-240.

Deltacommissie, 2008. *Samen werken met water: een land dat leeft, bouwt aan zijn toekomst; bevinden van de Deltacommissie 2008*. Rotterdam, Deltacommissie.

Détriché, S., A.S. Susperregui, E. Feunteun, J-C. Lefeuvre en A. Jigorel, 2011. Interannual (1999-2005) morphodynamic evolution of macro-tidal salt marshes in Mont-Saint-Michel Bay (France). *Continental Shelf Research* 31(6): 611-630.

Dobben, van H. en P. Slim, 2010. 4.3 Internationale klimaatcorridor duin en kust: 18, 64-70. In: M. Vonk, C.C. Vos en D.C.J. van der Hoek (red.). *Adaptatiestrategie voor een klimaatbestendige natuur*. Planbureau voor de Leefomgeving en Wageningen UR, Den Haag/Bilthoven.

Duin, van W E., P. Esselink, D. Bos, R. Klaver, G. Verweij en P-W. van Leeuwen, 2007. *Proefverkweldering Noard-Fryslân bûtendyks: evaluatie kwelderherstel 2000-2005*. Den Burg [etc.], Wageningen IMARES [etc.].

Duren, van L. en B. van der Valk, 2010. *Basisdocument werkconferentie Helder over Slib, Deltares*.

Duren, van L. , H. Winterwerp, B. van Prooijen, H. Ridderinkhof en A. Oost, in prep. *Clear as Mud: understanding fine sediment dynamics*. In: *the Wadden Sea - Action Plan*.

Dijkema, K.S., J. van den Bergs, J.H. Bossinade, P. Bouwsema, R.J. de Glopper en J.W.Th.M. Van Meegen, 1988. Effecten van rijzendammen op opslibbing en omvang van de vegetatiezones in de Friese en Groninger landaanwinningswerken. Rijkswaterstaat, dir. Groningen, Nota GRAN 1988-2010, RIN-rapport 88/66, Texel & RIJP-rapport 1988-33 Cbw, Lelystad, 119 pp.

Dijkema, K.S. en J.H. Bossinade, 1990. *Vegetatieclassificatie van Waddenzeekwelders volgens een vast typenstelsel*. RIN-rapport 90/15, 37 pp.

Dijkema, K.S., J.H. Bossinade, P. Bouwsema en J. de Glopper, 1990. Salt Marshes in the Netherlands Wadden Sea: rising high tide levels and accretion enhancement. In: J.J. Beukema, W.J. Wolff, en J.J.W.M. (Eds.). Expected effects of climatic change on marine coastal ecosystems: 173-188. Dordrecht, Kluwer.

Dijkema, K.S., A. Nicolai, J. de Vlas, C.J. Smit, H. Jongerius en H. Nauta, 2001. Van landaanwinning naar kwelderwerken. Leeuwarden, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Nederland.

Dijkema, K.S., W.E. van Duin en H.F. van Dobben, 2005a. Kweldervegetatie op Ameland: effecten van veranderingen in de maaiveldhoogte van Nieuwlandsrijd en De Hon. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; evaluatie na 18 jaar gaswinning. Assen, Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland.

Dijkema, K.S., D.J. de Jong, M.J. Vreeken-Buijs en W.E. van Duin, 2005b. Kwelders en schorren in de Kaderrichtlijn Water; ontwikkeling van potentiële referenties en van potentiële goede ecologische toestanden. Rijkswaterstaat.

Dijkema, K.S., W.E. van Duin, E.M. Dijkman en P.W. van Leeuwen, 2007. Monitoring van kwelders in de Waddenzee: rapport in het kader van het WOT programma Informatievoorziening Natuur i.o. (WOT IN). Wageningen, Alterra.

Dijkema, K.S., W.E. van Duin, E.M. Dijkman, A. Nicolai, H. Jongerius, H. Keegstra, L. van Egmond en H.J. Venema, 2010. 50 jaar monitoring en beheer van de Friese en Groninger kwelderwerken: 1960-2009. Imares, Texel.

Ecoshape Foundation, 2011. Building with Nature. <http://www.ecoshape.nl/ecoshape-english/home>. Retrieved 05/04/2011.

Effing, B., 2005. Wad nou Kwelder? Golfdemping door kwelders gekoppeld aan beleid en beheer. Afstudeerrapport Universiteit Twente.

Erchinger, H.F., 1974. Wellenaufbau ab Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitteilungen Heft 41/1974 Leichtweiss-institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig.

Erchinger, H.F., 1989. Saltmarsh Management in Respect of Coastal Protection Demands in Niedersachsen, in: Proceedings of the Second Trilateral Working Conference on Saltmarsh management in the Wadden Sea Region, p. 73-77.

Eysink, W.D., 2005. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; evaluatie na 18 jaar gaswinning. Assen, Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland.

Feagin, R.A., S.M. Lozada-Bernard, T.M. Ravens, I. Möller, K.M. Yeager en A.H. Baird, 2009. Does vegetation prevent wave erosion of salt marsh edges? Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 106(25): 10109-10113.

Fiselier, J., N. Jaarsma, T. van der Wijngaart, M. de Vries, M. van der Wal, J. Stapel en M.J. Baptist, 2011. Perspectief natuurlijke keringen; een eerste verkenning ten behoeve van het Deltaprogramma. Building with Nature – Ecoshape.

Figge, K., 1980. Das Elbe-Urstromtal im Bereich der Deutschen Bucht (Nordsee). *Eiszeitalter und Gegenwart* 30: 203-211.

Flemming, B.W. en R.A. Davis, 1994. Holocene evolution, morphodynamics and sedimentology of the Spiekeroog Barrier Island system (Southern North Sea). In: Flemming, B.W. & Hertweck (Eds.). *Tidal Flats and Barrier Systems of Continental Europe: A selected overview*. *Senckenbergiana Maritima* 24, 117-155.

Fonseca, M.S. & J.A. Cahalan, 1992. A Preliminary Evaluation of Wave Attenuation by Four Species of Seagrass. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 35: 565—576.

Glopper, R.J., de, 1986. The saltmarsh reclamation Works, methodology and some research results. In: R.J. de Glopper (Ed.). *Wadden and land reclamation; presentations at scientific meeting May 1985*. Flevo announcements 252. Lelystad, Direction of IJsselmeerpolders, pp.23-32.

Goor, van M.A., T.J. Zitman, Z.B. Wang en M.J.F. Stive, 2003. Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202(3-4): 211-227.

Haas, de H. en D. Eisma, 1993. Suspended sediment transport in the Dollard estuary. *Neth. J. Sea Res.* 31, 37-42.

Haslett, S.K., 2009. *Coastal systems*. London [etc.], Routledge.

Heinze, A., 2000. Archäologische Funde im ostfriesischen Watt. *Jaarverslagen van de Vereniging voor Terpenonderzoek* 76-82 1992-98: 76-97, Groningen.

Henderson J. en L.J. O'Neil, 2003. Economic Values Associated with Construction of Oyster Reefs by the Corps of Engineers, EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-ER-01). Vicksburg, MS: U.S. Army Engineer Research and Development Center.

Heteren, van S. en A. van der Spek, 2003. Long-term evolution of a small estuary: the Lauwerszee (northern Netherlands). TNO rapport. NITG 03-108-A. 18pp.

Heijer, den F., J. Noort, H. Peters, P. de Grave, A. Oost en M. Verlaan, 2007. *Allerheiligenvloed 2006; achtergrondverslag van de stormvloed van 1 november 2006*. Rijkswaterstaat/Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Hofstede, J.L.A., 2003. Integrated management of artificially created salt marshes in the Wadden Sea of Schleswig-Holstein, Germany. *Wetlands Ecology and Management* 11(3): 183-194.

Holthuijsen, L.H., 2007. *Waves in oceanic and coastal waters*, Cambridge University Press.

Houwing, E.J., 2000. Sediment dynamics in the pioneer zone in the land reclamation area of the Wadden Sea, Groningen, The Netherlands. Proefschrift Universiteit Utrecht.

Hurk, van den, B., A. Klein Tank, G. Lenderink, A. van Ulden, G.J. van Oldenborgh, C. Katsman, J. van den Brink, J. Bessembinder, W. Hazeleger en S. Drijfhout, 2006. KNMI Climate Change Scenarios 2006 for the Netherlands. KNMI Scientific Report WR 2006-01, KNMI, De Bilt.

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

Kamimsky, G.M. en N.C. Kraus, 1993. Evaluation of depth-limited wave breaking criteria. Proc. 2nd Int. Symp. Ocean Wave Measurement and Analysis WAVES 93 (New Orleans), New York, ASCE, pp. 180-193.

Kabat, P., 2009. Kennis voor een duurzame toekomst van de Wadden: integrale kennisagenda van de Waddenacademie. [S.l.], Waddenacademie KNAW.

Kamps, L.F., 1956. Mud distribution and land reclamation in the Eastern Wadden shallows. Rijkswaterstaat Comm., 4, The Hague, 73 pp.

Katwijk, van M., T.J. Bouma, M. de Vries en B.W. Borsje, 2007. Biobouwers van de kust en klimaatsverandering. Inventarisatie van bestaande kennis en toepassingsmogelijkheden. Internal report.

King, S.E. en J. N. Lester 1995. The value of salt marsh as a sea defence. Marine Pollution Bulletin 30(3): 180-189.

Lammers, J., 2009. Dijk en meer: eindrapportage verkenning toekomst Afsluitdijk. [s.i., s.n.].

Le Hir, P., W. Roberts, O. Cazaillet, M. Christie, P. Bassoulet en C. Bacher, 2000. Characterization of intertidal flat hydrodynamics. Continental Shelf Research 20(12-13): 1433-1459.

Leonard, L.A., A.C. Hine en M.E. Luther, 1995. Surficial Sediment Transport and Deposition Processes in a *Juncus roemerianus* Marsh, West-Central Florida. Journal of Coastal Research 11(2): 322-336.

Löffler, M.A.M., C.C. de Leeuw, M.E. ten Haaf, S.K. Verbeek, A.P. Oost, A.P. Grootjans, E.J. Lammerts en R.M.K. Haring, 2008. Eilanden natuurlijk. Uitgave Het Tij Geleerd (Waddenvereniging, Staatsbosbeheer, Natuurmonumenten, Rijkswaterstaat, It Fryske Gea, Rijksuniversiteit Groningen, Radboud Universiteit Nijmegen, Rijksuniversiteit-Utrecht).

Loon-Steensma, van J.M., 2011. Kweldervorming langs de Terschellinger Waddendijk: een verkenning naar kansen, beperkingen en vragen rond kweldervorming langs de Waddendijk e.o. van Terschelling. Wageningen, Alterra.

Meer, van der J.W., 2002. Technisch rapport golfoploop en golfoverslag bij dijken. Delft, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

Meyer, D.L., E.C. Townsend en G.W. Thayer, 1997. Stabilization and erosion control value of oyster cultch for intertidal marsh. Restoration Ecology 5: 93-99.

Ministerie van Economische zaken, Landbouw & Innovatie, 2011. Gebiedendocumenten Natura 2000-gebieden. www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/gebiedendatabase.aspx?subj=n2k.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2007. Voorschrift toetsen op veiligheid: primaire waterkeringen. Den Haag, Ministerie van Verkeer en Waterstaat.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2009. Programma rijkswateren 2010-2015: uitwerking waterbeheer 21e eeuw, Kaderrichtlijn Water en Natura 2000; beheer- en ontwikkelplan voor de rijkswateren 2010-2015. Rijkswaterstaat.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, ministerie van Landbouw Natuur en Voedselkwaliteit en ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, 2010. Werk aan de delta: investeren in een veilig en aantrekkelijk Nederland, nu en morgen; Deltaprogramma 2011. Den Haag, Ministerie van Verkeer en Waterstaat [etc.].

Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, 2007. PKB3 Waddenzee deel 4.

Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein, 2007. Vorlandmanagementkonzept (VMK) in Schleswig-Holstein; Beschreibung 2007. Kiel, Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume des Landes Schleswig-Holstein.

Mol, A.C.S., 2004. Wave Attenuation by vegetation, WL I Delft Hydraulics Report Z2837/Z3040.

Molen, van der J. en H.E. de Swart, 2001. Holocene tidal conditions and tide-induced sand transport in the southern North Sea. *Journal of Geophysical Research*, 106 (C5): 9339-9362.

Möller, I., T. Spencer, J.R. French, D.J. Legett en M. Dixon, 1999. Wave Transformation over salt marshes: A Field and numerical modelling study from North Norfolk, England. *Estuarine, Coastal and Shelf science* 49: 411-426.

Möller, I., T. Spencer, J.R. French, D.J. Legett en M. Dixon, 2001. The Sea-Defence Value of Salt Marshes: Field Evidence from North Norfolk. *Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental Management* 15(2): 109-116.

Möller, I., T. Spencer en R. Rawson, 2002. Spatial and temporal variability of wave attenuation over a UK East-coast saltmarsh. *Proceedings of the 38th International Conference on Coastal Engineering*, Cardiff, London: Thomas Telford Publishing.

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(3-4): 337-351.

Möller, I., J. Mantilla-Contreras, T. Spencer en A. Haynes, 2011. Micro-tidal coastal reed beds: Hydro-morphological insights and observations on wave transformation from the southern Baltic Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92(3): 424-436.

Olf, H., J. de Leeuw, J.P. Bakker, R.J. Platerink, H.J. van Wijnen en W. de Munck, 1997. Vegetation succession and herbivory in a salt marsh: Changes induced by sea level rise and silt deposition along an elevational gradient. *Journal of Ecology* 85(6): 799-814.

Oost, A.P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet; a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas and drainage basins. PhD thesis, Utrecht, Geologica Ultraeclina, 126, 518 pp.

Paul, M. en C.L. Amos, 2011. Spatial and seasonal variation in wave attenuation over *Zostera noltii*. *Journal of Geophysical Research* 116: C08019.

Pethick, J.S., 1992. Saltmarsh geomorphology. In: J.R.L. Allen en K. Pye (Eds.). *Saltmarshes; Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance*. Cambridge, Cambridge University Press: 41-62.

Reed, D.I., 1995. The response of coastal marshes to sea-level rise: Survival or submergence? *Earth Surface Processes and Landforms* 20: 39-48.

Reed, D.I., 2002. Sea-level rise and coastal marsh sustainability: Geological and ecological factors in the Mississippi delta plain. *Geomorphology* 48: 233-243.

Sanders, M.E., P.A. Slim en R.M.A. Wegman, 2005. Monitoring kwelderrand Oerderduinen. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost; evaluatie na 18 jaar gaswinning. Assen, Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland.

Sha, L.P., 1990. Sedimentological studies of the ebb-tidal deltas along the West Frisian Islands, The Netherlands. PhD thesis. *Geologica Ultraiectica. Mededelingen van het Instituut voor Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit Utrecht*, 64: 159 pp.

Spek, van der A., 1994. Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Thesis, Utrecht University.

Staaïj, P. van de en W. Ozinga, 2008. 7. Verschuivende allianties in plantengemeenschappen door klimaatverandering: 123-151. In: Schaminée, J. & E. Weeda (red). *Grenzen in beweging: Beschouwingen over vegetatiegeografie*. KNNV Uitgeverij, Zeist.

Straaten, van L.M.J.U. en Ph. P. Kuenen, 1957. Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden Sea. *Geologie en Mijnbouw*, 19, 329-354.

Straaten, van L.M.J.U., 1964. De Bodem der Waddenzee. In: *Het Waddenboek*. Ned. Geol. Ver. Thieme, Zutphen, 77 pp.

Stratingh, G.A. en C.A. Venema, 1855. *De Dollard of geschied-, aardrijks- en natuurkundige beschrijving van dezen boezem der Eems*. Reprinted in 1979 by 'de Landelijke Vereniging tot Behoud van de Waddenzee' en 'Stichting Groninger Landschap', 333 pp.

Stuurgroep naar een rijke Waddenzee, 2010. Programma 'naar een rijke Waddenzee'.

Suzuki, T., T. Arikawa en M.J.F. Stive, 2009. Numerical modeling of hydrodynamics on a salt marsh. *Coastal Dynamics* 2009.

Suzuki, T., 2011. Wave dissipation over vegetation fields. Dissertatie, TU Delft.

Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, 2002. Leidraad zandige kust. Den Haag, Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen.

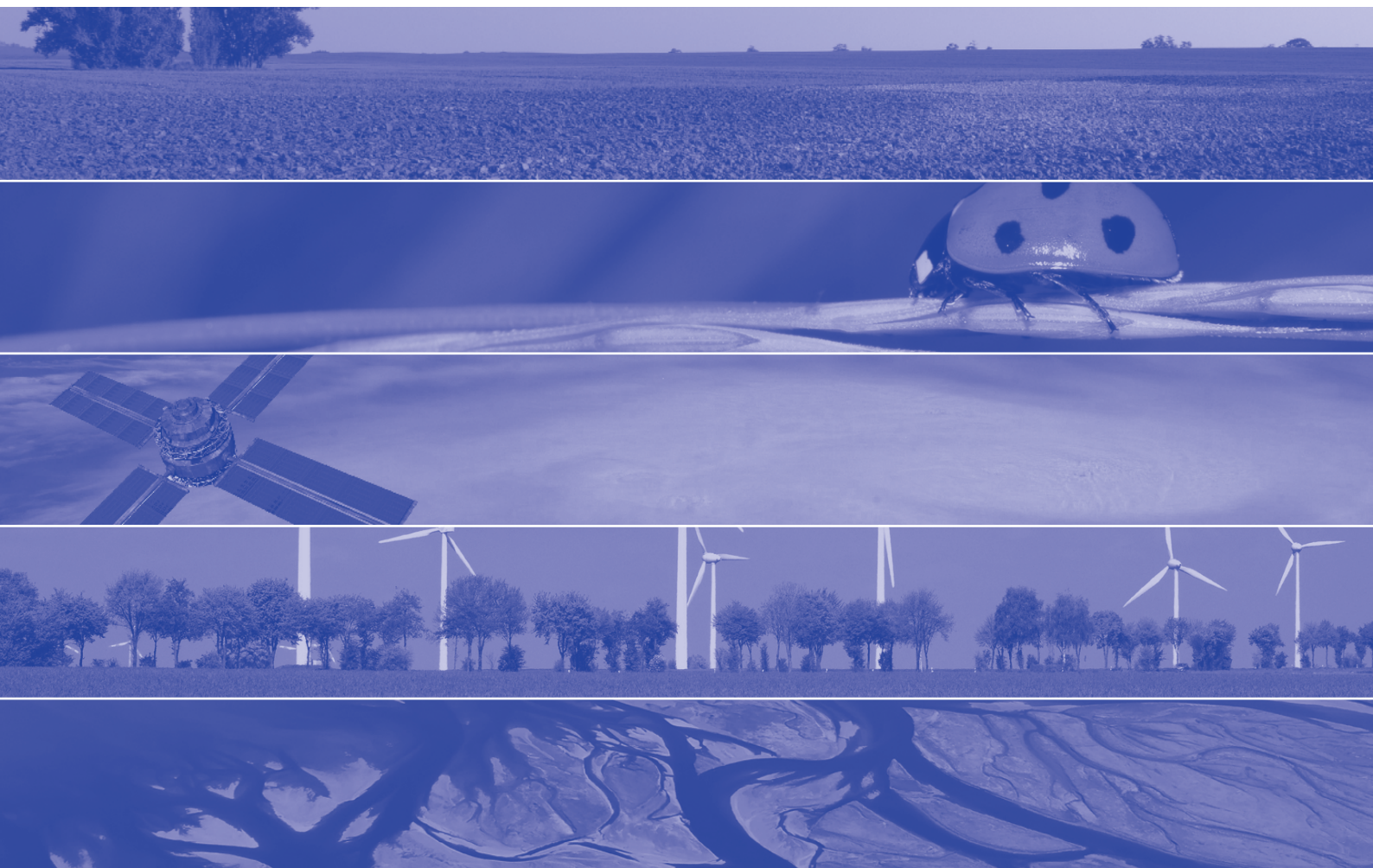
Temmerman, S., T. J. Bouma, J. van de Koppel, D. van der Wal, M.B. de Vries, P.M.J. Herman, 2007. Vegetation causes channel erosion in tidal landscape. *Geology* 35(7): 631-634.

Trilaterale Working Group on Coastal Protection and Sea Level Rise, 2005. Coastal protection and sea level rise - solutions for sustainable coastal protection in the Wadden Sea region. Wadden Sea Ecosystem No. 21. Common Wadden Sea Secretariat. Trilateral Working Group on Coastal Protection and Sea Level Rise (CPSL), Wilhelmshaven, Germany.

- Verheij, H.J., 2006. IJsselmeer zoekt verdieping; effecten van eilanden, ondiepten en vooroevers op de golfaanval en benodigde kruinhoogten van dijken. WL Delft hydraulics: 112.
- Vermaat, J., L. Bouwer, K. Turner en W. Salomons (Eds.), 2005. Managing European Coasts; Past, Present and Future. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Vos, P.C. en W.P. van Kesteren, 2000. The long-term evolution of intertidal mudflats in the Northern Netherlands during the Holocene; natural and anthropogenic processes. Continental Shelf Research 20: 1687-1710.
- Vos P.C. en E. Knol, 2005. Wierden ontstaan in een dynamisch getijdelandchap. In: E. Knol et al. (Eds.). Professor Van Giffen en het geheim van de wierden. Boek bij de gelijknamige tentoonstelling. Groninger Museum. 119-135.
- Vries, de M., T. Bouma, M. van Katwijk, B. Borsje en B. van Wesenbeeck, 2007). Biobouwers van de Kust, Z4158, WL I Delft Hydraulics.
- Westhoff, V., 1947. De plantengroei der duinen en wadgebieden van Terschelling. Vlieland en Texel. [S.l., s.n.].
- Winterwerp, J.C., G.J. de Boer, G. Greeuw en M.S. van Maren, 2008. Mud-induced wave damping in the Dutch Wadden Sea, Deltares report Z4465.
- Winterwerp, H., 2011. Reductie golfwerking door kwelders en slibvelden in Waddenzee en Eems-Dollard - concept onderzoeksprogramma. Quick Scan Deltaprogramma Waddengebied.
- Witteveen + Bos en Wetterskip Fryslân, 2009. Natuurlijke kansen bij dijkverbetering Ameland AME5-2 Witteveen en Bos, Deventer.
- Yang, S.L., B.W. Shi, T.J. Bouma, T. Ysebaert en X.X. Luo, 2012. Wave Attenuation at a Salt Marsh Margin: A Case Study of an Exposed Coast on the Yangtze Estuary. Estuaries and Coasts: 35(1): 169-182.
- Zedler, I.B., 2004. Compensating for wetland losses in the United States. IBIS 146(SI):92-100.

Websites

www.agrifish.dk
www.comcoast.org
www.ecoshape.nl
www.openearth.nl
www.google.com/intl/nl/earth/index.html
www.synbiosys.alterra.nl/natura2000/gebiedendatabase.aspx?subj=n2k



Alterra is onderdeel van de internationale kennisorganisatie Wageningen UR (University & Research centre). De missie is 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'. Binnen Wageningen UR bundelen negen gespecialiseerde en meer toegepaste onderzoeksinstituten, Wageningen University en hogeschool Van Hall Larenstein hun krachten om bij te dragen aan de oplossing van belangrijke vragen in het domein van gezonde voeding en leefomgeving. Met ongeveer 40 vestigingen (in Nederland, Brazilië en China), 6.500 medewerkers en 10.000 studenten behoort Wageningen UR wereldwijd tot de vooraanstaande kennisinstellingen binnen haar domein. De integrale benadering van de vraagstukken en de samenwerking tussen natuurwetenschappelijke, technologische en maatschappijwetenschappelijke disciplines vormen het hart van de Wageningen Aanpak.

Alterra Wageningen UR is het kennisinstituut voor de groene leefomgeving en bundelt een grote hoeveelheid expertise op het gebied van de groene ruimte en het duurzaam maatschappelijk gebruik ervan: kennis van water, natuur, bos, milieu, bodem, landschap, klimaat, landgebruik, recreatie etc.

Meer informatie: www.alterra.wur.nl