

Herstelpotentieel kwelders Waddenzee na ingrepen ten behoeve van dynamiek

Verkenning op basis van abiotische condities met een nadruk op sediment beschikbaarheid



Herstelpotentieel kwelders Waddenzee na ingrepen ten behoeve van dynamiek

Verkenning op basis van abiotische condities met een nadruk op sediment beschikbaarheid

Auteur(s)

Luka Jaksic

Bob Smits

Pim Willemsen

Marinka van Puijenbroek

Foto omslag: Kwelder bij Westhoek aan de vastelandskust van de Waddenzee (foto door P. Willemsen).

Herstellpotentieel kwelders Waddenzee na ingrepen ten behoeve van dynamiek

Verkenning op basis van abiotische condities met een nadruk op sediment beschikbaarheid

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Martijn Klein Obbink (RWS – WV), Jette Bijlholt (RWS – NN)
Referenties	WHV 07 BenO Waddenzee, SITO programmasubsidie IenW 2024
Trefwoorden	Kwelder, Waddenzee, sediment, afgraven, herstel, dynamiek

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	19-11-2024
Projectnummer	11210370-012
Document ID	11210370-012-ZKS-0002
Pagina's	83
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

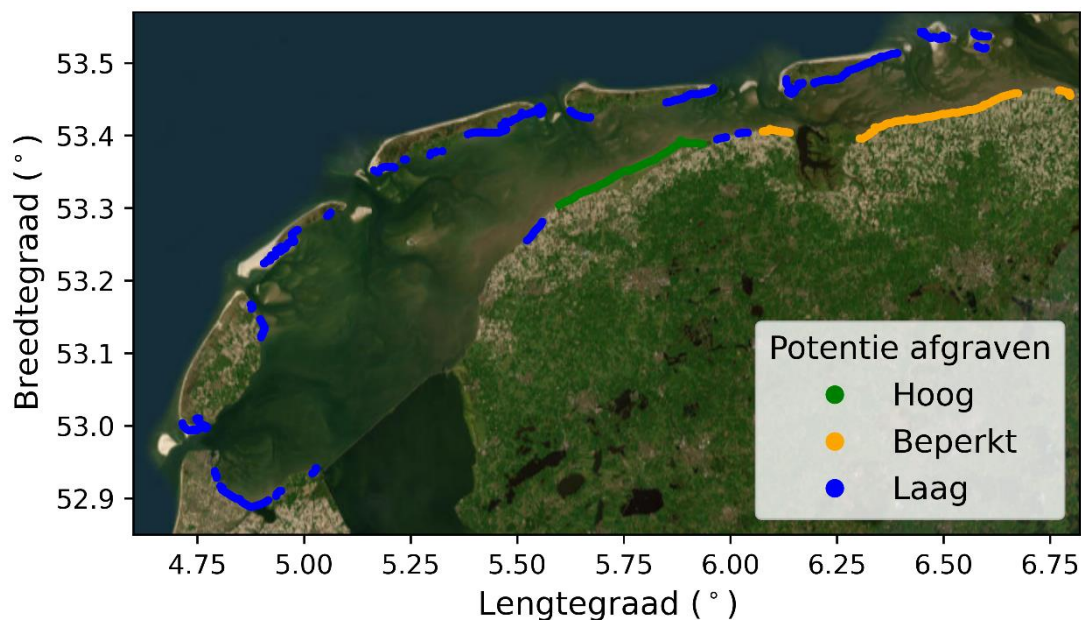
	Bob Smits	
	Luka Jaksic	
	Pim Willemsen	
	Marinka van Puijenbroek (Wageningen Marine Research)	

Samenvatting

Hoewel het kwelderareaal in de Waddenzee in de laatste decennia toeneemt, staat de kwaliteit van de kwelders, in termen van diversiteit in successiestadia van kwelderbegroeiing, onder druk. Binnen Natura2000, de Kaderrichtlijn Water (KRW) en de Trilaterale Waddenzee-overeenkomst (TWO) bestaan doelen om de kwaliteit van kwelders te verbeteren. Maatregelen die Rijkswaterstaat hiertoe overweegt zijn het lokaal afgraven van stukken kwelder en het onderhoud aan de kwelderwerken lokaal te stoppen. Het doel van deze studie is om de potentie voor beide maatregelen in kaart te brengen vanuit een abiotisch perspectief. Daarbij gaat het om de potentie voor herstel na afgraven en om het verbeteren van dynamiek zonder dit (op lange termijn) ten koste te laten gaan van het kwelderareaal. Hiervoor is een kwantitatieve analyse gemaakt van beschikbare gegevens en een kwalitatieve expertbeoordeling gedaan. Deze studie is beperkt tot de Nederlandse Waddenzee, waarbij de kwelders in het Eems-Dollard estuarium niet zijn meegenomen, omdat deze onderdeel zijn van een wezenlijk ander systeem met andere dynamiek.

De belangrijkste randvoorwaarden voor kweldergroei (hoogteligging, inundatietijd, sedimentbeschikbaarheid, golfcondities en bodemsamenstelling) zijn bepaald langs de randen van de Waddenzee op basis van beschikbare meetgegevens of modeluitvoer. Uit een vergelijking met de gemeten opslibbing in de kweldervakken blijkt dat alleen de bodemsamenstelling op de voorliggende wadplaat een duidelijk verband heeft: voor toenemende bodemslibgehalten wordt meer variatie in jaarlijkse opslibbing waargenomen, waarbij grote variaties tussen afzonderlijke jaren bestaan. De zandigere eilandkwelders blijken stabiel, maar kennen gemiddeld ook lagere sedimentatie al is onduidelijk of er sprake is van een causaal verband. Vermoedelijk spelen hier de verschillende ontstaansgeschiedenis en oriëntatie van de eilandkwelders een belangrijkere rol. Voor de andere parameters (hoogteligging, inundatietijd, sedimentbeschikbaarheid, golfhoogte) zijn geen eenduidige en statistisch significante verbanden naar voren gekomen uit de analyse.

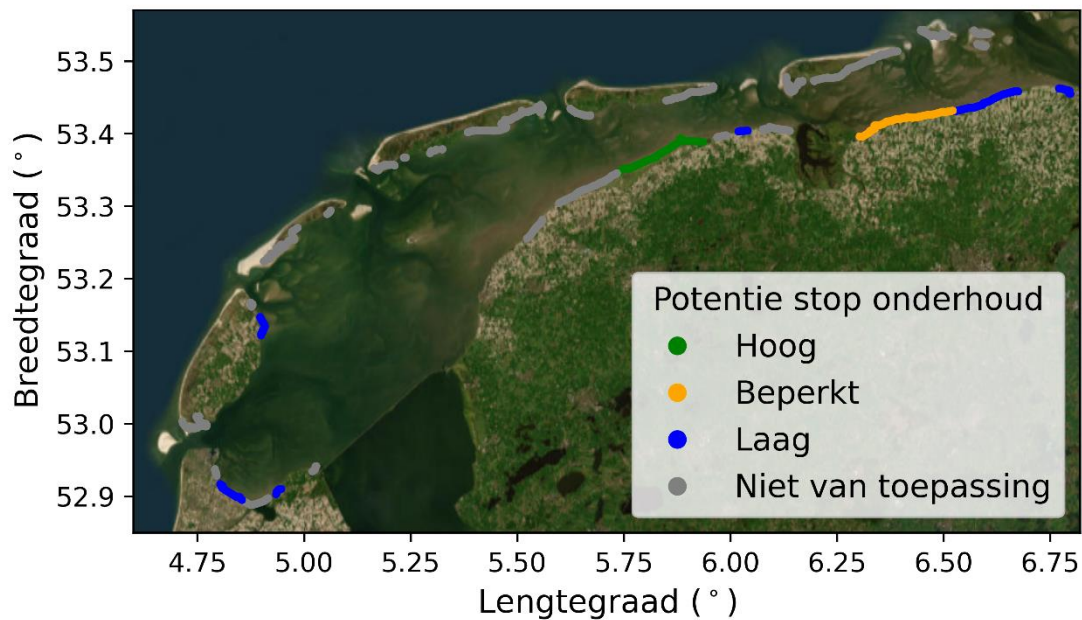
Op basis van alle beschikbare gegevens is middels expertbeoordeling een verkennende zoekkaart opgesteld als indicatie voor locaties om maatregelen toe te passen ten behoeve van kwelderdynamiek. De meeste potentie voor herstel na afgraven lijkt aanwezig bij de grote, brede kwelders bij Noord Friesland Buitendijks (zie Figuur 1-1). Hier breiden de hoge kwelderzones uit, is de opslibbing voldoende hoog en is voldoende accommodatieruimte aanwezig voor herstel na afgraven. Wel is van belang dat de verbinding met de Waddenzee goed wordt aangebracht, zodat er sedimentaanvoer plaatsvindt. Andere locaties waar afgraven mogelijk als maatregel kan worden toegepast zijn Peazemerlannen en de Groninger kwelders, al moeten de lokale mogelijkheden voor afgraven voor deze locaties eerst in meer detail worden bekeken vanwege de combinatie van eerdere ingrepen en de grote variabiliteit in kwelderbreedte en vegetatie. Op de overige Friese kwelders, het Balgzand en de eilandkwelders wordt afgraven als maatregel afgeraden, vanwege beperkte breedte, geringe herstel mogelijkheden of gebrek aan doelmatigheid.



Figuur 1-1 Potentiekaart voor areaal- of hoogteherstel na het afgraven van een kwelder. Deze kaart is opgesteld op basis van expertinschatting en is bedoeld als eerste verkenning voor de toepasbaarheid van de voorgestelde maatregel ten behoeve van kwelderdynamiek. Alvorens een maatregel kan worden toegepast moet meer locatie-specifiek gekeken worden en nog een ontwerp worden uitgewerkt.

Ook voor het stoppen met onderhoud van de kwelderwerken is de potentie bij Noord Friesland Buitendijks het grootst (zie Figuur 1-2). De Groninger kwelders moeten in meer detail lokaal worden bekeken door de grote variabiliteit in kwelderbreedte, vegetatie en dammen. Op een aantal locaties raden we af om het onderhoud aan de kwelderwerken te stoppen, vanwege reeds optredende klifvorming/erosie (bij Wierum), het risico op klifvorming (oostzijde Groninger kwelders) en vanwege gebrek aan doelmatigheid (op de eilandkwelders).

Deze expertbeoordeling is bedoeld als eerste verkenning naar geschikte locaties voor de toepasbaarheid van de voorgestelde maatregelen ten behoeve van kwelderdynamiek. Alvorens een maatregel kan worden toegepast moet nog een ontwerp worden uitgewerkt, gesprekken met belanghebbenden in de omgeving worden gevoerd en worden bepaald wat er met de afgegraven klei gebeurt. Daarnaast wordt afgeraden om beide maatregelen gecombineerd toe te passen, omdat dan de invloed van de afzonderlijke maatregelen niet waarneembaar is.



Figuur 1-2 Potentiekaart voor areaal of hoogte herstel na het stopzetten van onderhoud aan rijshoutendammen. Deze kaart is opgesteld op basis van expertinschatting en is bedoeld als eerste verkenning voor de toepasbaarheid van de voorgestelde maatregel ten behoeve van kwelderdynamiek. Alvorens een maatregel kan worden toegepast moet meer locatie-specifiek gekeken worden en nog een ontwerp worden uitgewerkt.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Aanleiding	9
1.2	Doel	10
1.3	Aanpak	10
1.4	Leeswijzer	11
2	Inleiding kwelderdynamiek algemeen	12
2.1	Conceptueel model kwelder	12
2.2	Kwelderdynamiek: <i>een opeenvolging van aangroei en afslag</i>	14
3	Kwelders in de Nederlandse Waddenzee	20
3.1	Grootschalige morfologische ontwikkeling Waddenzee	20
3.1.1	Ontstaansgeschiedenis kwelders	20
3.1.2	Ruimtelijke en temporele sedimentbeschikbaarheid	21
3.2	Overzicht huidige kwelders	24
3.2.1	Vastelandskwelders	25
3.2.2	Eilandkwelders	27
3.3	Ingrepen aan kwelderdynamiek	28
3.3.1	Ingrepen in bestaande kwelders	29
3.3.2	Ingrepen om kwelders te ontwikkelen	31
3.3.3	Lessen uit eerdere ingrepen	33
4	Abiotische randvoorwaarden voor kweldervoorkomen	35
4.1	Selectie van locaties	35
4.2	Aanwezigheid kwelders	36
4.3	Rijshoutendammen	36
4.4	Kwelderbreedte	37
4.5	Hoogteligging kwelder en voorliggend wad	37
4.6	Sedimentaanbod	39
4.6.1	Inundatietijd en -frequentie	39
4.6.2	Sedimentconcentraties	41
4.7	Golfcondities	43
4.8	Bodemsamenstelling	45
5	Vergelijking randvoorwaarden met gemeten opslibbing op de kwelders	48
5.1	Ontwikkeling kwelderhoogte	48
5.2	Ontwikkeling kwelderbreedte	48
5.3	Verband kwelderhoogte met abiotische condities	49

6	Zoekkaart herstelpotentie kwelders na ingrepen	51
6.1	Methode	51
6.2	Resultaten	51
7	Discussie	59
7.1	Kwantitatieve analyse	59
7.2	Expertbeoordeling	60
7.3	Praktische overwegingen voor kwelderbeheer	61
7.3.1	Stopzetten onderhoud rijshoutendammen	61
7.3.2	Lokaal afgraven van kwelders	61
8	Conclusie	62
8.1	Bevindingen	62
8.2	Aanbevelingen	63
	Referentielijst	66
A	Literatuuroverzicht ingrepen aan kwelderdynamiek	71
A.1	Ingrepen in bestaande kwelders	73
A.2	Ingrepen om kwelders te ontwikkelen	73
B	Ruimtelijk-gemiddelde abiotische condities met en zonder kwelders	76
C	Habitatgeschiktheid	77
D	Verband kwelderhoogte met abiotische condities	78
E	Kreekvorming Groninger kwelders	79

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

In het Nederlandse deel van de Waddenzee ligt circa 10.000 ha aan kwelders, waarvan ongeveer de helft op de Waddeneilanden en de andere helft aan de Friese en Groninger vastelandskust (Jentink, 2023). Kwelders komen vaak voor in ondiepe getijdengebieden. Het zijn kleiige, buitendijkse gebieden die regelmatig overstromen en waarop zouttolerante planten groeien (de Groot et al., 2013). Ze hebben een hoge natuurwaarde, herbergen unieke planten en zijn belangrijke broedvogelgebieden (Doody, 2008; Esselink et al., 2009). Kwelders zijn dan ook aangewezen als beschermd Natura2000-gebied in Nederland. Verder is er in de laatste jaren steeds meer interesse in kwelders in het kader van waterveiligheid, bijvoorbeeld als een meer duurzaam alternatief voor conventionele, “harde” kustbescherming (Willemsen et al. 2020; Sipma, 2023).

Hoewel het kwelderareaal in de Waddenzee in de laatste decennia toeneemt, staat de kwaliteit van de kwelders onder druk. Door een hoogtegradiënt van wad naar dijk/duin ontstaat er een zonering van verschillende successiestadia van vegetatie op de kwelder (Bockelmann et al., 2002; Olff et al., 1993). De diversiteit in successiestadia van kweldebegroeiing is mede bepalend voor de kwelderkwaliteit (van Wesenbeeck et al., 2014). Door veroudering neemt het areaal met climaxstadium met zeekweek toe (verruiging), wat een lagere plantenbiodiversiteit heeft (Elschot et al., 2020; Veeneklaas et al., 2013). Daarnaast is er door uitbreiding van de kwelder weinig ruimte voor brede pionierzones, voornamelijk bij de kwelders die zijn ontstaan door het plaatsen van rijshoutendammen (Elschot et al., 2020). Verder staat de recente toename in kwelderareaal in de Nederlandse Waddenzee in contrast met het midden van de twintigste eeuw (1925 - 1980) toen het kwelderareaal juist een dieptepunt had bereikt. Daarnaast groeit het kwelderareaal en stijgt de kweldermaaiveldhoogte niet overal even hard. Hoewel de maaiveldophoging langs de vastelandskust soms 1 à 2 centimeter per jaar bedraagt, is dit op de Waddeneilanden beperkt tot slechts enkele millimeters per jaar (Elschot et al., 2020).

Binnen Natura2000, de Kaderrichtlijn Water (KRW) en de Trilaterale Waddenzee-overeenkomst (TWO) bestaan doelen om de hoeveelheid kwelderareaal te behouden en de kwaliteit van kwelders te verbeteren. De verdeling van vegetatiezones en habitatgeschiktheid voor vogels (Natura2000 habitattypen H1330) worden hierbij als maat voor kwelderkwaliteit gehanteerd. Binnen het waterlichaam als geheel moet een evenwichtige kwelderzonering aanwezig zijn (Altenburg et al., 2018), waarbij onderscheid wordt gemaakt tussen vijf vegetatiezones: pionier, laag, midden, climax hoog met strandkweek en climax brakke zone met riet (Wielakker et al., 2011). Rijkswaterstaat werkt gezamenlijk met andere kwelderbeheerders, eigenaren en betrokkenen aan een beheerplan voor de kwelders. Daarvoor worden verschillende maatregelen onderzocht om de kwaliteit van kwelders te verbeteren, waaronder het afgraven of afplaggen van de kwelder of het stoppen met onderhoud aan de rijshoutendammen om de kwelder te verjongen en meer dynamiek toe te laten (de Groot, 2013).

Ingrepen ter bevordering van de kwaliteit van kwelders kunnen het kwelderareaal – al dan niet tijdelijk – beïnvloeden. Vanuit KRW- en Natura2000-regelgeving is behoud van kwelderareaal benodigd. Ingrepen ten behoeve van de kwaliteit mogen dus niet ten koste gaan van het kwelderareaal op de lange termijn. Voor Rijkswaterstaat is het daarom belangrijk om inzicht te hebben in de mogelijkheden van kwelders om te herstellen na een maatregel. De groei van de kwelder is afhankelijk van biofysische en biochemische omgevingsparameters en stressoren (bijv. hoge golven, inundatiefrequentie, nutriënten en

sedimentbeschikbaarheid). Kleine ingrepen, zoals afplaggen, hebben meestal alleen lokaal effect. Bij een grotere ingreep kan de ontwikkeling van de kwelder (tijdelijk) veranderen van bijvoorbeeld uitbreidend naar terugtrekkend (en vice versa), als gevolg van een verandering van de omgevingsparameters en stressoren. Bovendien kan eenzelfde kwelder in verschillende dynamische evenwichtstoestanden verkeren (zonder begroeiing of stabiel begroeid), afhankelijk van hoe drastisch de abiotische condities bij een ingreep aangepast worden (Schwarz et al., 2018; Sipma, 2023). Dit zou impliceren dat een kwelder niet altijd kan herstellen na een ingreep, wat kan leiden tot een verlies in kwelderareaal maar ook gevolgen heeft voor de biodiversiteit en waterveiligheid.

1.2 Doel

Rijkswaterstaat wil geen ingrepen doen waarbij het kwelderareaal zich niet herstelt. Voor dit kwantitatieve criterium is het belangrijk om inzicht te krijgen in het herstelpotentieel van de kwelders langs de Friese en Groninger vastelandskust en op de eilanden. De kwelders in het Eems-Dollard estuarium zijn niet meegenomen in deze studie, omdat de geofysische systeemwerking en beleidsdoelstellingen voor het Eems-Dollard estuarium wezenlijk anders zijn dan die van de Waddenzee. De scope van deze studie is verder beperkt tot herstel van de hoeveelheid kwelderareaal, met een nadruk op de benodigde abiotische condities (dus niet herstel van de ecologische waarde).

Het doel van deze verkenning is om voor deze gebieden afzonderlijk, inzicht te geven in het herstelpotentieel van de kwelderhoogte en -breedte na menselijk ingrijpen ter bevordering van kwelderdynamiek en diversiteit van kwelderzones. Hierbij wordt specifiek gekeken naar (1) het afgraven (of -plaggen) van de kwelder, en (2) het niet onderhouden van rijshoutendammen aan de voet van de kwelder. De verkenning moet kwalitatief inzicht geven in de kuststroken waar de hoogte of de breedte van de kwelder zich minder goed zal kunnen herstellen na afgraven of verdwijnen van de rijshoutendammen, en de gebieden waar deze ingrepen kansrijk zijn.

Naast deze studie is er meer informatie nodig om te beslissen waar ingegrepen gaat worden. Deze verkenning richt zich niet op de doelmatigheid van ingrepen vanuit ecologisch perspectief (welke criteria moeten hierbij gehanteerd worden?), op de kwaliteitsontwikkeling van de kwelder (is de nieuwe plantensoortensamenstelling gewenst?), of op de ontwikkeling van een dynamische beheerstrategie (om de hoeveel jaar moet er afgegraven worden?). Die aspecten moeten zorgvuldig gewogen worden om tot nuttige en haalbare ingrepen te komen.

1.3 Aanpak

In deze studie worden abiotische randvoorwaarden voor kweldergroei in de Waddenzee onderzocht op basis van beschikbare literatuur en data uit modellen en metingen. Specifiek wordt hierbij gekeken naar eerdere ingrepen, de hoogteligging, inundatietijd, sedimentbeschikbaarheid, golfcondities en bodemsamenstelling. Hiervoor is samengewerkt met Wageningen Marine Research, die de opslibingsmetingen op de kwelders uitvoeren en analyseren.

Op basis van alle beschikbare informatie en expertbeoordeling is een verkennende zoekkaart opgesteld als indicatie voor locaties om maatregelen toe te passen ten behoeve van kwelderdynamiek. Hierbij is gefocust op herstelpotentie na het afgraven van kwelders en het niet onderhouden van rijshoutendammen.

1.4 Leeswijzer

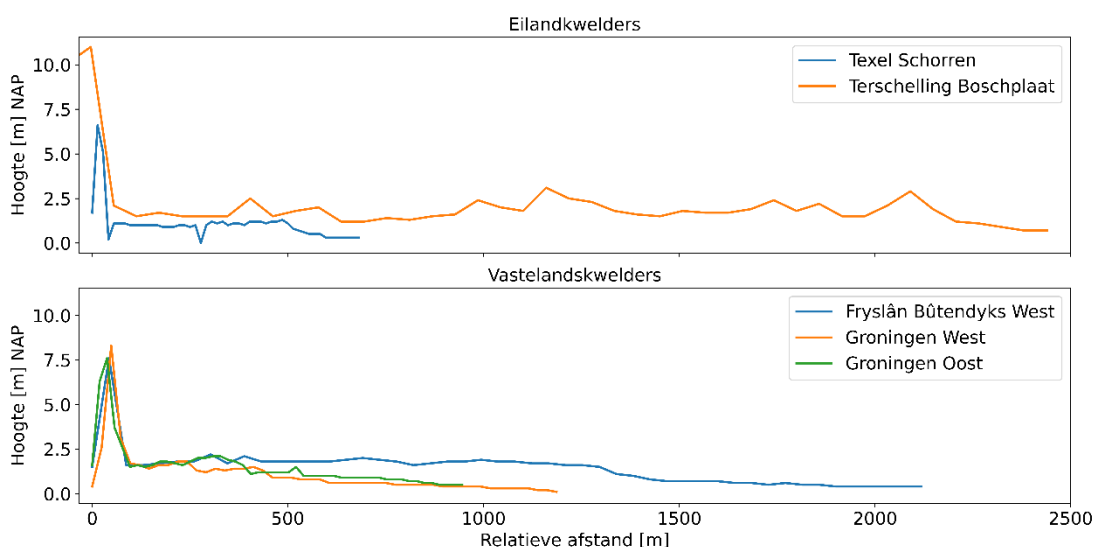
Dit rapport begint met een beschrijving van bestaande kennis uit literatuur. Hoofdstuk 2 geeft een beschrijving van algemene literatuur over kwelders op basis van een conceptueel model, processen die belangrijk zijn voor kwelderdynamiek en ingrepen aan kwelderdynamiek. In Hoofdstuk 3 worden de kwelders in de Waddenzee beschreven, waarbij aandacht is voor de ontstaansgeschiedenis een overzicht wordt gegeven van de bestaande kwelders en potentiële kwelderlocaties worden aangeduid. Vervolgens worden in Hoofdstuk 4 abiotische randvoorwaarden voor kweldergroei gekwantificeerd op basis van beschikbare gegevens uit metingen en modellen. Deze randvoorwaarden worden in Hoofdstuk 5 vergeleken met gemeten ontwikkeling van kwelderhoogte en -breedte om statistische verbanden te bepalen. De inzichten hieruit landen in Hoofdstuk 6 in een zoekkaart voor potentiële ingrepen ten behoeve van kwelderdynamiek. Het rapport sluit af met een discussie (Hoofdstuk 7) en conclusie (Hoofdstuk 8).

2 Inleiding kwelderdynamiek algemeen

Dit hoofdstuk bevat achtergrondinformatie over kwelderdynamiek in het algemeen (dus niet specifiek voor de Waddenzee). In paragraaf 2.1 wordt een conceptueel model voor kwelders gepresenteerd. Paragraaf 2.2 beschrijft kwelderdynamiek en in paragraaf 3.3 worden menselijke ingrepen aan kwelderdynamiek beschreven. In hoofdstuk 3 wordt vervolgens verder ingezoomd op kwelders in de Waddenzee.

2.1 Conceptueel model kwelder

Kwelders (of schorren) zijn buitendijkse stukken land, begroeid met zout-tolerante vegetatie (Figuur 2-2). In Nederland liggen deze kwelders in de Waddenzee tegen de dijken aan de vastelandskust en aan de Waddenzeezijde van de Waddeneilanden. In de Zuidwestelijke delta vindt men schorren op tegen grote golven beschutte delen van (voormalige) zeearmen. Het kwelderoppervlak heeft een flauw aflopend profiel van de dijk richting de zee, met een helling van 1:200 (Westerschelde) tot 1:1000 (Waddenzee). De zeewaartse kwelderrand bevindt zich veelal net onder gemiddeld hoogwater (Balke et al., 2016), de locatie waar de eerste pioniervegetatie zich kan vestigen. De hoogteligging van de landzijde van de kwelder, tegen de dijk, is afhankelijk van het ontwikkelingsstadium van de kwelder. Een jonge (relatief korte) kwelder ligt rond gemiddeld hoogwater, terwijl een oudere kwelder enkele decimeters, tot soms zelfs bijna een meter boven gemiddeld hoogwater ligt (Figuur 2-3). Enkele voorbeelden van de hoogteligging en het profiel van kwelders in de Waddenzee zijn te vinden in (Figuur 2-1). De ontwikkeling van de kwelder gaat door verschillende successiestadia. Dit is te zien in de kwelderzones die zich opeenvolgend vormen en gedefinieerd worden op basis van voorkomende vegetatie. Dit gaat ruwweg van de pionierzone, naar lage en midden kwelder naar de climaxvegetatie op de hoge kwelder (Figuur 2-3).



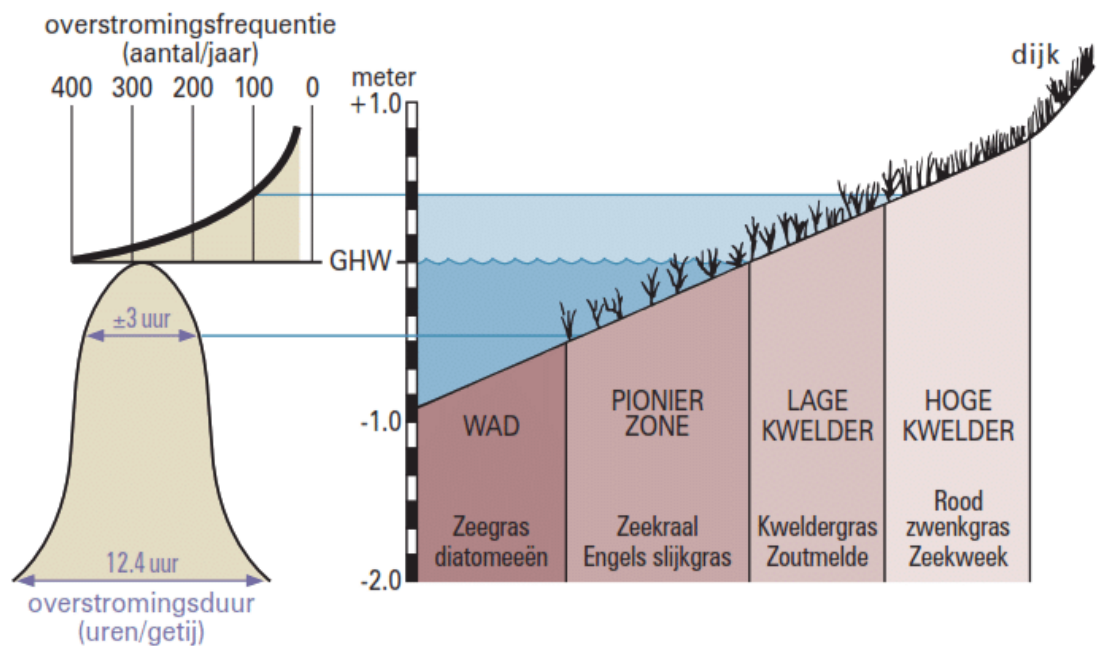
Figuur 2-1 Voorbeeld dwarsdoorsnedes van kwelders op basis van het Algemene Hoogtebestand Nederland (AHN4). De relatieve afstand [m] (x-as) is gemeten vanaf het begin van de aanliggende duin of dijk. De hoge waarden voor Terschelling worden veroorzaakt door een duingebied, waardoor deze dwarsdoorsnedes niet mooi op elkaar liggen.

De bodem van de kwelder bestaat uit klei, zandige klei of kleiig zand met daarbij organisch materiaal, dat over lange tijd is afgezet op de onderliggende zandlaag. De variatie van de korrelgrootteverdeling in verschillende kwelders loopt sterk uiteen en is afhankelijk van de locatie van de kwelder. In Nederland zijn er metingen beschikbaar die een mediane korrelgrootte (D_{50}) laten zien van enkele tientallen micrometers tot ruim honderd micrometer (Hu et al., 2021). Ook binnen een kwelder kan de korrelgrootteverdeling sterk variëren door bijvoorbeeld de lokale hoogteligging ten opzichte van het getij, afstand tot de zeewaartse kwelderrand en afstand tot een kreek of drainagesloot. Bijvoorbeeld, metingen in de Peazemerlanden (vastelandskwelder aan de Waddenzee kust bij Moddergat/Peassens) laten in één kavel aan de zeezijde een lutumgehalte ($< 2 \mu\text{m}$) zien van 19.7% en een zandgehalte van 37.0% (latitude: 53.406670°; longitude: 6.100850°) en in hetzelfde vak ongeveer 300 meter zeewaarts (latitude: 53.404550°; longitude: 6.097550°) een lutumgehalte van 45.3% met een zandgehalte van 1.3% (Willemsen et al., 2023). De korrelgrootteverdeling is ook van invloed op de erosieresistentie van de kwelder, een groter deel grovere korrels zorgt voor een minder cohesieve bodem die meer gevoelig is voor erosie (Houwing et al. 1999). Een hogere erosieresistentie zorgt voor meer (netto) opslibbing. Tegelijkertijd kan dit inhouden dat bij daadwerkelijke erosie zaden en jonge planten wegspoelen, wat voornamelijk voorkomt op de hoog dynamische pionierkwelder. Meer cohesief sediment (meer kleine korrels), zorgt juist voor een hogere erosieresistentie en zorgt daarnaast voor het vasthouden van bodemvocht, wat kan bijdragen aan het ontkiemen van zaden in de bodem (Crawford & Stone, 2014). Tenslotte, speelt de beschikbaarheid van nutriënten in de bodem een rol voor vegetatiegroei en successie (Van Wijnen & Bakker, 2001). Een meer kleiige bodem is vaak rijk aan nutriënten, in tegenstelling tot een meer zandige bodem. Een praktisch voorbeeld van de verschillen in bodemsamenstelling is te zien bij de proefkwelder Marconi. Hier zijn kweldervakken met eenzelfde grote aangelegd met een kleigehalte van 5%, 20% en 50%. Het vak met een kleigehalte van 5% (minder cohesief), laat een grotere bodemdynamiek en minder plantbiodiversiteit zien dan de andere vakken (De Vries et al., 2021). De variatie van de bodemsamenstelling tussen verschillende kwelders en ook binnen kwelders is dus groot en kan een belangrijke rol spelen in de vegetatiegroei en hoogteontwikkeling, waarbij over het algemeen hogere slibgehalten gepaard gaan met hogere opslibbing.





Figuur 2-2 Kwelders aan de vastelandskust van de Waddenzee: kwelder bij Westhoek (boven) en een foto van de kwelderwerken (onder). Foto's door P. Willemsen.



Figuur 2-3 Opbouw en zonering van de kwelder relatief aan overstromingsduur en frequentie (bron: Esselink et al., 2019).

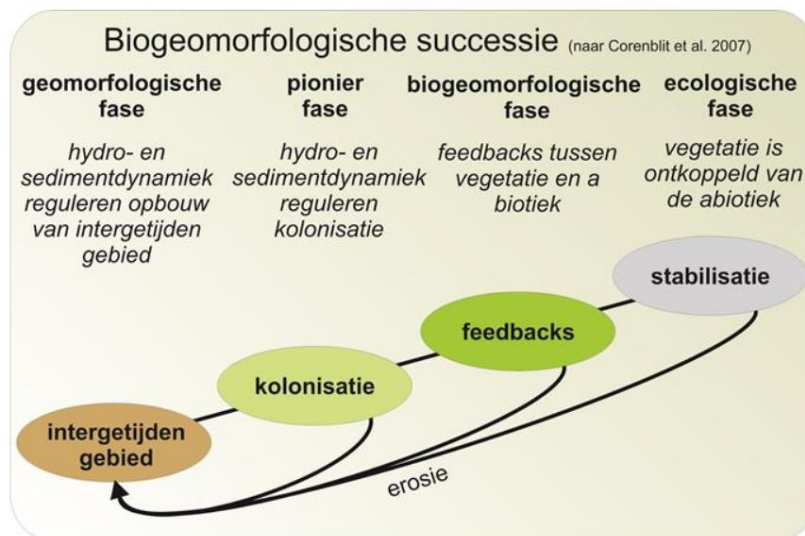
2.2 Kwelderdynamiek: een opeenvolging van aangroei en afslag

Vegetatie kan in een intergetijdengebied groeien, zodra er voldoende slib is ingevangen om de bodemhoogte geschikt te maken voor de vestiging van pioniervegetatie. Dit is over het algemeen enkele decimeters onder gemiddeld hoogwater (Figuur 2-3). De pioniervegetatie die vervolgens gaat groeien, zal meer sediment invangen, waarna de bodemhoogte verder groeit. De verticale groeisnelheid is in de orde van enkele millimeters tot centimeters per jaar. Met het groeien van de bodemhoogte neemt de inundatieduur en -frequentie af. Daardoor is het mogelijk voor andere vegetatiesoorten om zich te vestigen.

Dit alles geldt voor een natuurlijke kwelder en kan samengevat worden in biogeomorfologische successie, waarin (1) het intergetijdengebied wordt opgebouwd; (2) pioniervegetatie zich kan vestigen; (3) feedback plaatsvindt tussen vegetatie en abiotiek; en tenslotte (4) de vegetatie de dynamiek vrijwel volledig overneemt (Figuur 2-4). Deze successie is een opeenvolging van het onbegroeide intergetijdengebied, naar steeds hoger gelegen kwelderzones (Figuur 2-3). Ook het profiel van de voorliggende intergetijdenplaat is van belang. Natuurlijke, convexe (bolvormige) platen duiden meestal op opslibbing en

uitbreidende kwelders; concave (holvormige) platen op erosie (Van Wesenbeeck et al., 2014; Hanssen et al., 2023). De verschillende kwelderzones (en bijbehorende profiel) tijdens deze ontwikkeling worden beschreven in Van Wesenbeeck et al. (2014) (Figuur 2-5):

- T = 0: onder invloed van het getij wordt sediment aangevoerd en vormt zich een bol profiel. Bij een droogvalduur van minimaal 12 uur per dag, kan de eerste pioniervegetatie zich vestigen aan de randen van het wad.
- T = 1: onder invloed van de groeiende vegetatie (toenemende dichtheid), wordt er meer sediment ingevangen en wordt de vegetatie sturend in de hoogteontwikkeling.
- T = 2: de lagere delen die vaker onder water staan hebben een snellere sedimentatie snelheid dan de hogere delen, waardoor het hellende profiel langzaam afvlakt.
- T = 3: waar het water met sediment eerst via de zeewaartse kwelderrand wordt aangevoerd, krijgt de aanvoer via de kreken een steeds belangrijkere rol. Voor aanvoer zowel via de kwelderrand als de kreek geldt dat de stroomsnelheid drastisch afneemt, zodra de kwelderrand en kreekrand bereikt zijn. Dus veel sediment en met name de grovere korrels zullen in de nabijheid van de kwelderrand en kreek neerslaan. Dit resulteert in een afname van sedimentatiesnelheid en korrelgrootte verder van de kwelderrand en kreek, wat vervolgens in depressies midden op de kwelder leidt waar de kleibodem ook sneller inklinkt door consolidatie. Zo ontstaan oeverwallen en kwelderwallen met een kom met een secundaire pionierzone die lager ligt dan het zeewaartse deel van de kwelder.
- T = 4: naarmate de kwelderwal groeit in hoogte en de horizontale groei stagneert door een gebrek aan ruimte op het wad (en daarmee te hoge hydrodynamische energie), versteilt de kwelderrand zich en vormt zich een klif.
- T = 5: de gevormde klif beweegt zich langzaam landwaarts waardoor de golfenergie zeewaarts van de klif afneemt en er weer meer ruimte komt voor sedimentatie. Dit kan de start zijn van een secundaire kwelder.

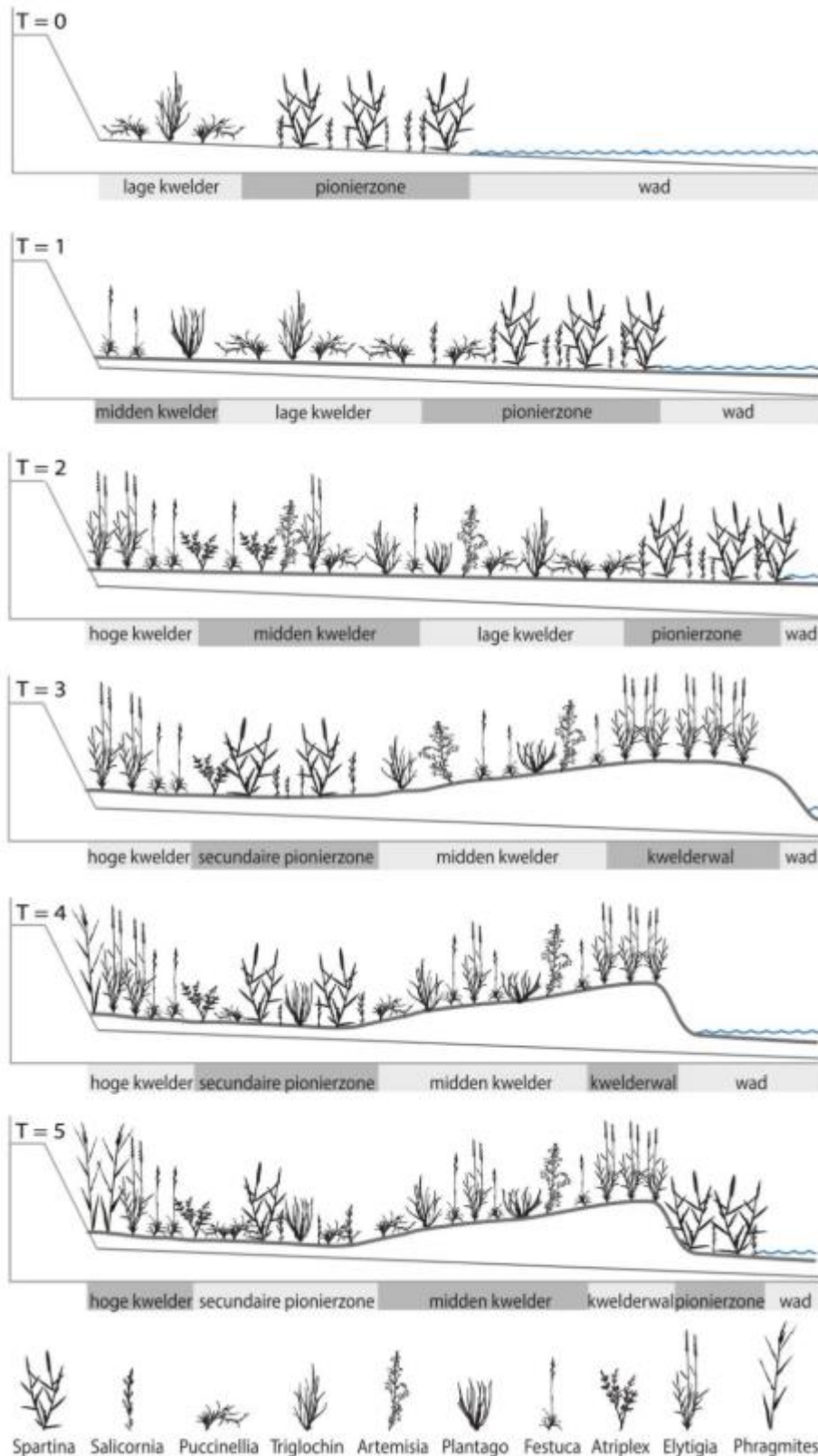


Figuur 2-4 Biogeomorfologische succesie van onbegroeid intergetijdengebied, naar hoge kwelder die alleen tijdens extreme stormen onder water staat. Uit Van Wesenbeeck et al. (2014), naar Corenblit et al. (2007).

De exacte locatie van de kwelderrand, de meest zeewaartse locatie waar vegetatie groeit, wordt bepaald door meer factoren dan alleen inundatieduur en -frequentie. De locatie van de kwelderrand is een functie van stress onder andere door inundatie, golven en sedimentatie/erosie (e.g. Hu et al., 2015; Poppema et al., 2019). De combinatie van deze factoren bepaalt of planten daar kunnen groeien (Bouma et al., 2016; Willemsen et al., 2018). De wadplaten aan de zeezijde van de kwelder spelen een belangrijke rol in de magnitude van de abiotische randvoorwaarden: een hoger gelegen plaat zorgt voor meer beschutting van de

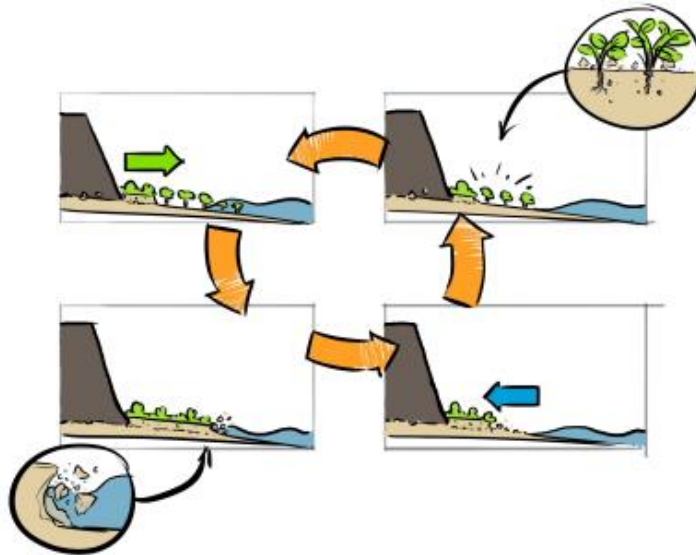
achterliggende kwelder, waardoor de kwelder zich mogelijk zeewaarts kan ontwikkelen en vice versa; de voorliggende wadplaat dient als kraamkamer voor kwelderuitbreiding indien voldoende sediment wordt ingevangen op de plaat en daarmee sediment doorgeeft richting de landwaarts gelegen plaatgebieden die vervolgens bij een ideale hoogteligging geschikt raken voor ontwikkeling van pioniervegetatie (e.g. De Vet et al., 2020; Willemsen et al., 2020). In een dynamisch systeem is het geen gegeven dat de kwelderrand vastligt. Natuurlijke dynamiek kan in veel gevallen cyclisch zijn met fases van aangroei en afslag (Figuur 2-5). Deze cycliciteit kan er als volgt uit zien:

1. Aangroei van de kwelder door sediment invang en vegetatiegroei, waardoor de bodemhoogte stijgt en de kwelder zeewaarts groeit. Meer in detail ontstaat door sedimentinvang en vervolgens bodemhoogteontwikkeling een grotere kans op een rustige periode, waardoor vegetatie zich kan vestigen en vervolgens kan groeien (een zogenaamde Window of Opportunity; Hu et al., 2015)
2. Initiatie van een klif: door verschillen in biofysische kenmerken tussen de begroeide kwelder en het onbegroeide intergetijdengebied. Door versnelde sedimentinvang van de begroeide kwelder groeit de kwelder boven de wadplaat uit. De hydrodynamische energie op de voorliggende wadplaat is te groot en er is een verschil in erodeerbaarheid tussen de onbegroeide meer zandige wadplaat en de begroeide meer kleiige kwelder. De hydrodynamische energie en het verschil in erodeerbaarheid en daarmee bodemdynamiek neemt langzaam toe wanneer de kwelder zeewaarts groeit, en zorgt voor de vorming van een klif (Bouma et al., 2016).
3. Terugtrekking van de klif, zodra de kwelder te hoog wordt en de verticale groei van de voorliggende wadplaat stopt en de klif met name door veelvoorkomende dagelijkse golven die bij gemiddeld hoogwater steeds tegen de kwelderrand (de klif) slaan (Van der Wal et al., 2023). De kwelderrand kan daarbij door overslag van sediment nog steeds in hoogte doorgroeien.
4. Vestiging van pionier vegetatie zeewaarts van de klif, doordat de klif dusdanig terugtrekt dat de hydrodynamische energie lokaal ook vermindert. Dit kan resulteren in een secundaire kwelder, die na verloop van tijd ook weer kan gaan eroderen.



Figuur 2-5 Ontwikkelingsstadia van de vastelandskwelders uit Van Wesenbeeck et al. (2014) met $T = 0$: een bol (convex) profiel met eerste vegetatievestiging, $T = 1$: ontwikkelde kwelder met vrijwel alle zones aanwezig, $T = 2$: volledig ontwikkelde kwelder met een vrijwel horizontaal profiel, $T = 3$: vorming van kom en oeverwal met een secundaire pionierzone, $T = 4$: kliferosie bij de oeverwal en een brakke zone, $T = 5$: sedimentatie voor de klif en secundaire kweldervorming.

In de afgelopen 30 jaar lijkt deze cycliciteit niet aan de orde te zijn in de Nederlandse Waddenzee, vermoedelijk door verstoringen van de natuurlijke dynamiek. Indien de cycliciteit stopt, bijvoorbeeld doordat golf energie stijgt, sedimentbeschikbaarheid afneemt of beschermende maatregelen niet onderhouden worden, kan de kwelder blijven steken in een terugtrekkende fase. Anderzijds kan de kwelderrand beschermd worden door stress te verlagen. Dit kan door middel van interventies als beschermende dammen die golfenergie dempen (stress door golven omlaag) en sediment invang stimuleren (stress door inundatie omlaag) (e.g. Siegersma et al., 2023), waarna pioniervegetatie zich weer kan vestigen. De terugtrekkende fase, alsook de groei van pioniervegetatie aan de zeewaartse zijde van de kwelderrand in het veld is te zien in Figuur 2-7.



Figuur 2-6 Cyclische opeenvolging van sedimentatie, erosie en feedback met vegetatie groei in kwelders: zeewaartse groei, door vegetatie vestiging en sediment invang (linksboven), initiatie van een klif door te grote hydrodynamische energie (linksonder), terugtrekking van de klif (rechtsonder), nieuwe vestiging van vegetatie zeewaarts van de klif (rechtsboven) (Willemsen, 2021).

Op een grotere systeemschaal, kan de migratie van diepere geulen in het estuarium of zee van invloed zijn op de ontwikkeling van de kwelder. Door migratie van een geul richting de kust, kan de vooroever onder water versteilen, waardoor de plaat en kwelder mogelijk kleiner worden en vice versa (Ladd et al., 2021). Ook dit kan plaatsvinden in een cyclus binnen tijdschalen van decades.



Figuur 2-7 Klif aan zeezijde van de kwelder in de Westerschelde in de pionierzone (linksboven) en in de hoge kwelder met pioniervegetatie zeewaarts (rechtsboven) en in de Waddenzee op de hoge kwelder bij Wierum (linksonder) en de lage kwelder met verschillende vegetatiesoorten (rechtsonder). Foto's door P. Willemsen.

3 Kwelders in de Nederlandse Waddenzee

3.1 Grootschalige morfologische ontwikkeling Waddenzee

Om de ontstaansgeschiedenis van de kwelders in de Nederlandse Waddenzee te begrijpen is het belangrijk om ook een grote ruimtelijke schaal in ogenschouw te nemen, vanwege de koppeling tussen tijd- en ruimteschalen (De Vriend, 1991). De grootschalige ontwikkeling van de Waddenzee wordt bepaald door een combinatie van natuurlijke dynamiek (o.a. getijdewerking, golven, sediment transport, zoet-zoutovergangen, historische zeespiegelstijging) en menselijke ingrepen.

3.1.1 Ontstaansgeschiedenis kwelders

De geschiedenis van de Waddenzee, zoals beschreven door Vos & Knol (2015) vertelt ons veel over het ontstaan van de kwelders. De basis is namelijk gevormd door een dikke laag zand die gevormd is in de ijstijden (tot ca. 20.000 jaar v. Chr.). Door snelle zeespiegelstijging na de laatste ijstijd werd hierop een dikke laag zand en slib afgezet in het intergetijdengebied, met hoge zandduinen aan zee (waar de Waddeneilanden zich later gevormd hebben). Door voortzetting van de zeespiegelstijging werd de grondwaterstand hoger en begon zich veen te ontwikkelen.

Ongeveer 500 jaar geleden bevatte de historische, op natuurlijke wijze ontstane Waddenzee uitgestrekte intergetijdengebieden en ook supragetijdengebieden (waar de hoge kwelders onder vallen), zowel langs de vastelandskust alsook op de Waddeneilanden. Door getijstroming werd sediment landwaarts getransporteerd, waardoor vooral fijn sediment (slib) werd afgezet op deze kwelders. Zo werden op natuurlijke wijze geleidelijke overgangsgebieden gevormd tussen land en water (Vos & Knol, 2015).

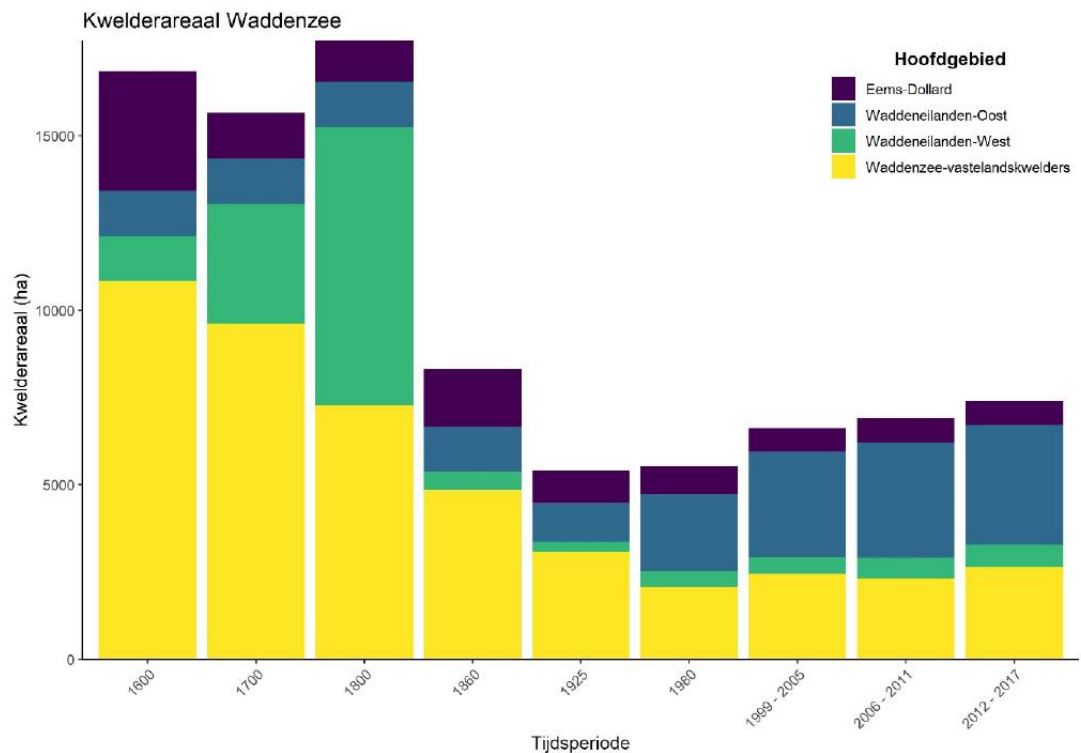
Sinds het eind van de Middeleeuwen hebben menselijke ingrepen de ontwikkeling van de Waddenzee sterk beïnvloed, zoals beschreven door Dijkema et al. (2000). Vanaf de 14^e eeuw werden de eerste landaanwinningen gerealiseerd door de kloosters in Friesland en Groningen, gericht op het herstel van inhammen in de kust (Middelzee, Lauwers, Fivelboezem). Na 1580 begonnen ook de boeren met bedijkingen om hun landeigendom uit te breiden. De kustpolders in Groningen en in Het Bildt (noordwest Friesland) waren vrijwel uitsluitend in gebruik voor akkerbouw, waardoor zeeverende dijken noodzakelijk waren. Een groot deel van de Friese noordkust bestond uit graslanden met een zomerkade om de kwelder, wat alleen in het weideseizoen voldoende bescherming opleverde. Door de aanwezigheid van deze brede strook zomerpolders is de overgang van wad naar zeedijk in Friesland veel uitgestrekter dan in Groningen. Om kwelderaanwas te stimuleren zijn de kustboeren vanaf de 17^e eeuw greppels gaan graven (de “boerenmethode”). Daardoor ontstonden buitendijkse gebieden met een kunstmatig afwateringssysteem. Later werd uit Duitsland een methode overgenomen, waarbij rijshoutendammen gebruikt werden om bezinkvelden te creëren (de “Sleeswijk-Holstein-methode”). Tot het eind van de 19^e eeuw hebben deze bedijkingen en inpolderingen langs de vastelandskust gezorgd voor het vastleggen van de randen van het getijdensysteem (Van der Spek, 1995).

Ook op de eilandkwelders hebben menselijke ingrepen een belangrijke invloed gehad. In de 18^e eeuw groeiden de eilandkwelders aanzienlijk in de beschutting van aangelegde stuifdijken (Koegras in 1610 en Eierland in 1629) tot een oppervlakte van 88,5 km². De volledige bedijkingen van beide locaties zorgden juist voor een sterke afname van kwelders in de westelijke Waddenzee in de 19^e eeuw.

Door de historische ontwikkeling (bedijking tot op de buitenrand van voormalige kwelders) waren er nauwelijks kwelders overgebleven langs de westelijke Waddenzee.

In de 20^{ste} eeuw kwamen daar de afsluitingen van de Zuiderzee (Elias & Van der Spek, 2006) en Lauwerszee (Oost, 1995) bovenop, waardoor de huidige begrenzing van de Waddenzee is gevormd. Door de combinatie van de bedijkingen en afsluitingen zijn de historische sedimentatiegebieden (afzetgebieden) veel kleiner geworden en zijn geleidelijke overgangen verdwenen. Dit heeft grote gevolgen voor de ontwikkeling en dynamiek van het ecosysteem, waaronder een verschuiving van sedimentafzettingen van intergetijden- naar subgetijdengebieden (denk aan overgangen tussen platen en geulen, wantien of ondiepe staartgeulen) en een toename van slibsedimentatie rond Harlingen-Koehoal, rondom Holwerd en bij het wantien van Schiermonnikoog.

Samenvattend hebben natuurlijke kweldervorming, de aanleg van kwelderwerken voor landaanwinning en de bedijkingen de locaties en ontwikkeling van de kwelders in de Nederlandse Waddenzee bepaald. Het kwelderareaal in de Waddenzee is sinds het begin van de 19^e eeuw sterk afgenomen van meer dan 15.000 ha tot ruwweg 5.000 ha in 1980 (Figuur 3-1). Met name de vastelandskwelders en de kwelders op de westelijke Waddeneilanden zijn sterk afgenomen door bedijkingen en erosiebeschermingsmaatregelen. Sinds 1980 is het areaal weer langzaam toegenomen tot ongeveer 10.000 ha in de jaren 2015-2020 (Jentink, 2023), als gevolg van herstel van grootschalige ingrepen en natuurlijke sedimentdynamiek (zie secties 3.3 en 0).



Figuur 3-1 Ontwikkeling van kwelderareaal in de Waddenzee sinds begin 19e eeuw. Afkomstig uit Elschoot et al. (2020) met brondata van Dijkema et al. (1987) voor periode 1600-1980 en sindsdien VEGWAD-karteringen. Hierin is het meest recente cijfer van 10.000 ha voor 2015-2020 uit Jentink (2023) nog niet meegenomen.

3.1.2 Ruimtelijke en temporele sedimentbeschikbaarheid

De bedijkingsgeschiedenis geeft meer inzicht in de ontwikkeling van de kwelders langs de vastelandskust in Friesland en Groningen en de samenhang met sedimentbeschikbaarheid.

Vóór de mechanisatie van de dijkenbouw (rond het begin van de 20^{ste} eeuw) kon bedijking alleen plaatsvinden als de kwelders voldoende hoog waren opgeslibd. Een kaart van historische bedijkingen (Figuur 3-2) vertelt ons daardoor veel over de historische opslibbing, al speelden ook maatschappelijke factoren (zoals economische ontwikkelingen, recht rond landaanwinningen en periodes van maatschappelijke onrust) een rol bij de bedijking. Cleveringa et al. (2018) concluderen: “Uit de kaart [...] volgt dat grote oppervlaktes land zijn bedijkt over een lange periode en dat de huidige Waddenzeedijk al relatief oud is. De zomerpolders in [Noord-Friesland Buitendijks] dateren uit 1897, 1892 en 1921, en hebben [door enkel uitzonderlijke overstromingen] waarschijnlijk slechts een beperkte bijdrage geleverd aan de sedimentatie die in de 20^{ste} eeuw heeft plaatsgevonden in het gebied.”.



Figuur 3-2 Overzichtskaat van de bedijkings- en landaanwinningsgeschiedenis van de voormalige Middellzee, in het verlengde van het kombergingsgebied van het Borndiep (Van der Spek, 1995) geprojecteerd op een satellietbeeld in Google Earth door Cleveringa et al. (2018).

In de loop van de tijd hebben veel veranderingen plaatsgevonden in het kwelderbeheer (zie voor een uitgebreide beschrijving Cleveringa et al. (2018)). Waar de rijshoutendammen met tussenliggende greppels en geulen in eerste instantie gericht waren op landaanwinning, werden deze later ingezet als overstromingsbescherming en vervolgens ook op het behoud

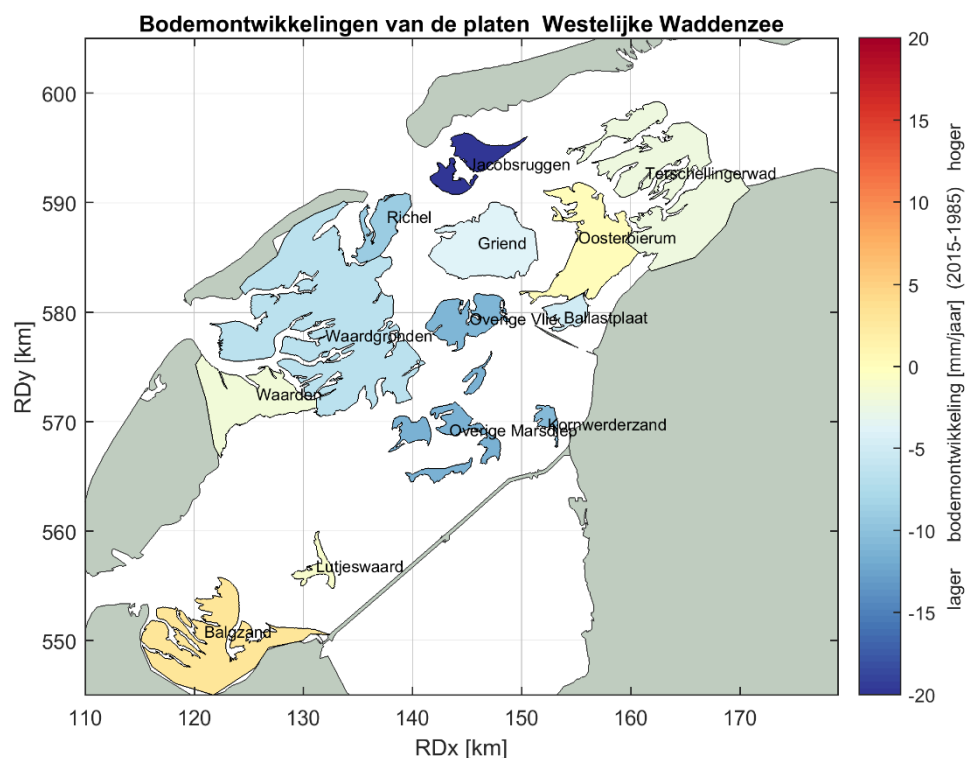
van natuurwaarden. De aanwezigheid van kwelderwerken domineert in hoge mate waar in de huidige situatie slibsedimentatie plaatsvindt. Structurele historische gegevens van opslibbing van de kweldergebieden gaan echter niet verder terug dan 1960.

Om een eerste indruk te krijgen van de hoeveelheid sediment die hedendaags beschikbaar is voor sedimentatie en potentieel herstel van kwelders, kan worden bekeken welk aandeel sedimentatie op de kwelders vormt van de totale sedimentatie in de Waddenzee. Colina Alonso et al. (2023) komen uit op een aandeel van sedimentatie op de kwelders van ongeveer 15% ten opzichte van de totale sedimentatiegebieden in de Waddenzee. Cleveringa et al. (2018) geven een bandbreedte tussen 7 en 26%. In theorie is er dus nog meer sediment beschikbaar voor sedimentatie op kwelders, dat nu elders bezinkt of uit het systeem wordt gehaald. Dit biedt mogelijkheden voor kwelderherstel, wat dan wel ten koste zou gaan van sedimentatie in subtidale delen.

De sedimentbeschikbaarheid varieert ook tussen de kombergingsgebieden in de Waddenzee. In de westelijke Waddenzee importeert nog steeds sediment als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee (Lodder et al., 2019). In de oostelijke Waddenzee is de invloed van de afsluiting van de Lauwerszee al vrijwel uitgewerkt en vindt nog slechts beperkte (netto) sedimentimport plaats. Dit verschil komt vooral door het verschil in omvang van deze afsluitingen, waardoor de oostelijke Waddenzee op dit moment dichter bij morfologisch evenwicht is (Van Maren et al., 2023).

Colina Alonso et al. (2023) hebben een sedimentbudget berekend per kombergingsgebied voor de trilaterale Waddenzee. Hierbij gaat het dus om sedimentatie in het gehele kombergingsgebied (inclusief geulen en platen), niet alleen op de kwelders. Uit de analyse blijkt dat de sedimentatie in het Vlie het grootst is (omgerekend 0,5 miljoen m³ per jaar), het Marsdiep, Borndiep en Zoutkamperlaag hebben een wat lagere sedimentatie (omgerekend 0,3 miljoen m³ per jaar) en het Eierlandse Gat, Pinkegat en Lauwers vullen nauwelijks op (of verruimen zelfs).

Voor de westelijke Waddenzee is door Smits & Nederhoff (2018) een analyse gemaakt van de sedimentatiesnelheden tussen 1991 en 2015 op basis van de Vaklodingen dataset, aangevuld met Lidar op het supragetijdeareaal. Daaruit blijkt dat met name de plaatgebieden langs de vastelandskust (het Balgzand, de Ballastplaat en de Vlakte van Oosterbierum) snel sedimenteren met sedimentatiesnelheden tussen 0,2 en 3 mm/jaar (zie Figuur 3-3). De plaatgebieden bij de eilanden sedimenteren minder snel of eroderen zelfs. Dit valt te verklaren door verschillen in de oriëntatie en sedimentatieprocessen tussen de vastelandskwelders en de eilandkwelders. Door getijdewerking en golfwerking wordt sediment landwaarts getransporteerd. Met name tijdens stormcondities vindt sedimentatie op de kwelders plaats, waarbij de wind vaak uit het noorden of noordwesten komt. Bij die windrichtingen vindt vooral zuidwaarts sedimenttransport plaats, dus richting de blootgestelde vastelandskwelders en minder naar de beschutte eilandkwelders. Dat betekent in grote lijnen dat er voor de vastelandskwelders meer sediment beschikbaar is voor herstel na een afgraving dan voor de eilandkwelders.



Figuur 3-3 Ruimtelijk overzicht natuurlijke hoogteontwikkeling van de platen in de Westelijke Waddenzee voor de periode 1991-2015, afkomstig uit Smits & Nederhoff (2018).

Op dit moment groeit de Waddenzee nog sneller dan zeespiegelstijging (Lodder et al., 2019). Op de lange termijn zal versnelde zeespiegelstijging in toenemende mate een belemmering vormen voor de sedimentvraag in de Waddenzee (bij gelijkblijvend sedimentaanbod). Op basis van berekeningen met het semi-empirische ASMITA model wordt ingeschat dat het omslagpunt waarbij niet langer voldoende sediment beschikbaar is om mee te groeien met versnelde zeespiegelstijging in de westelijke Waddenzee eerder zal worden bereikt dan in de oostelijke Waddenzee (Lodder et al., 2022). Volgens Huismans et al. (2022) zal dit naar verwachting ten koste gaan van het areaal aan intergetijdengebieden in de grotere getijddebekkens en van de hoogte van intergetijdengebieden in de kleinere getijddebekkens. Met name nabij de vastelandskwelders worden op een termijn van 100 tot 200 jaar verliezen geanticipeerd. Dit zal echter pas voor de zeer lange termijn een rol gaan spelen. Voor de komende decennia heeft zeespiegelstijging nog geen grote invloed op de sedimentatie op de kwelders.

3.2 Overzicht huidige kwelders

In de Waddenzee zijn ongeveer 4.200 ha vastelandskwelders aanwezig aan de Waddenzee kust aan de noordzijde van de provincies Noord-Holland, Friesland en Groningen. Daarnaast zijn ongeveer 4.000 ha eilandkwelders te vinden met name op de eilandstaarten van de Waddeneilanden en ruwweg 800 ha kwelders in het estuarium en de kustzone van de Eems-Dollard (Jentink, 2023). De kwelders in het Eems-Dollard estuarium niet meegenomen in deze studie, omdat deze onderdeel zijn van een wezenlijk ander systeem met andere dynamiek. De aanwezige kwelders in de Waddenzee zijn over het algemeen ruimtelijk ingekaderd met geografische grenzen, de meer aaneengesloten kwelders worden in literatuur en rapporten verdeeld in subsystemen om de dynamiek in meer detail te kunnen beschrijven. Dit geldt met name voor de kwelderwerken aan de vastelandskust van Friesland en Groningen die verdeeld zijn in meetvakken.

3.2.1 Vastelandskwelders

Langs de Waddenzeekust van Noord-Holland, Friesland en Groningen bevinden zich de zogenaamde 'vastelandskwelders', zie Figuur 3-4. De vastelandskwelders worden hier van west naar oost beschreven:

- Balgzand (niet opgenomen in de figuur)
- Westhoek
- Zwarte Haan (kwelder ten westen van het Miedema gemaal)
- Noord Friesland Buitendijks
- 't Schoor
- Wierum
- Peazemerlannen
- Groninger kwelders
- Kwelders Eems-Dollard estuarium

Langs de rand van het Balgzand bevindt zich een smal kweldergebied langs de gehele kust tussen Den Helder en Den Oever. Deze kwelders zijn gevormd na afsluiting van de Zuiderzee. Als gevolg van sterke aanzanding en de vorming van wadplaten, konden zones met voornamelijk lage kweldervegetatie zich ontwikkelen tot zones met voornamelijk midden kweldervegetatie en hier en daar zelfs hoge kweldervegetatie. In de jaren 1990 vond er verdere sterke aanzanding plaats (Van Marion, 1999; Smits & Nederhoff, 2018). In 2010 en 2011 is tijdens de dijkversterking van de Balgzanddijk tussen Oostoeversluis en de knik in de dijk nabij De Kooi ook maatregelen genomen om twee kwelders (Kooijhoekschor en Van Ewijcksluisschor) te beschermen¹. De maatregelen bestaan uit een kleidam van ongeveer 15 meter breed in combinatie met rijshoutendammen om erosie van de kleidam te voorkomen. Verder oostwaarts bevinden zich kwelders bij Normerven en in de oksel van de dijk bij de haven van Den Oever.

Westhoek en Zwarte Haan bevinden zich in een afgeschermd gebied gevormd door de bocht in de zeedijk. Deze kwelders zijn natuurlijk ontstaan sinds 1992. De kwelder Westhoek groeit aan, terwijl de kwelder bij Zwarte Haan vrij stabiel is (Jentink, 2018; Baptist et al., 2019; eigen analyse op basis van satellietbeelden). Elschot et al. (2020) geven ook een overzicht van de ontwikkeling van verschillende kwelderdelen (pre-pionier, pionier en kwelder). Een samenvatting van literatuur, eigen analyse uit satellietbeelden, ervaringen uit het veld en expert knowledge is terug te vinden in Tabel 3-1.

Ten oosten van Zwarte Haan bevindt zich het grote kweldergebied Noord Friesland Buitendijks, dat zich uitstrekt in de kom van de dijk tot Holwerd. Dit gebied is gevormd door historische landaanwinning met kwelderwerken en greppels. Het westelijke deel (Bildtpollen; meetvakken 001-062) is vrij stabiel, het midden (Noorderleeg; Blije en Ferwerd Buitendijks; Holwerd Buitendijks West; meetvakken 063-186) breidt uit en het oostelijke deel (Holwerd Buitendijks Oost; meetvakken 187-249) is variabel (licht uitbreidend) (Elschot et al., 2020).

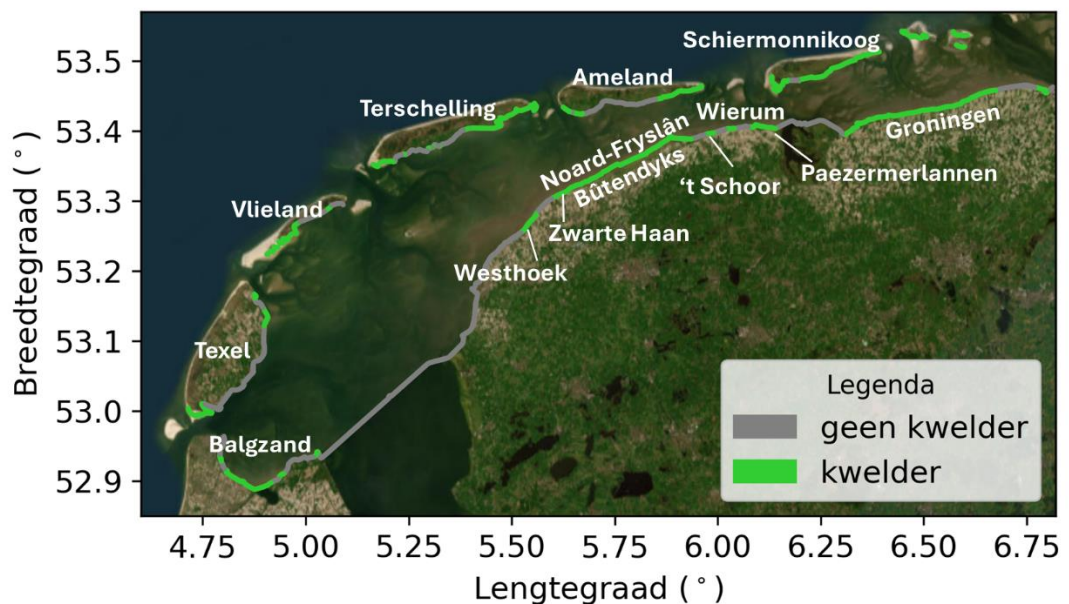
Verder oostwaarts bevinden zich de kwelder 't Schoor en Wierum. 't Schoor is beschermd door de Slaperdijk, een kleine zomerdijk, en een dam die haaks op de kust staat en bescherming biedt aan de kwelder. 't Schoor is vrij stabiel, alhoewel wat kleine uitbreiding wordt waargenomen en wat terugtrekking aan de oostzijde, waardoor een klif gevormd wordt (Jentink, 2018; eigen analyse op basis van satellietbeelden). Ook de kwelder ten oosten van Wierum is gelegen voor een zomerdijk met een dam haaks op de dijk, al wordt deze dam sinds de jaren 1970 niet langer onderhouden. In de zomer van 2024 zijn hier rijshoutendammen geplaatst ter bescherming van de kwelder tegen verdere afslag. Dit leidt tot een terugtrekkende kwelders met een klifrand (Jentink, 2018; Google Earth). De meest oostelijk gelegen kwelder in Friesland is Peazemerlannen, een relatief grote kwelder

¹ Zie Flyer 'Dijkversterking en kwelderherstel hand in hand' van de WUR: <https://edepot.wur.nl/211860>

beschermd door een pier, zomerdijk en kwelderwerken. Het gedeelte vóór de zomerdijk aan de oostzijde breidt uit (Jentink, 2018; eigen analyse op basis van satellietbeelden).

Ook langs de Groningse kust bevinden zich 'vastelandskwelders', vergelijkbaar met de kwelders langs de Friese kust. Dit kweldergebied kan worden opgedeeld in drie gedeelten: west (Westpolder; Julianapolder; Negenboerenpolder; meetvakken 251-331), midden (Negenboerenpolder; Linthorst Homanpolder; meetvakken 332-401) en oost (Noordpolder; Lauwerspolder; meetvakken 402-516). Historisch gezien werd de kwelderontwikkeling aan de Groningse Waddenkust ondersteund door kwelderwerken en sloten. Een enkele pier is gelegen aan de oostzijde van Lutjewad. Algemeen breiden deze kwelders licht uit (Elschot et al., 2020), vermoedelijk door aangroei van wadplaten en aanslibbing ten gevolge van de afsluiting van de Lauwerszee.

Ook in het Eems-Dollard estuarium bevinden zich kwelders. Deze zijn niet meegenomen in het huidige overzicht, omdat het Eems-Dollard estuarium een wezenlijk ander systeem betreft met andere dynamiek.



Figuur 3-4 Overzicht van vastelandskwelders in de Nederlandse Waddenzee. De meest oostelijk gelegen kwelder in het bovenste paneel is Peazemerlannen (naam weggevalen in figuur).

Tabel 3-1 Overzicht van vastelandskwelders in de Waddenzee, hun ontwikkeling en ondersteunde landschapselementen.

Kwelder	10-jarige ontwikkeling	Ondersteunende elementen				
		Sloten	Krib	Pier	Rijshouten-dammen	Zomer-dijk
Balgzand - Kooijhoekschor en Van Ewijcksluisschor	Vrij stabiel	-	Deels	-	Deels	Deels
Balgzand - Normerven	Vrij stabiel	-	Ja	-	-	-
Balgzand - Den Oever	Vrij stabiel	-	Ja	-	-	-
Westhoek	Uitbreiding	-	Ja	-	-	-
Zwarte Haan	Stabiel	-	-	-	-	-
Noard-Fryslân Bûtendyks West	Stabiel	Ja	-	-	Ja	Ja
Noard-Fryslân Bûtendyks Mid	Uitbreiding	Ja	-	-	Ja	Ja
Noard-Fryslân Bûtendyks East	Variabel/stabiel	Ja	-	Ja	Ja	Ja
't Schoor	Stabiel/kleine uitbreiding; terugtrekking in oostelijk deel leidend tot klifvorming	Ja	-	Ja	-	Ja
Wierum	terugtrekking leidend tot klifvorming	Ja	-	Ja	-	Ja
Peazemerlannen	Stabiel/Uitbreiding in oostelijk deel	Ja	-	Ja	-	Ja
Groningen West	Uitbreiding	Ja	-		Ja	-
Groningen Midden	Uitbreiding	Ja	-		Ja	-
Groningen Oost	Uitbreiding	Ja	-	Ja	Ja	-

3.2.2 Eilandkwelders

Aan de waddenzeekust van de Waddeneilanden bevinden zich eilandkwelders. Qua dynamiek en historie verschillen deze van de vastelandskwelders, vooral doordat de eilandkwelders door andersoortige menselijke ingrepen zijn beïnvloed (vastlegging van duinen en stuifdijken) en daardoor een natuurlijker verloop kennen. Daarnaast zorgt de ligging nabij de zeegaten ervoor dat de eilandkwelders veel zandiger zijn dan de vastelandskwelders, waardoor slib pas wordt afgezet als de kwelder zich reeds heeft ontwikkeld. De meeste kwelders zijn gevormd op een hoge zandplaat met een gradiënt in hoogte vanaf het wad naar hoger gelegen geïsoleerde duintjes. In tegenstelling tot vastelandskwelders is deze gradiënt geen afspiegeling van de successie, maar al op de onderliggende zandplaat aanwezig (Elschot et al., 2017). Er bestaat ook een verschil tussen eilandkwelders die nog grotendeels natuurlijk zijn (zoals de Vliehors en de Noordsvaarder) en eilandkwelders die inmiddels aan landzijde zijn vastgelegd door zeedijken (Boschplaat, kwelders Ameland-Oost, kwelder Schiermonnikoog).

Voor de kwelders die zijn vastgelegd door zeedijken wordt er onderzocht of het mogelijk is om de kwelders te herdynamiseren vanuit de zeereep.

Naamgeving van de eilandkwelders van west naar oost is als volgt:

- Texel: de Hors, Mokbaai, Schorren en de Volharding;
- Vlieland: Vliehors en kleine kwelders langs de eilandkust van Vlieland;
- Terschelling: Noordsvaarder, Dellewal, kwelders langs de eilandkust van Oost-Terschelling (o.a. Striep) en de Boschplaat;
- Ameland: Feugelpolle, Neerlands Reid en De Hon;
- Schiermonnikoog: Rif, oosterkwelder een Schiermonnikoog-oost;
- Rottumerplaat;
- Rottumeroog; en
- Zuiderduin.

Tot 1830 had Texel een reusachtige kwelder, het Buitenveld. Die is in het verloop van de 19^e eeuw in drie fasen ingepolderd. Die bedijkingen staan nu bekend als de Eierlandse polder, de Eendracht en het Noorden. Aan de oostkant van Texel, achter de dijk van polder De Eendracht, is een klein restant van dit kweldergebied overgebleven, namelijk de Schorren. Dit is een kweldergebied met veel krekens. Aan de zuidkant van Texel liggen kwelders bij De Hors en de Mokbaai. De Hors bestaat uit een strandvlakte en loopt over in kwelder en (jonge) duinen. In de Mokbaai ligt een kwelder ingeklemd tussen de wadplaat en de dijkkring.

De Vliehors bevindt zich aan de westzijde van Vlieland en bestaat uit een strandvlakte, (jonge) duinen, kwelder en zomerpolders. Daarnaast liggen er een aantal kleinere kwelders langs de zuidelijke eilandkust.

Voorop het westelijke deel van Terschelling, bij de Noordsvaarder, vindt nog uitbreiding van kwelderareaal plaats (Elschot et al., 2020). Daarnaast liggen er kwelders langs de zuidelijke eilandkust en vormt de Boschplaat een uitgestrekt kweldergebied aan de oostzijde van Terschelling.

Op Ameland is er ten zuiden van de dorpen Hollum en Ballum aan de Waddenzeekant de kwelder Feugelpolle. Sinds 2012 loopt er een pilot om deze kwelder na jarenlange erosie weer op een natuurlijke manier te laten groeien (Krap & Elzinga, 2014). De kwelder aan de oostzijde van Ameland bestaat uit twee verschillende delen: de oudere, beweede kwelder Neerlands Reid ten westen van het duincomplex Oerd, en de jongere, onbeweede De Hon ten oosten daarvan. Op deze kwelders vindt sinds de start van de gaswinning bodemdaling plaats (Ketelaar et al., 2011).

Op de eilandkwelder van Schiermonnikoog wordt begraasd om vergrassing tegen te gaan (Elschot et al., 2015). De kwelder van Schiermonnikoog is naar het oosten toe uitgebreid over een periode van 100 jaar, waardoor er een zonering van vegetatietypes zijn op basis van de leeftijd van de kwelder.

Tot slot bevinden zich ook volledig natuurlijke kwelders op Rottumerplaat, Rottumeroog en Zuiderduin.

3.3 Ingrepen aan kwelderdynamiek

Er bestaan verschillende redenen om in te grijpen op kwelders. De focus van ingrepen heeft in het verleden veelal gelegen op toename van areaal (kwantiteit), wat op sommige locaties ten koste is gegaan van de dynamiek (kwaliteit). De afgelopen tien jaar is de focus meer verschoven naar de kwaliteit van kwelders in termen van dynamiek en biodiversiteit.

De ingrepen kunnen uitgevoerd worden in een bestaand kweldersysteem of in onbegroeid getijdengebied om kweldergroei te stimuleren.

De belangrijkste ingreep die veel is toegepast in de Nederlandse Waddenzee is het gebruik van rijshoutendammen, die beschreven staan in paragrafen 3.3.2 en 3.1. In Bijlage A wordt een literatuuroverzicht gegeven van eerdere ingrepen aan kwelders met nadruk op technieken die gericht zijn op het aanpassen van de abiotische condities om kwelderdynamiek te herstellen middels biogeomorfologische successie.

3.3.1 Ingrepen in bestaande kwelders

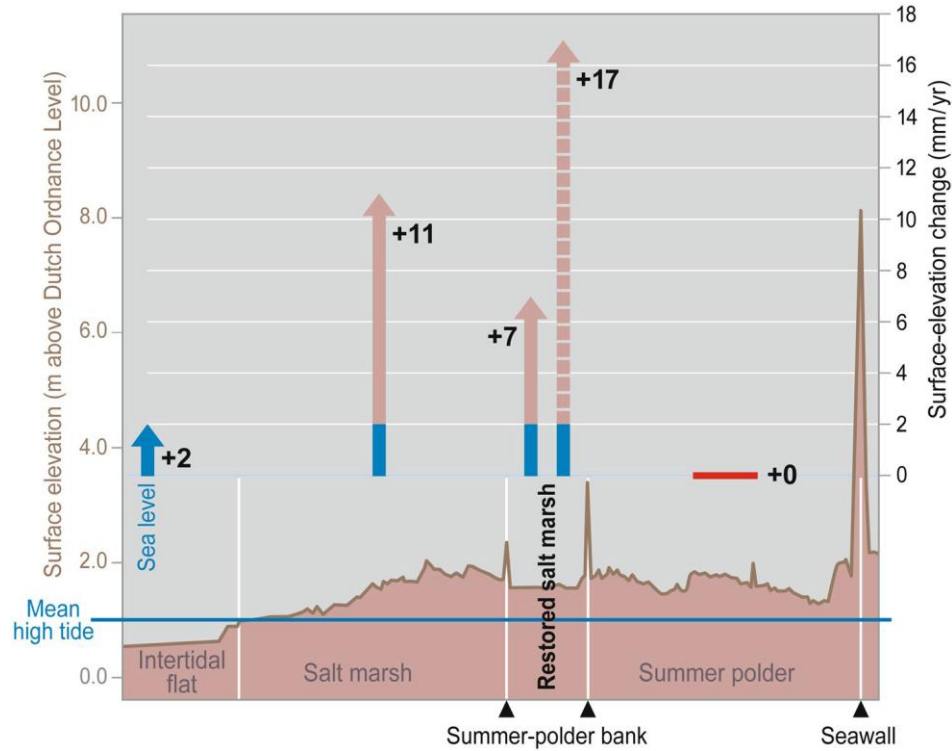
In bestaande kwelders worden ingrepen gedaan om kwelders op verschillende manieren te ondersteunen: gebruik van maatregelen om omgevingsstress te verlagen, zodat de kwelder kan floreren op een locatie waar dit zonder deze maatregelen niet het geval is (bijvoorbeeld strekdammen of rijshoutendammetjes); vergroten van de sedimentbeschikbaarheid om verticale of laterale groei te stimuleren; maatregelen in de kwelder om vegetatiesoorten en bedekking te beheren (bijvoorbeeld grazen, het creëren van kreken of afgraven). Zowel in Nederland als het buitenland is kwelderdynamiek ondersteund middels het toepassen van deze maatregelen.

Van Wesenbeeck et al. (2014) beschrijft afgravingen in kwelders in Nederland en Duitsland ten behoeve van klei voor het verzwaren van dijken, zogenaamde kleiputten. Deze afgravingen zijn uitgevoerd op de midden en hoge kwelder tot een diepte van 50 tot 150 cm ten opzicht van de oorspronkelijke bodemligging. De kleiputten werden veelal vlak gemaakt met het voorliggende wad, echter blijkt uit onderzoek naar kleiputten in de Jadebusen (Duitsland), dat een zeewaartse bescherming van de kleiput van belang is. In de Jadebusen was dit een hoge kwelderrand. Uit bevindingen uit Zeeland en Duitsland blijkt dat er een goede, open verbinding moet zijn met het watersysteem voor aan- en afvoer van water en sediment. Indien deze niet aanwezig is, blijft een poel bestaan. Tenslotte is het niet aan te bevelen om dammen aan de zijkant van de afgraving op te werpen of te behouden, aangezien dit tientallen jaren in het landschap zichtbaar blijft (Van Wesenbeeck et al., 2014).

In Zuidgors (Westerschelde) en Noard-Fryslân Bûtendyks (Nederlandse Waddenzee) is afgegraven om lokale aanwezigheid van vegetatiesoorten te stimuleren en kwelderverjonging in de praktijk te brengen. In de kwelder Zuidgors aan de noordelijke kust van de Westerschelde (ten westen van Ellewoutsdijk), is in de hoge kwelderzone afgegraven en een verbindingsgeul aangelegd met de Westerschelde. Metingen van bodemhoogte en stroomsnelheid worden uitgevoerd door Hogeschool Zeeland (nog niet gepubliceerd). De kreken in het afgegraven gebied sedimenteren, terwijl de verbindende kreken naar de Westerschelde juist verruimen (pers. comm. Van de Lageweg, 3 juli 2024). Lagere vegetatiesoorten komen nu voor in dit afgegraven gebied, echter is er weinig dynamiek door beperkte overstroming. Mogelijk zorgt de nabijheid van de hoge kwelderzone en beperkte aanvoer van zaden van lage kweldersoorten alsnog voor een groei van hoge kweldervegetatie.

In Noard-Fryslân Bûtendyks is proefverkweldering toegepast, door getij-uitwisseling in voormalige zomerpolders mogelijk te maken. Zo is 135 ha blootgesteld aan het getij in 2001 (Van Duin et al., 2007), middels 3 doorgravingen van de zomerkade en door aanbrengen van kunstmatig gegraven kreken. Na 4 jaar bleek er een toename van zout-tolerante planten. Ontwikkeling van het soortenarme zeekweek (*Elymus athericus*) is succesvol tegengegaan door beweiding toe te passen. Ontwikkeling van zilte kweldervegetatie is mogelijk gemaakt door de hoogteligging in het getijdenvenster, beschikbaarheid van sediment, aan- en afvoer van zout water, ontwatering en de aanvoer van doelsoorten (Van Duin et al., 2007). Na 10 jaar was het ontpolderde gebied opgehoogd met gemiddeld 7 mm/jaar, de referentiekwelder met gemiddeld 11 mm/jaar (zie Figuur 3-5). Volgens Koppenaar et al. (2022) zorgde begrazing van dit herstelde kweldergebied ervoor dat de opslibbing niet de volledige

achterstand in hoogteontwikkeling (20 cm) kon bijhalen; zonder begrazing had het ontpolderde gebied een ophoging van 17 mm/jaar gekend.



Figuur 3-5 Doorsnede van het voorland bij Noard-Fryslân Bûtendyks, vanaf de wadplaat tot de zeedijk ten tijde van de start van het experiment in 2001. Veranderingen van zeespiegel en bodemhoogte zijn hierop geprojecteerd voor de eerste 10 jaar na heropenen van de zomerpolder. Zowel de referentiekwelder als de herstelde kwelder werden begrazen door vee. Gebaseerd op uitsluitingsexperimenten geeft de geblokte pijl de ingeschatte bodemhoogteverandering zonder begrazing. Afkomstig uit Koppenaar et al. (2022).

In de zomer van 2021 is het project Terp van de Toekomst van start gegaan nabij Blije (ook Noard-Fryslân Bûtendyks). Een deel van de bestaande kwelder is afgegraven (zie Figuur 3-6) en staat nu regelmatig onder water. Uit de eerste meetresultaten van de bodemhoogte door Hoefsloot et al. (2024) blijkt dat er na één jaar gemiddeld enkele centimeters opslibbing plaatsvindt (in juni 2022 ten opzichte van T0). Dit komt overeen met de opslibbing in een naastliggende kwelder, waar een gemiddelde opslibbing van circa 14 cm plaatsvond (op basis van de SEB-metingen van WMR). In eerste instantie hogen vooral de randen van het afgegraven gebied op, vermoedelijk gedreven door hoog energetische (storm) of mid-energetische condities. Gradiënten vlakken over de tijd uit, wat door getijinvloed lijkt te worden aangedreven (eigen interpretatie).



Figuur 3-6 De Terp van de Toekomst. Aan de zeezijde van de terp is een bestaande kwelder afgegraven. Alleen aan weerszijden van de terp kunnen dieren grazen, sinds er in de zomer van 2023 een veeraster geplaatst is. Figuur afkomstig uit Hoefsloot et al. (2024).

In het Slibmotor project nabij Koehoal werd gepoogd sedimentbeschikbaarheid te vergroten door baggerslib uit de haven van Harlingen op strategische posities te dumpen, zodat de natuurlijk voorkomende waterbeweging dit naar de kust kan brengen (Baptist et al., 2019). Sedimenttransport nabij Koehoal bleek sterk windgedreven. Hier kan gebruik van gemaakt worden door het slib tijdelijk af te zetten op een locatie uit de kust, waarna de stroming dit op kan pikken en richting de kwelders aan de kust kan transporteren. Dit heeft veel potentie in gebieden met een lage sedimentbeschikbaarheid. Nabij Koehoal is er juist een sedimentoverschot geobserveerd en lijkt het permanent vastleggen van het slib juist de beperking voor kweldergroei, doordat de snelle sedimentatie de zaden kan begraven, waardoor pionier planten niet meer kunnen ontkiemen (Baptist et al., 2019).

Tot slot hebben er verschillende kwelderverjongingsprojecten plaatsgevonden in Duitsland, maar daarvan zijn voor zover ons bekend geen metingen beschikbaar. In de Leybucht zijn kwelders afgegraven tot de diepte van de gewenste vegetatietype, en dit lijkt uiterst succesvol (pers. comm. Jurre de Vries, oktober 2024; Rupprecht et al., 2023).

3.3.2 Ingrepen om kwelders te ontwikkelen

Veel kwelders zijn verdwenen door bedijkingen en inpolderingen (zie paragraaf 3.1.1), maar kwelders kunnen ook buitendijks verdwenen zijn door erosie of menselijke ingrepen. Kwelders kunnen ontwikkeld worden op locaties waar ze zich voorheen niet bevonden of het landgebruik/habitat veranderd is, nadat er kwelders aanwezig zijn geweest in het verleden. Deze casussen kunnen nuttige inzichten geven in kwelderdynamiek na ingrepen. Voor de volledigheid worden hieronder een aantal casussen beschreven met ingrepen die hebben geleid tot deels begroeid intergetijdengebied.

Kwelders bevinden zich over het algemeen op plaatsen waar slib kan sedimenteren (zie sectie 2.2), doordat er voldoende luwte is. In het verleden is deze luwte ook gecreëerd, bijvoorbeeld door kwelderwerken bij Noord-Friesland Buitendijks en Wierum.

Rijshoutendammen stimuleren slibinvang, waardoor sedimentatie wordt versneld, zodat vegetatie zich kan vestigen. Als de maatregelen onderhouden worden, blijft het systeem bestaan. Indien dit niet het geval is, zoals bij Wierum, verdwijnt de luwte en daarmee langzaam ook de kwelder. Het creëren van (tijdelijk) voldoende luwte in het systeem, kan de balans van het systeem op sommige plekken dusdanig doen omslaan dat vegetatie zich wel kan vestigen. Het is sterk afhankelijk van de locatie in hoeverre maatregelen nodig zijn (zie bijvoorbeeld Van Loon-Steensma et al., 2012).

Het onderhoud van de rijshoutendammen is in de afgelopen dertig jaar geoptimaliseerd ter bescherming van de kwelders en de pionierzone, samengevat door Elschot et al. (2020). Vanaf 1989 werd aandacht besteed aan het voorkómen van uitspoeling of onderspoeling van dammen (ook wel bekend als 'achterloopsheid') middels extra tussendammen (op 200m afstand i.p.v. 400m) en het verlaten van de buitenste bezinkvelden. Ook is de damhoogte aangepast vanwege stijging in de gemiddelde hoogwaterstanden en door de bodemdaling ten gevolge van gaswinning. In 2006 is het damonderhoud tussen Zwarte Haan en Nieuwe Bildtzijl gestopt vanwege de snelle opslibbing. Vanwege de bodemdaling door gaswinning werd in de periode 1994-1998 renovatiewerkzaamheden verricht om de opslibbing te verhogen in Groningen-Oost, waarbij tussendammen en een 10km-lange dwarsdam zijn geplaatst. Sinds 2000 worden de rijshoutendammen flexibel onderhouden, afhankelijk van de veranderingen in arealen van kwelder- en pionierzone. Oostelijk van Holwerd worden sinds 2011 helemaal geen dammen meer bijgevuld, maar zet de opslibbing tot op heden door.

Projecten waarin buitendijks kwelders worden aangelegd op laaggelegen intergetijdengebied, zijn niet talrijk. Een voorbeeld hiervan is de Marconi proefkwelder bij Delfzijl in het Eems-Dollard estuarium. Uit deze kunstmatige kwelderaanleg bleek dat kweldervegetatie zich vestigt zodra de bodemhoogte voldoende hoog is (ten opzichte van het getij). Het inzaaien van zeekraal (*Salicornia procumbens*) na aanleg, was vooral tijdelijk van invloed op het voorkomen van vegetatie. Een hoger kleipercentage van de bodem had een positief effect op zowel soortenrijkheid als vegetatiebedekking, waarbij niet duidelijk was of dit te maken had met weerstand tegen erosie, vochtgehalte of nutriënten. Meer informatie over de Marconi proefkwelder wordt gegeven in Bijlage A.2.

Projecten waar binnendijks kwelders worden aangelegd oftewel gerestaureerd in voormalige polders, voorheen kwelders, zijn talrijker. In Nederland kan men denken aan Perkpolder en de Hedwigepolder. Perkpolder is een *managed realignment* locatie. 75 ha voormalig agrarisch land is opengesteld voor het getij in 2015. Het gebied is bijna volledig omgeven met dijken, waardoor amper golven voorkomen. In het relatief laaggelegen gebied is Engels Slijkgras aangeplant op 15 locaties. Op 6 locaties heeft deze vegetatie het overleefd en zijn er patches gevormd, inmiddels vormen zich nieuwe pollen nabij deze patches (Mason et al., submitted). Het voorkomen van vegetatie op deze lage bodemligging (relatief lange overstromingsduur), veruit lager dan op andere locaties in de Westerschelde, komt hoogstwaarschijnlijk door de minimale golfwerking lokaal. Het ontwikkelde intergetijdengebied slibt vrij langzaam aan (ongeveer 0-15 cm in de eerste 3 jaren na aanleg), alhoewel in de kreken grotere veranderingen geobserveerd zijn (0-50 cm), mogelijk door overdimensionering (Lageweg et al., 2019). Los van het aangeplante Engels Slijkgras en de daaruit groeiende pollen, groeit er vooralsnog amper vegetatie. Ook de Hertogin Hedwigepolder in de Westerschelde tegen de Belgische grens is recent ontpolderd. Deze jonge polder (ingepolderd in 1907) is opnieuw onder invloed gebracht van het getij. Beplanting werd verwijderd en een krekensel werd gegraven om estuariene dynamiek te stimuleren. In 2022 is daadwerkelijk de verbinding gemaakt met de Westerschelde. Op het moment van schrijven loopt er nog een project van de Universiteit Antwerpen, Hogeschool Zeeland, Wageningen Marine Research en Deltares in opdracht van de provincie Zeeland.

De eerste visuele waarnemingen (o.a. toename van het aantal waargenomen vogels en vissen, en ontwikkeling van geulen in het ontpolderde gebied) zijn veelbelovend, maar er zijn nog geen kwantitatieve meetresultaten beschikbaar van de bodemhoogte- en vegetatieontwikkeling.

3.3.3 **Lessen uit eerdere ingrepen**

De focus van dit rapport ligt op ingrepen in bestaande kwelders, met name op de ingreep afgraven, de dynamiek voorafgaand aan het afgraven en de te verwachten dynamiek na het afgraven. Het ontwikkelen en/of herstel van een kweldersysteem als beschreven in de casussen uit secties 3.3.1 en 3.3.2 kan gebruikt worden om lessen te trekken voor afgraven:

- **Golfdynamiek:** al lange tijd is bekend dat het dempen van inkomende golven en het creëren van luwte kweldergroei bestendigen. Al bij relatief kleine significante golfhoogtes (0,1 m) wordt een beperkend effect op kwelderontwikkeling waargenomen (Willemsen et al., 2022). Bekend voorbeeld is het gebruik van rijshoutendammen in de kwelderwerken, maar ook de dynamiek in voormalige kleiputten laat zien dat het van belang is om bescherming te hebben aan de zeezijde (d.w.z. de zeezijde van een afgraving mag geen vlakke overgang hebben met het kale wad). Stormen relateren niet altijd direct aan grotere afslag van de kwelder (Van der Wal et al., 2023). Afslag lijkt een meer gradueel proces te zijn, waarbij de historie van de belasting wel een rol speelt, en erosie pas later na een storm voorkomt.
- **Kwelderhoogte:** voorgaande ingrepen laten zien dat vegetatie zich vrijwel altijd opnieuw zal vestigen als de hoogteligging dat toelaat.
- **Profiel van voorliggende plaat:** natuurlijke, convexe (bolvormige) platen duiden meestal op opslibbing en uitbreidende kwelders; concave (holvormige) platen op erosie. Door de aanleg van dijken wordt accommodatieruimte beperkt, wat ten koste kan gaan van opslibbing op de hoge intergetijdenplaten (Flemming & Nyandwi 1994).
- **Overstroming, droogval:** overstroming en droogval zijn sterk gekoppeld aan de hoogteligging ten opzichte van hoogwater. Een open verbinding met de zee is van belang voor aan- en afvoer van water en sediment middels krekken, sloten of kanaaltjes. Indien aangelegde krekken in afgravingen te groot gedimensioneerd worden, zullen de krekken snel dichtslibben en afnemen qua grootte. Sedimentatie van laaggelegen gebieden kan dan veel tijd kosten (bijv. in Perkpolder).
- **Sedimentbeschikbaarheid** is essentieel voor kwelderontwikkeling en herstel na ingrepen. Een sedimenttekort kan belemmerend zijn voor kweldergroei, zeker in combinatie met (versnelde) zeespiegelstijging. Een sedimentoverschot kan ook belemmerend zijn voor kweldergroei, bijvoorbeeld doordat er onvoldoende consolidatie (sterkteontwikkeling) plaatsvindt en/of het zaad van de planten begraven wordt, waardoor er minder ontkieming is. In dat geval is het permanent fixeren van sediment van belang. Vermoedelijk bestaat er een optimum van sedimentbeschikbaarheid voor kweldergroei.
- **Bodemsamenstelling:** het slibgehalte van de bodem beïnvloedt onder andere verdeling van sedimentatie over het profiel, de weerstand tegen erosie en vocht- en nutriëntgehalten. Bij de proefkwelder Marconi bleek dat zowel de soortenrijkdom als de ruimtelijke verspreiding van vegetatie van de kwelder groter was voor hogere slibgehalten (tot 50%).

Een belangrijke kanttekening is dat de uitkomsten en het succes van herstelprojecten sterk afhankelijk is van de lokale initiële condities, zoals de bodemhoogte en reeds aanwezige vegetatie, uitvoeringsmethodes en looptijd. Daardoor zijn projecten niet direct met elkaar te vergelijken en kunnen uitkomsten van locatie tot locatie verschillen (Rupprecht et al., 2023).

Er zijn nog geen specifieke onderzoeken gedaan naar de gevolgen van het stoppen met onderhouden van de rijshoutendammen, waardoor daar ook geen lessen van beschikbaar zijn. Dat maakt de onzekerheid van deze maatregel wat groter. Het is aan te raden om het effect van deze maatregel nauwgezet te monitoren.

4 Abiotische randvoorwaarden voor kweldervoorkomen

Uit de geleerde lessen uit eerdere ingrepen (zie paragraaf 3.3.3) komen een aantal belangrijke parameters naar voren, namelijk de hoogteligging, de inundatietijd, sedimentbeschikbaarheid, golfcondities en bodemsamenstelling. Om de abiotische randvoorwaarden voor kweldervoorkomen te kwantificeren wordt een database opgezet van deze parameters. Deze randvoorwaarden zijn voor het studiegebied (de Nederlandse Waddenzee, exclusief Eems-Dollard, zie paragraaf 1.3) langs de rand van het wad bepaald. In dit hoofdstuk wordt deze database beschreven.

4.1 Selectie van locaties

De parameters voor kweldergroei zijn gevisualiseerd op punten langs de Waddenzee kust, met een interval van 100 meter (Figuur 4-1). Deze punten bevinden zich op de dijkteen of, waar kwelder aanwezig is, op de kwelderrand. De ligging van de kwelderrand is bepaald met behulp van de 2016 – 2020 VEGWAD kartering. Hierbij zijn alle delen van de kwelder ouder dan (pre-)pioniersvegetatie als kwelder aangemerkt, met andere woorden de lage kwelder en hoger gelegen. Het onderscheid tussen de vegetatiezones is gemaakt aan de hand van de binnen VEGWAD gebruikte kaartcodes (“ZONEcod”).

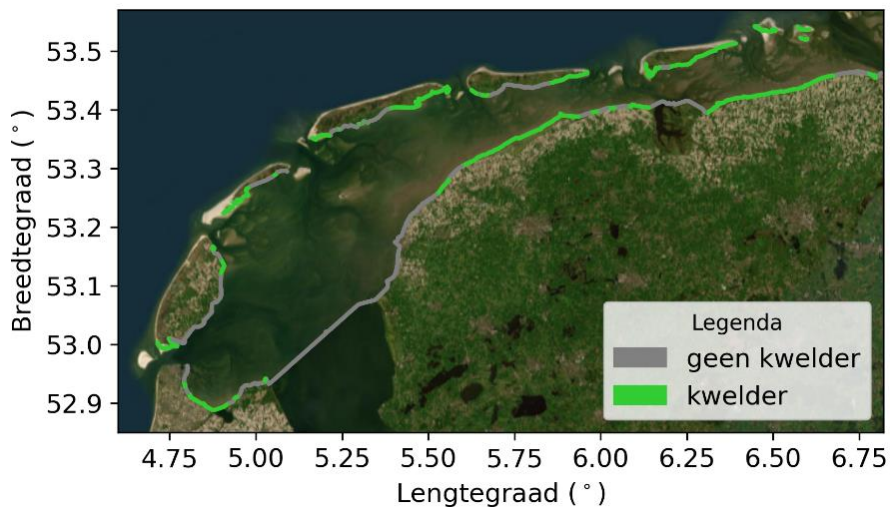
De randvoorwaarden voor kweldergroei zijn op verschillende afstanden zeewaarts van de kwelderrand of dijk bepaald om inzicht te geven in de variatie op het voorliggende wad. Deze aanvullende punten bevinden zich 500, 1000, 1500 en (ongeveer) 2000 meter zeewaarts van het kustpunt. Voor de breedste kwelders, zoals Noard-Fryslân Bûtendyks, zijn hierdoor ook gegevens beschikbaar buiten de oudste rijshoutendammen, die inmiddels niet meer onderhouden worden.



Figuur 4-1 Punten elke 100m langs de Waddenzeekust waarop de parameters voor kweldergroei zijn gevisualiseerd. Op de dijkteen of kwelderrand (groen), en op 500, 1000, 1500 en ongeveer 2000m zeewaarts.

4.2 Aanwezigheid kwelders

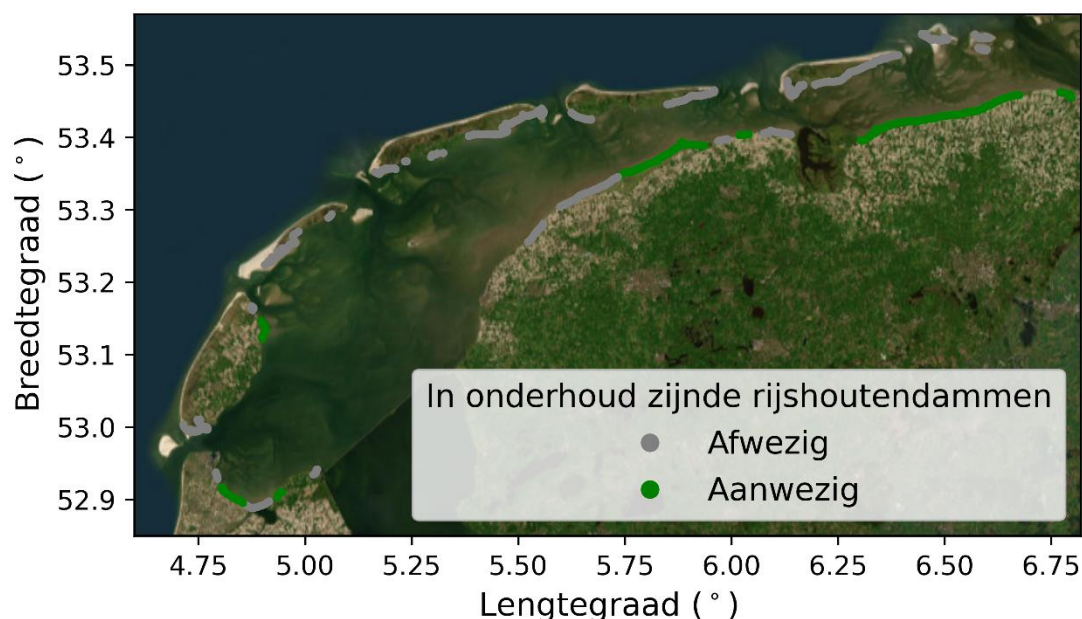
Voor elk punt in de database is vastgesteld of deze wel of niet voor een kwelder ligt (Figuur 4-2). Zo kan per randvoorwaarde (zoals golfhoogte op het wad) bepaald worden of de condities verschillen op de locaties met en zonder kwelder, respectievelijk.



Figuur 4-2 Locaties langs de Waddenzeekust waar wel (groen) en geen (grijs) kwelder aanwezig is volgens de 2017 VEGWAD kartering.

4.3 Rijshoutendammen

Figuur 4-3 geeft een overzicht van de per 2024 in onderhoud zijnde rijshoutendammen in de Nederlandse Waddenzee. Vanaf komend jaar zullen de Feugelpolle op Ameland ook beschermd worden met rijshoutendammen – deze zijn nog niet opgenomen in Figuur 4-3.



Figuur 4-3 Per 2024 in onderhoud zijnde rijshoutendammen in de Nederlandse Waddenzee.

4.4 Kwelderbreedte

De kwelderbreedte is mogelijk van belang voor de potentiële hoogteontwikkeling van een kwelder. Daarom is de kwelderbreedte in deze studie ingeschat op basis van satellietbeelden en VEGWAD karteringen.

Tabel 4-1 Overzicht van de huidige kwelderbreedte van de vastelandskwelders op basis van satellietbeelden en VEGWAD karteringen.

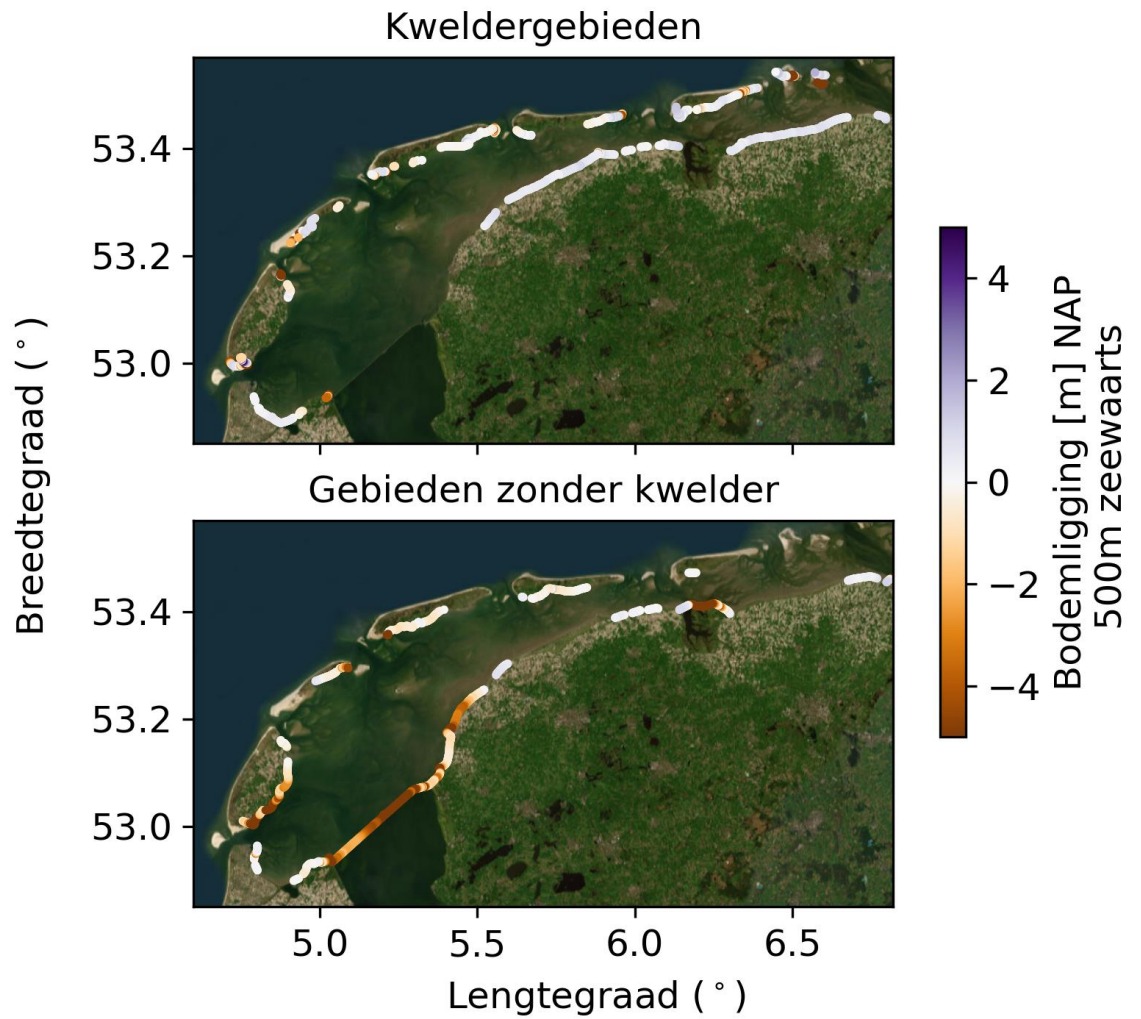
Kwelder	Ingeschatte kwelderbreedte
<i>Balgzand - Kooijhoekschor en Van Ewijcksluisschor</i>	0-200 m
<i>Balgzand - Normerven</i>	0-200 m
<i>Balgzand - Den Oever</i>	0-300 m
<i>Westhoek</i>	0-200 m
<i>Zwarte Haan</i>	0-200 m
<i>Noord Friesland Buitendijks West</i>	200-1000 m (excl. 600 m zomerpolders)
<i>Noord Friesland Buitendijks Midden</i>	1500-1800 m (excl. 1200-1500 m zomerpolders)
<i>Noord Friesland Buitendijks Oost</i>	0-1500 m
<i>'t Schoor</i>	300 m
<i>Wierum</i>	0-150 m
<i>Peazemerlannen</i>	Max. 800 m
<i>Groningen West</i>	200-1000 m
<i>Groningen Midden</i>	200-700 m
<i>Groningen Oost</i>	0-900 m

4.5 Hoogteligging kwelder en voorliggend wad

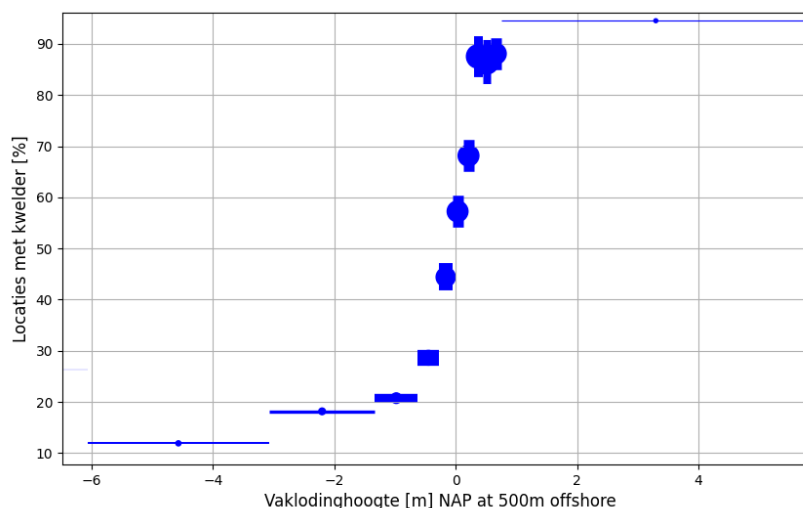
De bodemhoogteligging op het voorliggende wad is weergegeven in Figuur 4-4. Hier valt op dat het voorliggende wad (op 500 meter afstand van de kust) over het algemeen lager ligt in de westelijke Waddenzee dan in de oostelijke Waddenzee. Met name bij zuidoost-Texel (langs de hoofgeul van het Marsdiep) en langs de afsluitdijk neemt de diepte voor de kust sterk toe (tot -5 meter NAP), waardoor op deze locaties geen kwelders kunnen ontwikkelen.

Locaties waar het voorliggende wad rond NAP of hoger ligt hebben vaker een kwelder. Locaties waar het voorliggende wad laag ligt ten opzichte van NAP hebben vaker geen kwelder. Dit is te zien in Figuur 4-5, waar is getoond hoe vaak er een kwelder wordt geobserveerd in de Nederlandse Waddenzee voor verschillende waardenklassen aan bodemhoogteligging op het voorliggende wad.²

² Merk op dat elk horizontaal streepje een andere bandbreedte aan bodemhoogtes aanduidt, maar met eenzelfde aantal locaties langs de Waddenzee. De bodemhoogtes met dikke, korte streepjes komen dus even vaak voor als de bodemhoogtes met een lange, dunne horizontale streep.



Figuur 4-4 Bodemhoogteligging 500 meter zeewaarts vanaf de kwelderrand of dijkteen. Boven: gebieden mét kwelder; beneden: gebieden zonder kwelders. De Vaklodgingen met een ruimtelijke resolutie van 20 meter zijn hiervoor geïnterpoleerd op punten met een interval van 100 meter langs de kust.



Figuur 4-5 Percentage kustpunten [%] waarvoor kwelder wordt geobserveerd voor verschillende waardenklassen aan bodemhoogteligging op het voorliggende wad. De x-as is ingedeeld op 12 klassenwaarden van bodemhoogteligging die op evenveel locaties langs de rand van de Waddenzee voorkomen. De bodemhoogteligging is gebaseerd op de Vaklodingen.

4.6 Sedimentaانبod

Alleen als de kwelder onder water staat wordt er sediment aangevoerd naar de kwelder. Daarom kijken we eerst naar de inundatietijd en -frequentie van de kwelders. Vervolgens wordt het zwevend stofgehalte aan de kwelderrand berekend op momenten dat de kwelder inundeert. Dit wordt gebruikt als proxy om te beschouwen welke delen van de kust een relatief hoog sedimentaانبod hebben.

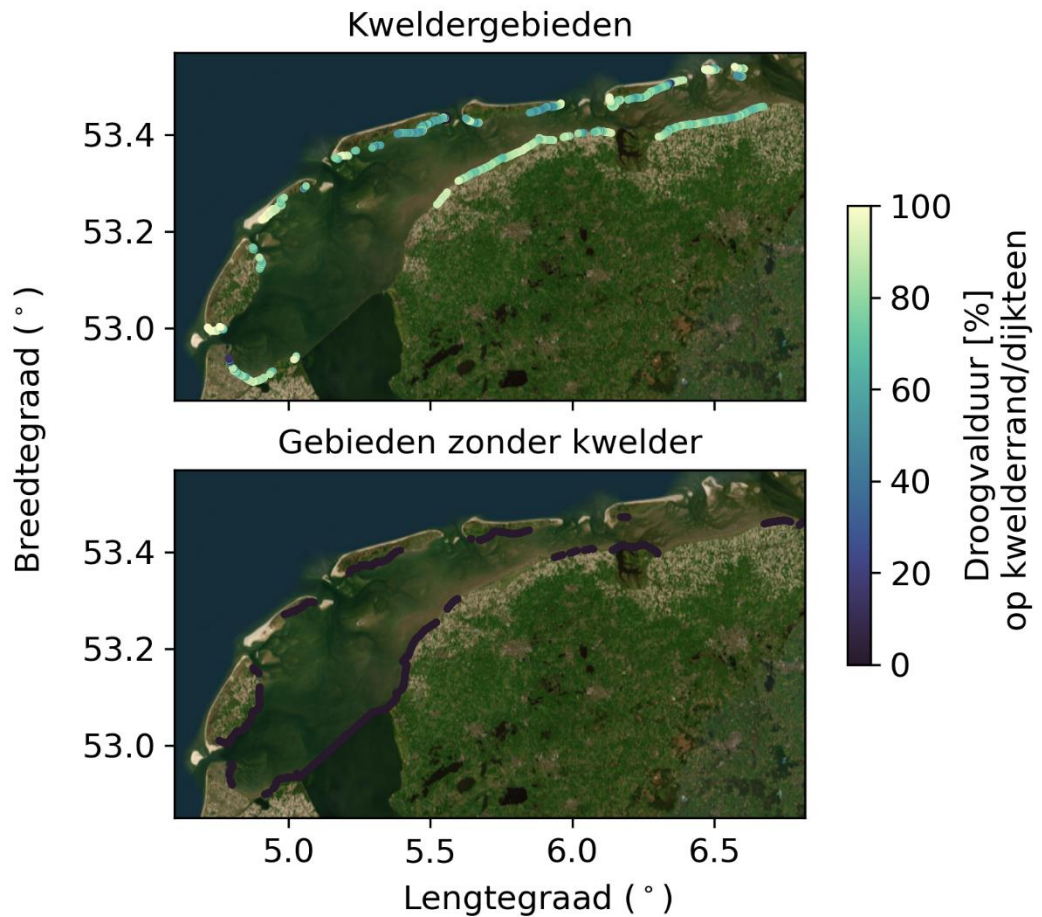
4.6.1 Inundatietijd en -frequentie

De inundatietijd en -frequentie is bepaald met dezelfde methodiek als Van Weerdenburg & Hanssen (2023). Hiervoor zijn gemodelleerde waterstanden uit het 2D D-Flow FM model van de Waddenzee geïnterpoleerd op bodemhoogtekaarten met een hogere ruimtelijke resolutie. Gebieden met een waterdiepte kleiner dan 0,05 meter worden als droogvallend beschouwd. De gemodelleerde waterstanden met een ruimtelijke resolutie van 100m zijn geïnterpoleerd op bodemhoogtekaarten met een resolutie van 2 meter op de kwelder (afkomstig uit AHN4) en 20 meter in de rest van de Waddenzee (op basis van de Vaklodingen). De gehanteerde simulatieperiode omvat vier springtij-doodtijcycli (1 augustus tot 1 november 2017), waarvoor de simulaties reeds voorhanden waren (afkomstig uit Van Weerdenburg & Hanssen (2023)). In eerdere studies is gekeken naar de representativiteit van het kalenderjaar 2017 qua windcondities (wat invloed heeft op stormopzet en sedimentconcentraties). De windcondities in 2017 zijn over het algemeen representatief voor de gemiddelde windcondities (Vroom, van Weerdenburg, Smits, & Herman, 2020). Vooral de sterke winden zijn voor 2017 goed overeenkomstig met de gemiddelde windcondities over 10 jaar. De windrichting was in 2017 wel vaker uit het westen dan het langjarig gemiddelde; het betreft hierbij vooral een zwakke tot matige wind uit het westen. Aangezien vooral de extreme windcondities belangrijk zijn voor initiële kwelderontwikkeling (via stormopzet en resuspensie van sediment) wordt aangenomen dat 2017 een goede afspiegeling geeft van de windcondities.

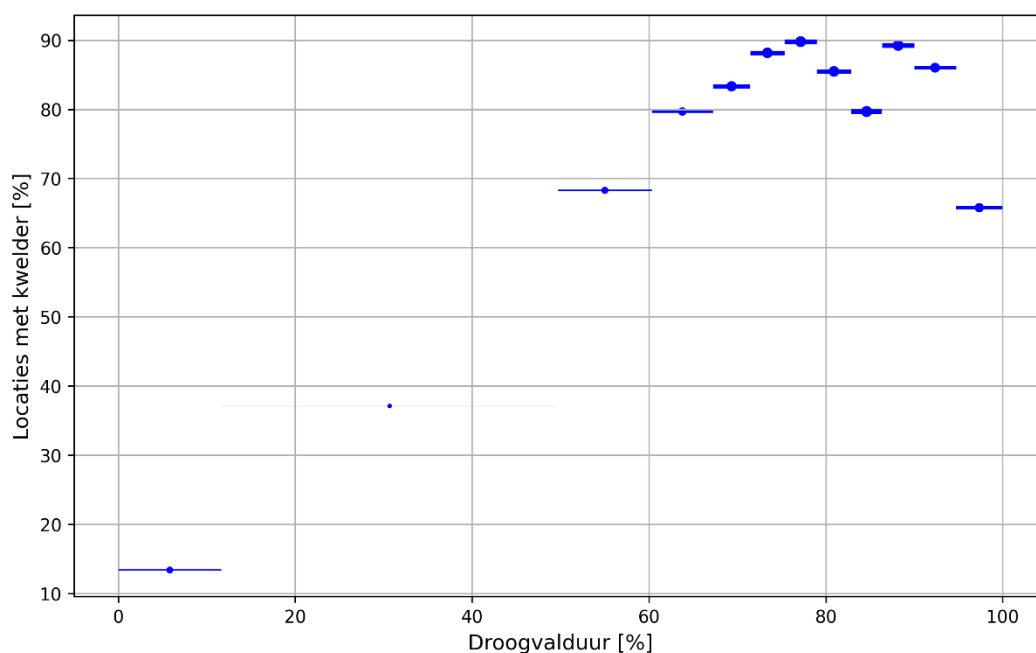
De droogvalduur is substantieel hoger op locaties met kwelders (ruimtelijk gemiddelde van 76%) dan op locaties zonder kwelder (ruimtelijk gemiddelde van 50%). Ook op de voorliggende wadplaat geldt een hogere droogvalduur voor kwelderlocaties met een zeewaartse afname in de droogvalduur, zie Tabel B-1 in bijlage A. De ruimtelijke variatie in droogvalduur (Figuur 4-6) is vergelijkbaar met de ruimtelijke variatie van de hoogteligging (Figuur 4-4), omdat droogvalduur op de kwelderrand natuurlijk sterk gestuurd door de

hoogteligging. Daarnaast speelt ook de ruimtelijke variatie van de gemiddelde hoogwaterstanden over de Waddenzee een rol, die varieert van ongeveer 60 cm in Den Helder tot 1,4 m in Delfzijl.

Opmerkelijk uit deze resultaten is dat de droogvalduur voor locaties met en zonder kwelders zeer sterk verschilt, zoals duidelijk naar komt uit Figuur 4-6. Er lijkt een optimum te bestaan voor de droogvalduur van kwelders: op locaties met een droogvalduur tot 80% neemt het aantal kwelders toe met toenemende droogvalduur (Figuur 4-7). Voor een droogvalduur hoger dan 80% neemt het aantal kwelders licht af. De meeste kwelders komen voor bij droogvalduur tussen de 60-95%.



Figuur 4-6 Droogvalduur [%] op punten op de kwelderrand of dijkteen met een interval van 100 meter langs de kust. Boven: gebieden mét kwelder; beneden: gebieden zonder kwelders. De droogvalduur is bepaald door waterstanden uit het 2D D-Flow FM model van de Waddenzee met een resolutie van 100 meter te interpoleren op de Vaklodingen bodemhoogtekaart met een resolutie van 20 meter. De beschouwde simulatieperiode is Augustus-September 2017.



Figuur 4-7 Percentage kustpunten [%] waarvoor kwelder wordt geobserveerd voor verschillende waardenklassen aan droogvalduur op de kwelderrand of dijkteen. De x-as is ingedeeld op 12 klassenwaarden van droogvalduur die op evenveel locaties langs de rand van de Waddenzee voorkomen.

4.6.2 Sedimentconcentraties

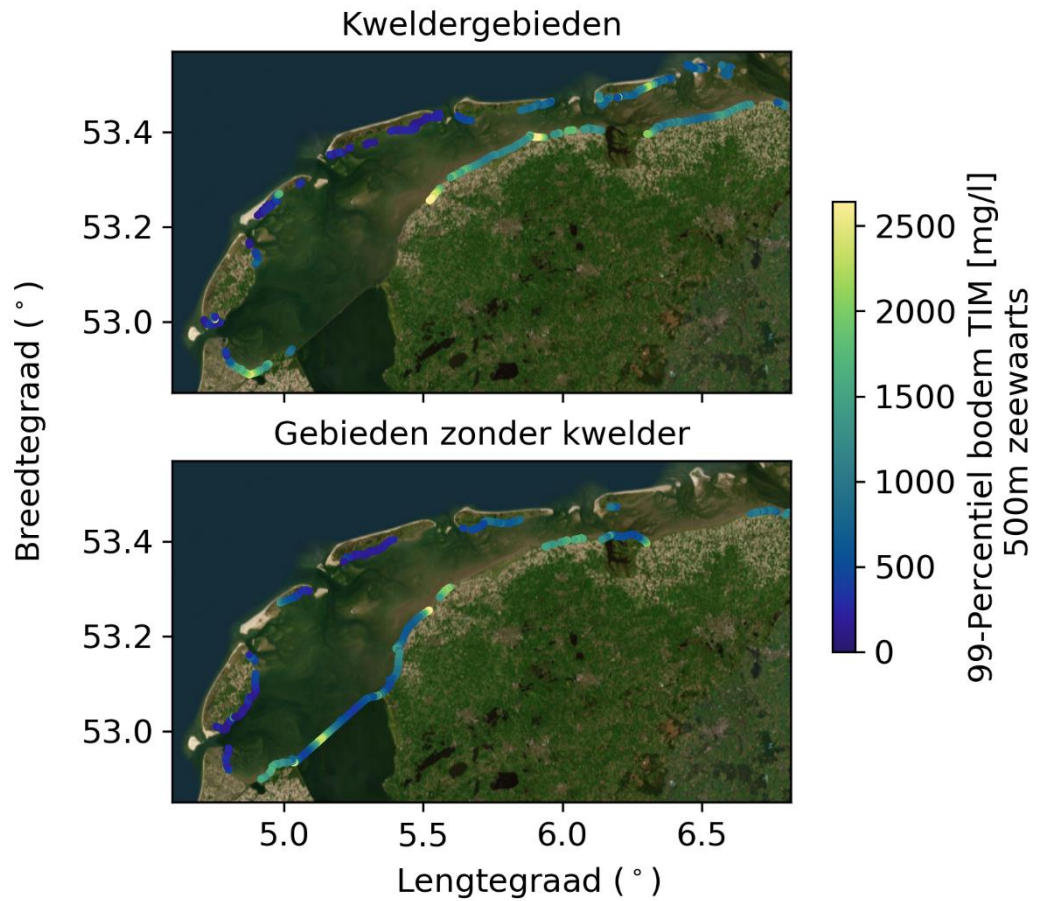
Het zwevend stofgehalte (SPM) vóór de kwelderrand (of teen van de dijk) zijn bepaald met het 3D Delft3D-FM Dutch Wadden Sea Model (DWSM-FM), een modelschematisatie van de gehele Nederlandse Waddenzee (Vroom et al., 2020) met tien verticale sigma-lagen en een horizontale resolutie van 200x200m. De gehanteerde simulatieperiode omvat een volledig jaar (2017) opdat deze ook periodes met stormopzet omvat.

Voor SPM is gekeken naar de jaargemiddelde waarde, de standaarddeviatie en de 99-percentiel waarde nabij de bodem. Er is opnieuw gekeken naar locaties op de kwelderrand of dijkteen en op 500m, 1000m, 1500m en 2000m zeewaarts. Hierbij is rekening gehouden met droogval van deze locaties zelf (d.w.z. SPM is alleen verwerkt in de statistieken wanneer het punt onder water staat is).

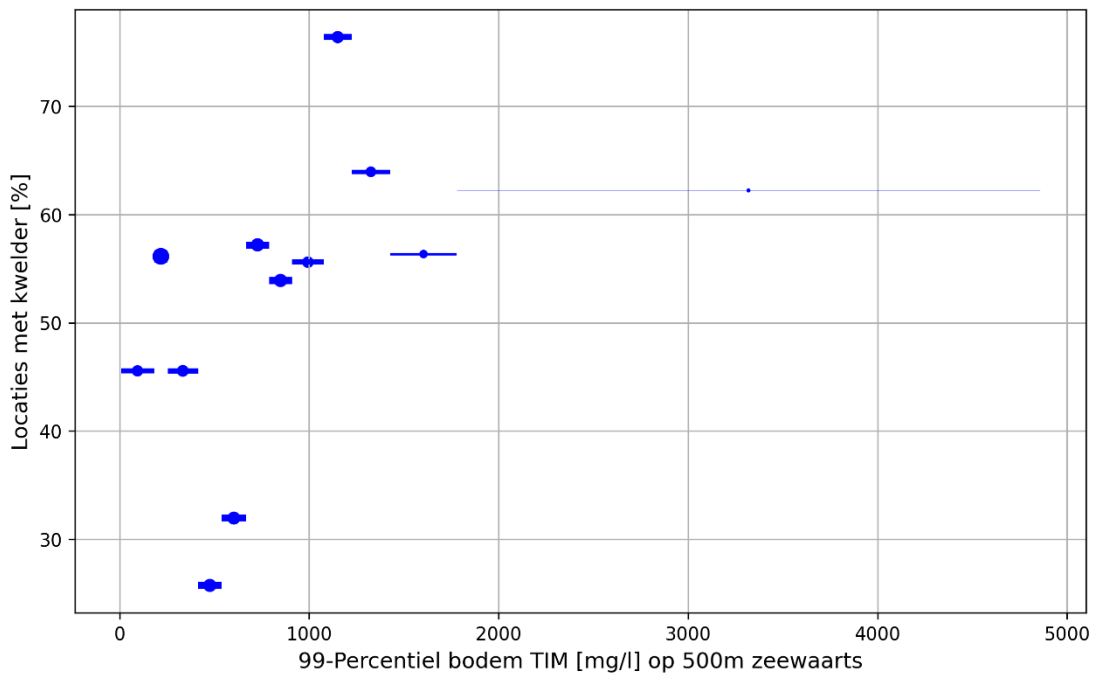
De ruimtelijke verdeling laat relatief hoge maximale zwevend stofgehalte op 500 m voor de kwelderrand of dijkteen zien nabij de Afsluitdijk, de Friese vastelandskust en op het Balgzand (Figuur 4-8). Op de eilandkwelders is het maximale zwevend stofgehalte lager. Uit de jaargemiddelde SPM-gehalten komt een vergelijkbaar ruimtelijk patroon naar voren, waarbij de waarden een orde grootte kleiner zijn en de Afsluitdijk minder in het oog springt.

Voor maximale SPM-gehalten onder 2 g/L op de voorliggende plaat lijkt er een vrij direct verband te bestaan met het voorkomen van kwelders: Op locaties met een hoger maximaal SPM-gehalte op de voorliggende plaat komen meer kwelders voor (Figuur 4-9). Omgekeerd komen bij maximale SPM-gehalten onder 0,7 g/L minder kwelders voor. Boven een maximaal SPM-gehalte van 2 g/L neemt het aantal kwelders echter weer af, mogelijk omdat kweldervorming belemmerd wordt bij te hoge opslibbing of door te veel hydrodynamische energie, die ook het sediment in suspensie houdt.

Naast de huidige relatie tussen het zwevend stofgehalte en het voorkomen van kwelders, informeert de ruimtelijke verdeling van SPM-gehalten ons ook over de sedimentbeschikbaarheid voor herstel na een ingreep.

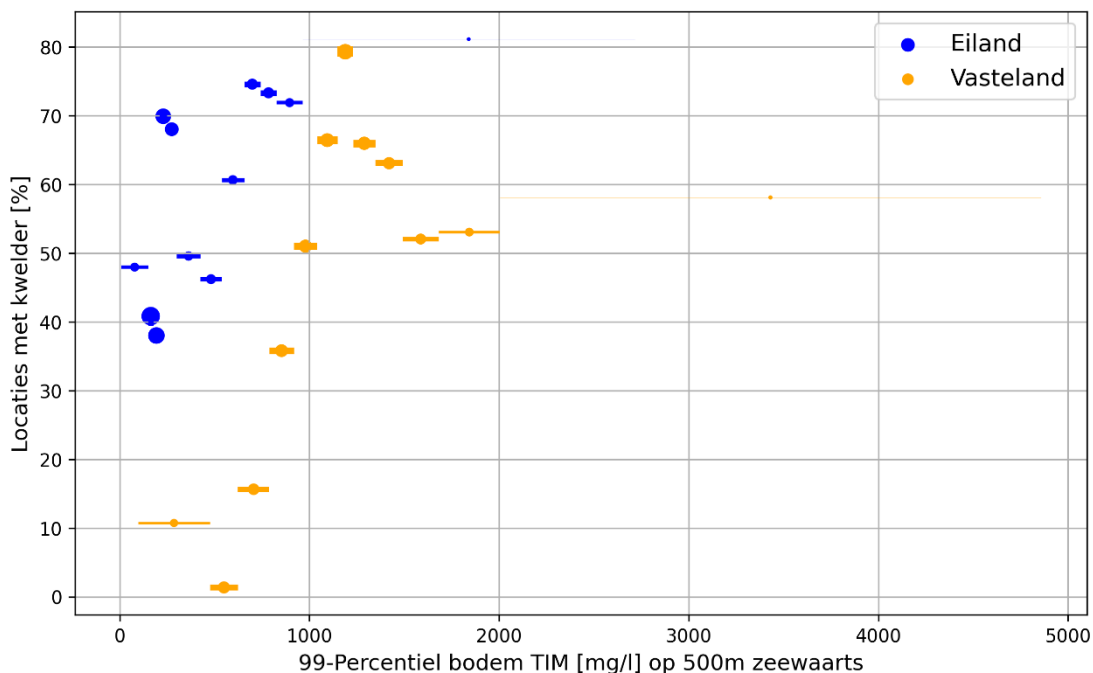


Figuur 4-8 99-Percentiel zwevend stofgehalte (SPM) nabij de bodem [mg/L] op punten 500 m zeewaarts van de kwelderrand of dijken met een interval van 100 meter langs de kust. Boven: gebieden mét kwelder; beneden: gebieden zonder kwelders. SPM is bepaald met het 3D DWSM-FM model met een horizontale resolutie 200m. De beschouwde simulatieperiode is het kalenderjaar 2017.



Figuur 4-9 Percentage kustpunten [%] waarvoor kwelder wordt geobserveerd voor verschillende waardenklassen aan zwevend stofgehalte op 500 m zeewaarts van de kwelderrand of dijken. De x-as is

ingedeeld op 12 klassenwaarden van zwevend stofgehalten die op evenveel locaties langs de rand van de Waddenzee voorkomen.



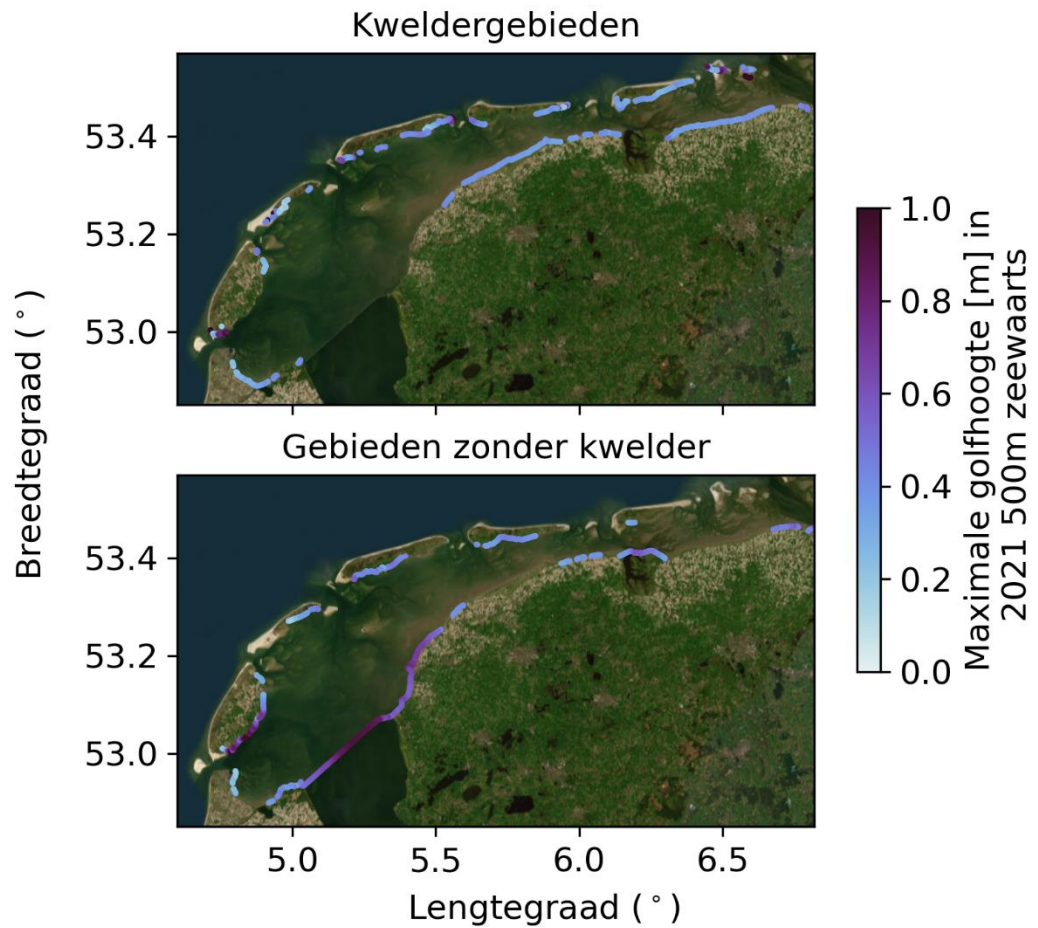
Figuur 4-10 Percentage kustpunten [%] waarvoor kwelder wordt geobserveerd voor verschillende waardenklassen aan zwevend stofgehalte op 500 m zeewaarts van de kwelderrand of dijkteen op de eilanden (blauw) vs. het vasteland (oranje). De x-as is ingedeeld op 12 klassenwaarden van zwevend stofgehalten die op evenveel locaties langs de rand van de Waddenzee voorkomen.

4.7 Golfcondities

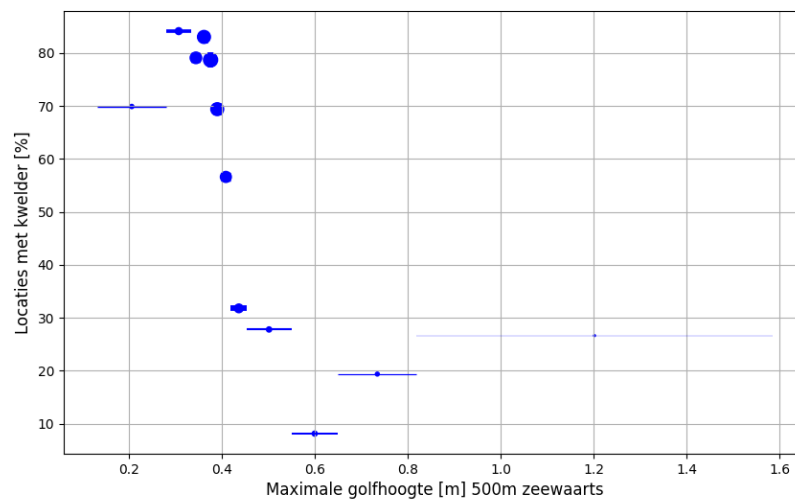
Golfcondities zijn via Matroos (een online instrument om inzicht te krijgen in recente en historische model- en monitoringsgegevens) opgehaald uit het SWAN-Kuststrokenmodel (Van Nieuwkoop et al., 2023). Dit model is ontwikkeld voor operationele golfverwachtingen en voor scheepvaartbegeleiding. Het kalenderjaar 2021 is gebruikt voor de golfcondities, aangezien kalenderjaar 2017 (zoals gebruikt voor de andere parameters) niet beschikbaar was.

Voor de golfcondities zijn als parameters de significante golfhoogte en de piekperiode gebruikt op de kwelderrand (of teen van de dijk) en op 500m, 1000m en 2000m voor de kwelderrand (of teen van de dijk). Het verschil in gemiddelde golfhoogte tussen locaties met en zonder kwelder is klein (respectievelijk 0,12m en 0,11m), maar het verschil in maximale golfhoogte is wel substantieel (resp. 0,40m en 0,54m). Ook op de voorliggende wadplaat geldt een lagere maximale golfhoogte voor de kwelderlocaties, zie Tabel B-1. De maximale significante golfhoogte is het grootst op de Afsluitdijk en langs de zuidoostkust van Texel (Figuur 4-11). Ook de Friese kust nabij Harlingen en de kust bij het Lauwersmeer zijn onderhevig aan relatief hoge golven.

Er is een duidelijke samenhang tussen de golfhoogte en de kwelderlocaties in Figuur 4-12. Voor een maximale golfhoogte onder de 0,45 m neemt het aantal locaties met kwelders snel toe. Voor een maximale golfhoogte onder de 0,25 m neemt het aantal kwelders weer licht af. Voor locaties met een grotere maximale golfhoogte is het aantal kwelders klein.



Figuur 4-11 Maximale significante golfhoogte [m] op punten 500m zeewaarts van de kwelderrand of dijkeeten met een interval van 100 meter langs de kust. De golfhoogte is via Matroos opgehaald uit het SWAN-Kuststrokenmodel (Van Nieuwkoop et al., 2023) voor het jaar 2021.



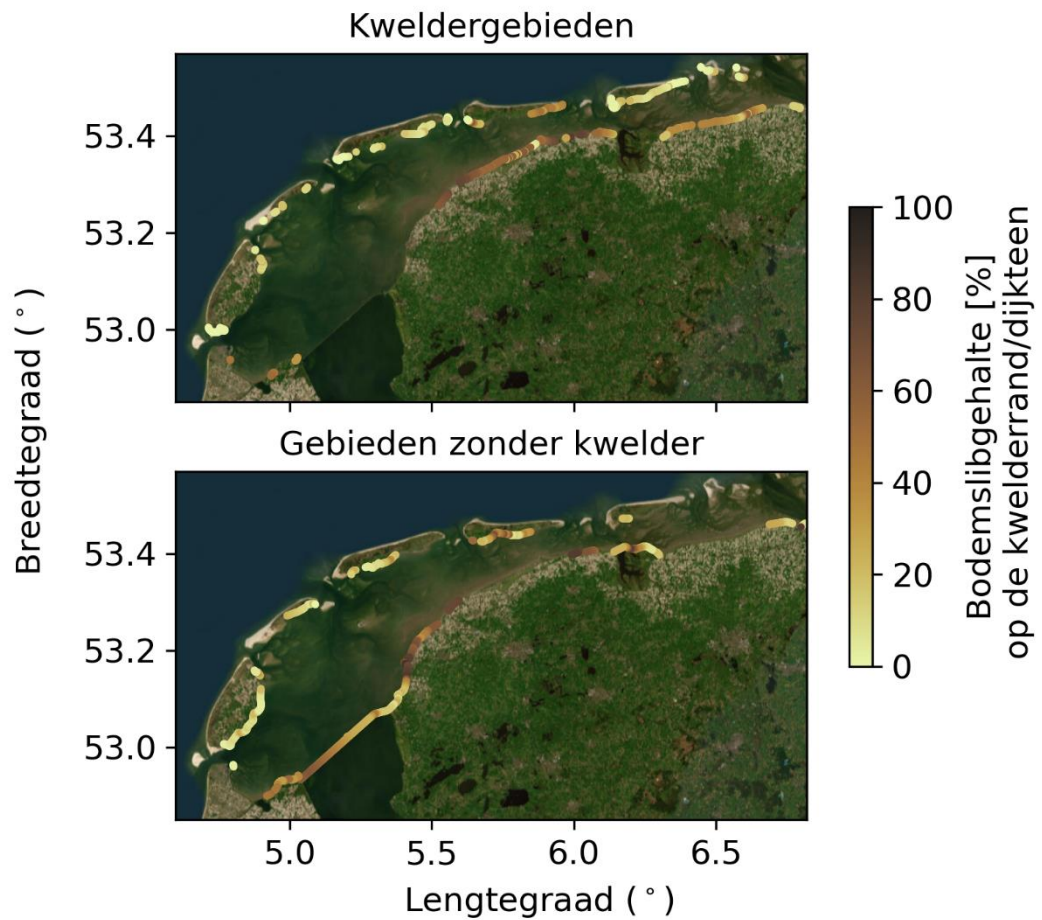
Figuur 4-12 Percentage kustpunten [%] waarvoor kwelder wordt geobserveerd voor verschillende waardenklassen aan maximale golfhoogte op 500m zeewaarts van de kwelderrand of dijkeeten. De x-as is ingedeeld op 12 klassenwaarden van golfhoogte op evenveel locaties langs de rand van de Waddenzee voorkomen.

4.8 Bodemsamenstelling

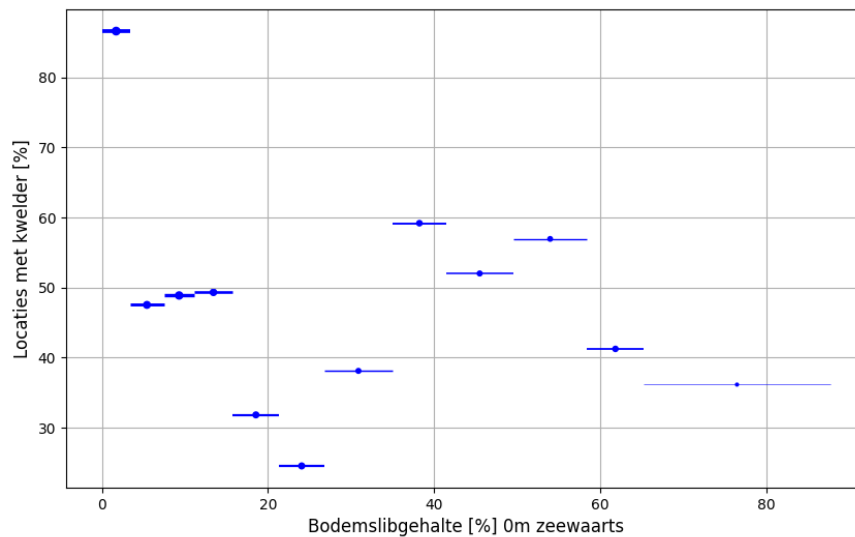
Op basis van beschikbare gegevens uit SIBES-dataset (Bijleveld et al., 2012) en de Sedimentatlas (RIKZ, 1998) zijn bodemslibgehalten geïnterpoleerd naar de locaties op de kwelderrand en dijkteen en de voorliggende plaat. Gezien de recentere data en hogere resolutie is hierbij de voorkeur gegeven aan SIBES waar deze data beschikbaar is. De Sedimentatlas is gebruikt om de ontbrekende gegevens aan te vullen waar mogelijk. Hierbij zijn beschikbare gegevens uit SIBES en Sedimentatlas geïnterpoleerd binnen een afstand van 0.01° (dit komt overeen met 1110 m (noord-zuid) en 670 m (oost-west)). Er zijn ook locaties waar geen bodemslibgehalte beschikbaar is, bij gebrek aan nabijgelegen datapunten.

De ruimtelijke verdeling van bodemslibgehalten laat een duidelijk verschil zien tussen de slibrijke vastelandskust en de zandige eilanden (Figuur 4-13). Het gemiddelde bodemslibgehalte op de kwelderlocaties (29%) blijkt iets lager te zijn dan het gemiddelde bodemslibgehalte zonder kwelders (33%). Het verschil is echter klein en gaat ook niet op voor de voorliggende wadplaat, waar juist iets hogere bodemslibgehalten worden aangetroffen op 1km en 1500m zeewaarts. Er is dus geen eenduidig verband met het ruimtelijk gemiddelde bodemslibgehalte.

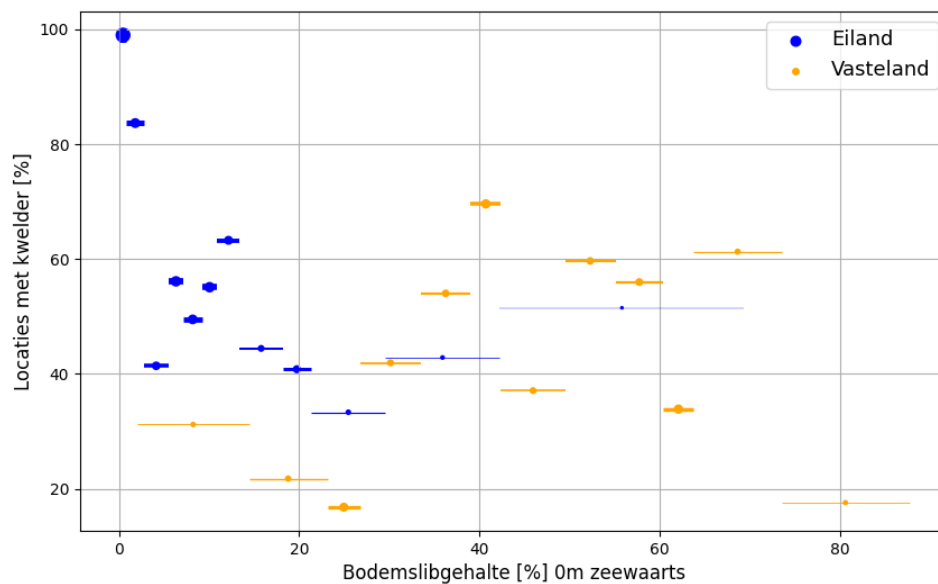
Uit een vergelijking van Figuur 4-14 met Figuur 4-15 blijkt een interessante, meer genuanceerde relatie tussen bodemslibgehalte en kwelderlocaties. Er worden relatief veel kwelders aangetroffen op locaties met de laagste bodemslibgehalten (kleiner dan 5%), vermoedelijk zijn dit vooral de eilandkwelders. Het aantal kwelders is ook relatief groot voor bodemslibgehalten tussen 35% en 55%. Voor tussenliggende waarden (5-35% en groter dan 55%) is het aantal kwelders kleiner. Deze getallen vertonen een opmerkelijke gelijkenis met veelvoorkomende waarden voor het bodemslibgehalte (bimodale verdeling) op het intergetijdengebied beschreven door Colina Alonso et al. (2020) met een eerste piek voor slibgehalten tussen 2% en 7% en een tweede piek voor slibgehalten tussen 20% en 50% slibgehalte.



Figuur 4-13 Bodemslibgehalte [%] op de kwelderrand of dijkteen met een interval van 100 meter langs de kust. Het bodemslibgehalte is geïnterpoleerd op basis van data uit SIBES indien beschikbaar of anders uit de Sedimentatlas.



Figuur 4-14 Percentage kustpunten [%] waarvoor kwelder wordt geobserveerd voor verschillende waardenklassen aan bodemslibgehaltenes van de kwelderrand of dijkteen. De x-as is ingedeeld op 12 klassenwaarden van bodemslibgehaltenes op evenveel locaties langs de rand van de Waddenzee voorkomen.



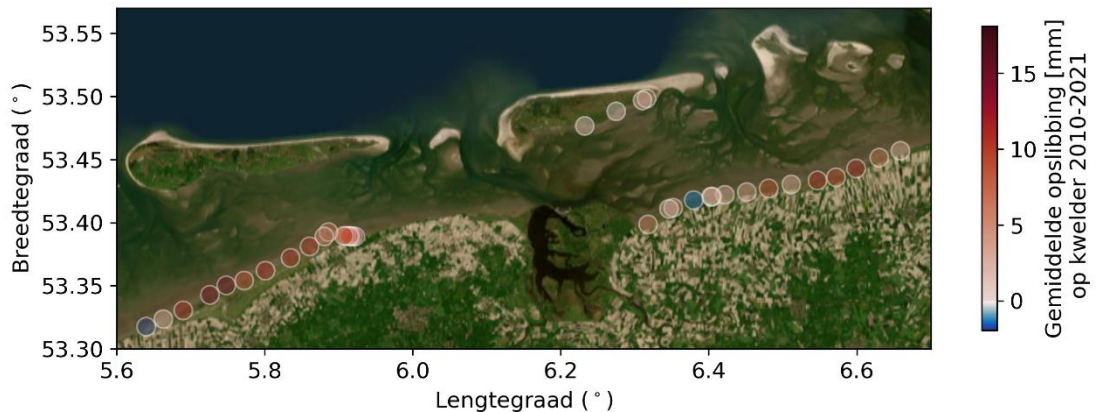
Figuur 4-15 Percentage kustpunten [%] waarvoor kwelder wordt geobserveerd voor verschillende waardenklassen aan bodemslibgehalten van de kwelderrand of dijkteen op de eilanden (blauw) en vasteland (oranje). De x-as is ingedeeld op 12 klassenwaarden van bodemslibgehalten op evenveel locaties langs de rand van de Waddenzee voorkomen.

5 Vergelijking randvoorwaarden met gemeten opslibbing op de kwelders

In dit hoofdstuk worden de relaties tussen de gemeten ontwikkeling van de kwelders en de abiotische parameters uit Hoofdstuk 4 beschreven. Aangezien de hoogtemetingen niet op alle kwelders worden uitgevoerd, beperken we ons hierbij tot de gemeten kwelders langs de Friese en Groningse vastelandskust en de kwelders op Ameland.

5.1 Ontwikkeling kwelderhoogte

De gemeten opslibbing in de kweldervakken is afkomstig uit de SEB-metingen tussen 2010 en 2021 van WMR. De gemiddelde opslibbing varieert tussen -2 mm per jaar (dus erosie) en +17 mm per jaar, zie Figuur 5-1. De hoogste opslibbing wordt waargenomen langs de vastelandskust. De kwelder op Schiermonnikoog heeft lagere opslibbing. Op een enkele locatie (aan de vastelandskust) wordt lichte erosie waargenomen. Er is geen duidelijk patroon, wat te maken zou kunnen hebben met de locatie van de SEB-meetinstrumenten ten opzichte van de vorm en de afmeting van de verschillende kwelders, zoals bijvoorbeeld getoond in Figuur 2-5.



Figuur 5-1 Gemiddelde gemeten opslibbing op de kwelders tussen 2010 en 2021 in mm per jaar uit de SEB-database.

5.2 Ontwikkeling kwelderbreedte

Een kwantificatie van de ontwikkeling in kwelderbreedte is niet eenvoudig uit bestaande datasets af te leiden. Daarom is deze laterale ontwikkeling kwalitatief ingeschat op basis van VEGWAD-karteringen en satellietbeelden en samengevat in Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Overzicht van de recente ontwikkeling van de kwelderbreedte voor de vastelandskwelders.

Kwelder	10-jarige ontwikkeling kwelderbreedte
Balgzand - Kooijhoekschor en Van Ewijcksluisschor	Vrij stabiel
Balgzand - Normerven	Vrij stabiel
Balgzand - Den Oever	Vrij stabiel
Westhoek	Uitbreiding
Zwarte Haan	Stabiel
Noard-Fryslân Bûtendyks West	Stabiel
Noard-Fryslân Bûtendyks Mid	Uitbreiding
Noard-Fryslân Bûtendyks East	Variabel/stabiel
't Schoor	Stabiel/kleine uitbreiding; terugtrekking in oostelijk deel leidend tot klifvorming
Wierum	terugtrekking leidend tot klifvorming
Peazemerlannen	Stabiel/Uitbreiding in oostelijk deel
Groningen West	Uitbreiding
Groningen Midden	Uitbreiding
Groningen Oost	Uitbreiding

5.3 Verband kwelderhoogte met abiotische condities

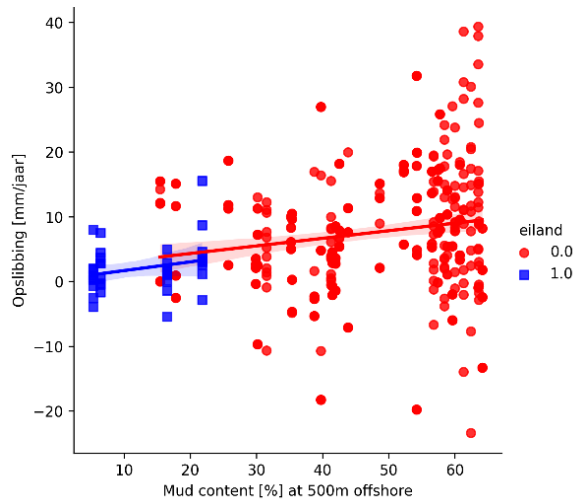
Om statistische verbanden van de opslibbing met de verschillende abiotische condities te bestuderen zijn puntenwolken gemaakt per parameter. Hierbij is een onderscheid gemaakt tussen de vastelandskwelders (in rood) en de eilandkwelders (in blauw). Algemeen valt op dat de opslibbing op de eilandkwelders kleiner is dan de opslibbing op de vastelandskwelders.

Voor het bodemslibgehalte op de voorliggende wadplaat (op 500m zeewaarts vanaf de kwelderrand) blijkt uit Figuur 5-2 dat slibrijke locaties dynamischer zijn, waardoor zowel grotere opslibbing als lichte erosie wordt waargenomen op locaties met hogere bodemslibgehaltenes. Op locaties met lage bodemslibgehaltenes wordt juist een beperkte opslibbing of erosie waargenomen. Gemiddeld neemt de opslibbing wel toe voor hogere bodemslibgehaltenes (zie regressielijn), al is dit niet noodzakelijk een causaal verband. Mogelijk komt de correlatie voort uit een gedeelde achterliggende oorzaak, namelijk het verschil tussen vastelands- en eilandkwelders. Dit kan te maken hebben met de andere ontstaansgeschiedenis, oriëntatie en mate van blootstelling/beschutting van de verschillende kwelders tijdens stormcondities, zoals beschreven in paragraaf 3.1.2.

Voor de overige parameters (zwevend stofgehalte, droogvalduur, golfhoogte en hoogteligging) komt geen eenduidig verband uit deze analyse naar voren (ter indicatie zijn deze figuren toegevoegd in bijlage D):

- Voor het zwevend stofgehalte lijkt er een zwakke relatie te bestaan met opslibbing, waarbij grotere opslibbing wordt waargenomen op locaties met hogere SPM-gehaltenes.
- Voor de droogvalduur liggen de meeste punten, zoals verwacht, rond de 80% droogval. Er lijkt een zwakke relatie te zijn waarbij grotere opslibbing plaatsvindt op locaties met grotere droogvalduur (tot 85%).
- Voor de golfhoogte lijkt er geen duidelijk verband te zijn met de gemeten opslibbing, al zijn de voorkomende golfhoogtes (tussen 0,2 m en 0,4 m) allemaal binnen de bandbreedte waar veel kwelders voorkomen (d.w.z. voor grotere golfhoogtes wordt wel een verband verondersteld).

- Voor de hoogteligging van de kwelderrand kwam geen duidelijk verband naar voren met de gemeten opslibbing.



Figuur 5-2 Verband tussen opslibbing en het bodemslibgehalte op de voorliggende wadplaat (500m zeewaarts van de kwelderrand), waarbij in rood de vastelandskwelders zijn weergegeven en in blauw de eilandkwelders. De trendlijnen zijn bepaald met lineaire regressie en ter indicatie toegevoegd. Trendlijn voor de vastelandskwelders wordt beschreven door: $y=1.967 + 0.112x$ met $r^2=0.03$, en voor de eilandkwelders door: $y=0.324 + 0.135x$, met $r^2=0.06$. Trendlijn voor alle data wordt beschreven door: $y=1.211 + 0.132x$ met $r^2=0.05$.

6 Zoekkaart herstelpotentie kwelders na ingrepen

In dit hoofdstuk is op basis van beschikbare literatuur, data uit modellen en metingen en expertbeoordeling een verkennende zoekkaart opgesteld als indicatie voor locaties om maatregelen toe te passen ten behoeve van kwelderdynamiek.

6.1 Methode

Voor de vastelandskwelders in de Waddenzee (exclusief Eems-Dollard estuarium) is een inschatting gemaakt voor de geschiktheid om de maatregelen 'afgraven van een gedeelte van het kwelderareaal' en 'het niet onderhouden van rijshoutendammen' toe te passen. Deze inschatting is gemaakt op basis van de recente laterale ontwikkeling, de opslibbingsnelheid, de bestaande kwelderbescherming, de hoogteligging en kwelderbreedte, de sedimentbeschikbaarheid, de golfcondities, de bodemsamenstelling en de aanwezige kweldervegetatiezones. Hierbij is een hoge potentiescore toegekend aan gebieden met een groot autonoom herstelvermogen in kwelderhoogte en/of -areaal en een lage score voor locaties waar waakzaamheid geboden is voor het toepassen van dergelijke maatregelen vanwege een beperkt herstelvermogen (bijvoorbeeld beperkte kwelderbreedte, erosie of terugtrekking bestaande kwelder). Voor de eilandkwelders zijn deze aspecten niet in detail bekeken en is de geschiktheid voor de maatregelen meer in het algemeen beoordeeld.

6.2 Resultaten

Deze expertinschatting is bedoeld als eerste verkenning voor de toepasbaarheid van de voorgestelde maatregelen ten behoeve van kwelderdynamiek. Alvorens een maatregel kan worden toegepast moet meer locatie-specifiek gekeken worden en nog een ontwerp worden uitgewerkt. Daarnaast moeten gesprekken met belanghebbenden in de omgeving worden gevoerd en worden bepaald wat er met de afgegraven klei gebeurt. Verder wordt afgeraden om beide maatregelen gecombineerd toe te passen, omdat dan de invloed van de afzonderlijke maatregelen niet waarneembaar is. De resultaten van de expertbeoordeling zijn samengevat in Figuur 6-1, Figuur 6-2 en Tabel 6-1.

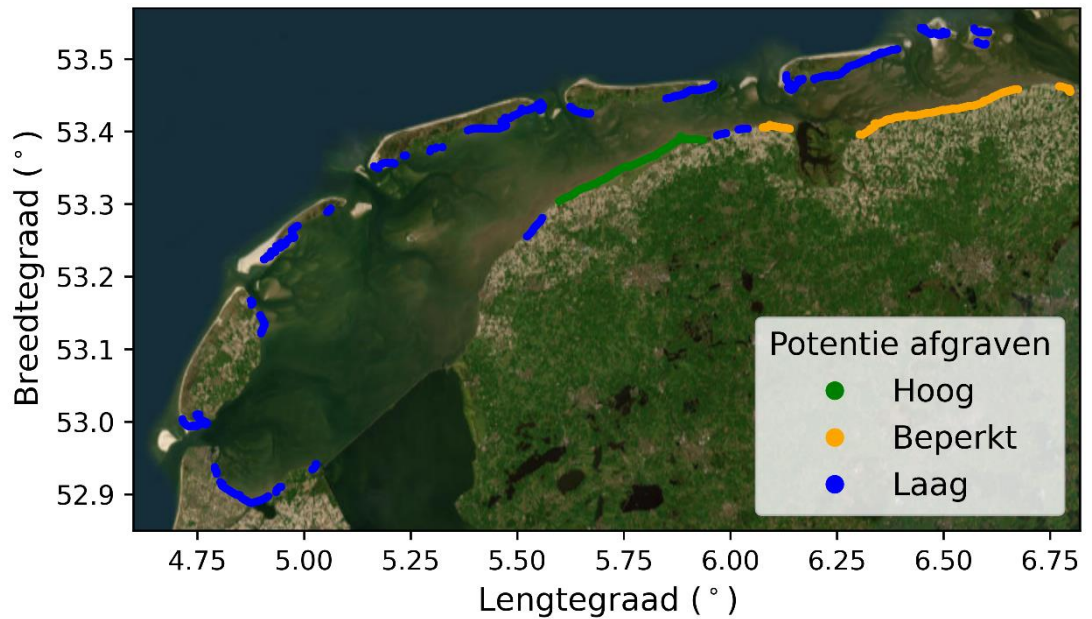
De kwelders van het Balgzand (Kooijhoekschor, Van Ewijcksluisschor, Normerven en Den Oever) zijn vrij stabiel en niet erg breed. De rijshoutendammen aan de westzijde zijn relatief nieuw (geplaatst in 2010-2011). Daarom worden beide maatregelen hier afgeraden.

Ook bij Westhoek en Zwarte Haan zijn de kwelders slechts 0 tot 200 m breed. Vanwege de zeer sterke groei van wadplaten als reactie op de afsluiting van de Zuiderzee is de verwachting dat de kwelders hier op natuurlijke wijze zich verder zullen ontwikkelen. De verschillende kwelderzones (pré-pionier, pionier, lage, midden en hoge kwelder) zijn momenteel nog vrij smal. Dit maakt afgraven niet aantrekkelijk, gezien het om relatief kleine oppervlaktes gaat die binnen een kwelderzone een vrij groot deel verstoren. Er zijn geen kwelderwerken aanwezig. Hier wordt afgraven afgeraden en is onderhoud van de kwelderwerken niet van toepassing.

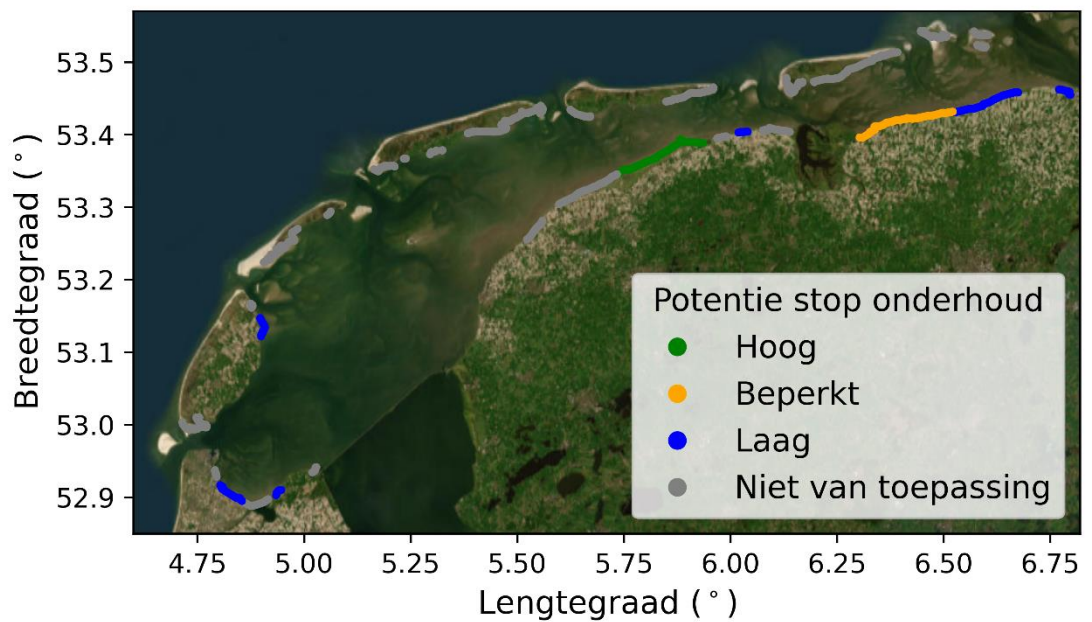
Bij de grote, brede kwelders van Noord Friesland Buitendijks is de potentie voor herstel na afgraven, door aanslibbing, hoog. Hier breiden de hoge kwelderzones uit, is de opslibbing voldoende hoog en is voldoende accommodatieruimte aanwezig, waardoor herstel na afgraven aannemelijk is. Wel is van belang dat de verbinding met de Waddenzee goed wordt aangebracht, zodat er sedimentaanvoer plaatsvindt. Dit gebied biedt ook potentie om te stoppen met het onderhoud van de rijshoutendammen.

De buitenste rijshoutendammen worden hier al sinds 1991 niet meer onderhouden. In het westelijke gedeelte (tot Noorderleech) worden de achterliggende dammen ook niet meer

onderhouden sinds 2006. In het middelste en oostelijke gedeelte zou dit ook kunnen worden overwogen, alhoewel de meest landwaarts gelegen rijshoutendammen ten oosten van de pier bij Holwerd al grotendeels onder het maaiveld liggen. Daarmee is de beschermende werking en waarde voor sedimentinvang inmiddels minimaal.



Figuur 6-1 Potentiekaart voor areaal- of hoogteherstel na het afgraven van een kwelder. Deze kaart is opgesteld op basis van expertinschatting en is bedoeld als eerste verkenning voor de toepasbaarheid van de voorgestelde maatregel ten behoeve van kwelderdynamiek. Alvorens een maatregel kan worden toegepast moet meer locatie-specifiek gekeken worden en nog een ontwerp worden uitgewerkt.



Figuur 6-2 Potentiekaart voor areaal of hoogte herstel na het stopzetten van onderhoud aan rijshoutendammen. Deze kaart is opgesteld op basis van expertinschatting en is bedoeld als eerste verkenning voor de toepasbaarheid van de voorgestelde maatregel ten behoeve van kwelderdynamiek. Alvorens een maatregel kan worden toegepast moet meer locatie-specifiek gekeken worden en nog een ontwerp worden uitgewerkt.

't Schoor is een kleine, vrij stabiele kwelder. Hier wordt afgraven afgeraden door de geringe breedte en de reeds aanwezige pioniervegetatie. Kleinschalige afgravingen zijn eventueel wel mogelijk, aangenomen dat de huidige randbescherming in stand wordt gehouden. Er zijn geen kwelderwerken aanwezig, dus onderhoud stoppen is niet van toepassing. Bij Wierum trekt de kwelder op dit moment terug en zijn recent kwelderwerken geplaatst. Hier worden beide maatregelen dan ook afgeraden.

Bij Peazemerlannen breidt de kwelder in het oostelijke gedeelte uit en vindt hoge opslibbing plaats (8-15 mm/jaar, ondanks bodemdaling van 3 mm/jaar). De kwelder is vrij breed met een maximale breedte van 800 m. Het slibgehalte is met 40% wel wat lager dan op andere Friese kwelders. Waar rond 1997 nog een zeer gevarieerde vegetatie aanwezig was met o.a. lage kweldervegetatie en zeekweek, was deze variatie anno 2007 sterk afgenomen door het ontbreken van beweiding (Van Duin, 2018). Er staat op dit moment vrijwel uitsluitend climaxvegetatie achter de doorgebroken asfaltdijk met een klein strookje pioniervegetatie. De condities zijn daarmee redelijk geschikt om af te graven, maar er zijn de afgelopen jaren verschillende ingrepen gedaan aan deze kwelder, waaronder het toelaten van meer instroom in de zomerpolder, vernatting en het graven van een broedeiland. Het lijkt daardoor verstandig om het effect van deze ingrepen eerst af te wachten. Mogelijk is er daarna zeewaarts van deze ingrepen ruimte voor een afgraving.

De Groninger kwelders breiden licht uit en hebben een opslibbing van 7 à 8 mm/jaar. Ze liggen met een hoogte van 1,2-1,4 m NAP niet direct lager dan de Friese kwelders, maar door de grotere getijslag wel relatief lager ten opzichte van de hoogwaterlijn. Mogelijk verklaart dat deels de lagere opslibbing, in combinatie met de ontwikkeling van het voorliggende wad, de recentere geschiedenis van indijken en verkweldering, en mogelijk ook inklinking door beweiding. Er staat veel lage kweldervegetatie. De breedte varieert van 200-1000 m in het westelijke deel, tot 200-700 m in het middelste gedeelte en 0-900 m in het oostelijke deel. Sedimentconcentraties zijn aan de westelijke kant vergelijkbaar met de Friese kwelders, maar nemen in het middelste gedeelte af. Door de relatief grote lage kwelderzones is afgraven hier minder doelmatig en door de lagere opslibbing en wisselende breedte en sedimentbeschikbaarheid is de herstelpotentie onduidelijk. In het westelijke deel is ook de locatie van de winterdijk van belang voor de ruimte om af te graven. De conclusie voor afgraven is dan ook onduidelijk, hier zal in meer detail naar de lokale mogelijkheden moeten worden gekeken. Van de kwelderwerken worden de buitenste dammen sinds 2001 niet meer onderhouden. In de voorste onbegroeide bezinkvakken zijn sindsdien natuurlijke kreekpatronen ontstaan (zie satellietbeelden in bijlage E) en lijkt vegetatie zich te vestigen/ontwikkelen. Desondanks is een relatie tussen stoppen met onderhoud en de vorming van deze patronen niet bewezen. Voor de westelijke en middelste gedeeltes is veel lokaal verschil in kwelderbreedte, -vegetatie en aanwezige dammen en zal in meer detail moeten worden gekeken of het onderhoud van de resterende dammen gestopt kan worden. Hierbij is van belang om lokale hoogteverschillen in kaart te brengen (inclusief informatie over de aanwezige kweldervegetatie). Voor het oostelijke deel raden we af om te stoppen met het onderhoud van de overgebleven dammen, vanwege het risico op lokale klifvorming. Hier is op sommige locaties al een klif waarneembaar tegen de rijshoutendam. Kliferosie hoeft geen probleem te zijn als dit bijdraagt aan de verjonging, maar is wel een indicator dat er weinig tot geen (natuurlijk) herstel kan worden verwacht.

De oorzaak van veroudering is op eilandkwelders van andere aard dan bij vastelandkwelders. Op de eilandkwelders zijn de abiotische condities ook duidelijk anders ten opzichte van de vastelandkwelders: sedimentconcentraties zijn relatief laag, de gemeten kwelders op Ameland en Schiermonnikoog hebben ook lagere opslibbing, de bodemsamenstelling is vrij zandig (bodemslibgehalten zijn relatief laag) en er staan vrijwel nergens rijshoutendammen. Daarom raden we in het algemeen af om de eilandkwelders af te graven of – voor zover van toepassing – het onderhoud aan de kwelderwerken te stoppen. Bovendien zijn de eilandkwelders relatief natuurlijk, waardoor de maatregel ook minder

doelmatig zouden zijn. Eilandkwelders hebben meer hinder van vernatting en verzoeting, omdat ze nauwelijks meegroeien en steeds meer zoete kwel krijgen uit hoger wordende duincomplexen. Dit kan mogelijk worden tegengegaan door herstel van verstuing. Voor de grotere kweldergebieden op de eilandstaarten kan eventueel worden gedacht over een *wash-over* experiment vanuit Noordzeezijde (pers. comm. Ernst Lofvers, oktober 2024).

Tabel 6-1 Overzicht van de resultaten van de expertbeoordeling met in de laatste twee kolommen conclusies voor de maatregelen 'afgraven' en 'stoppen onderhoud kwelderwerken' voor de vastelandskwelders. De kleuren betekenen: groen = kansrijk; oranje = onduidelijk/meer informatie benodigd; rood = niet kansrijk; grijs = niet van toepassing. Ontbrekende informatie in de tabel is niet ingevuld omdat deze niet nodig was om tot de conclusie te komen.

Naam kwelder	10-jarige laterale ontwikkeling	Recente opslibbing (mm/j)	Kwelder-bescherming	Hoogte- & breedte-licging	Sediment-aanbod	Golfcondities (gem & 99%)	Bodemsamenstelling	Aanwezige kwelder-vegetatie-zones	Conclusie voor afgraven	Conclusie voor stoppen onderhoud kwelderwerken
Balgzand - Kooijhoekschor en Van Ewijksluisschor	Vrij stabiel		Kribben (vrij nieuw)	Niet erg breed					Kwelder is al niet erg breed	Rijshoutendammen zijn vrij nieuw
Balgzand - Normerven	Vrij stabiel		Kwelderwerken	Niet erg breed					Kwelder is al niet erg breed	Kwelder is al niet erg breed
Balgzand - Den Oever	Vrij stabiel		Havenhoofd	Niet erg breed					Kwelder is al niet erg breed	N.v.t. (geen kwelderwerken)
Westhoek	Uitbreiding	18 mm/j (2018-2023)	Strekdam	Hoogte: 1,20 m (1,30-1,40 m lage kwelder) Breedte: 0-200 m	Max. SSC hoog (3-5 g/L). Veel accommodatie-ruimte, afstand tot geul vrij groot. Vraag over ontwateren en consolideren.	Hs,gem = 7-10 cm Hs,99%= 0,4m	60-70% slib	Pioniervegetatie, riet (weinig zoute climax)	Vrij natuurlijke kwelder. Kwelder te smal om af te graven. Waardevol ecosysteem.	N.v.t. (geen kwelderwerken)
Zwarte Haan	Stabiel	14 mm/j	Geen kwelderwerken	Hoogte: 1,3-1,4 m (lage kwelder) Breedte: 0-200 m	Max. SSC hoog (3-5 g/L)	Hs,gem = 7-10 cm Hs,99%= 0,4m	60-70% slib	Van brak tot pionier	Kwelder te smal om af te graven.	N.v.t. (geen kwelderwerken)

Naam kwelder	10-jarige laterale ontwikkeling	Recente opslibbing (mm/j)	Kwelderbescherming	Hoogte- & breedte- ligging	Sediment- aanbod	Golfcon- dities (gem & 99%)	Bodemsaa- menstelling	Aanwezige kwelder- vegetatie- zones	Conclusie voor afgraven	Conclusie voor stoppen onderhoud kwelder- werken
Noord Friesland Buitendijks West (ten westen van Noorderleech)	Vrij stabiel laatste 20 jaar. Kleine uitbreiding (?)	9 mm/j (3 ^e bezinkveld geen opslibbing meer)	Sloten, kwelder- werken en zomerdijk	Hoogte: 1,5m Breedte: 200-1600 m (incl. zomer- polders)	Max. SSC relatief hoog (2-3 g/L). Aanvoer slib naar achterzijde kwelder laag door grote breedte	Hs,gem = 7-10 cm Hs,99%= 0,4m	50-60% slib	Versteiling van zones. Pionier veranderd in lage kwelder. Meer pionier richting dijk (badkuipeffect)	Voldoende ruimte. Hoge kwelderzones breiden uit. Opslibbing voldoende hoog. Let op verbinding voor sediment-aanvoer.	N.v.t. (Kwelderwerken worden al niet meer onderhouden sinds 2006)
Noord Friesland Buitendijks Midden (Noorderleech tot Holwerd)	Lichte uitbreiding (sinds 1990)	10,7 mm/j, neemt af richting zomer-dijk	Sloten, kwelder- werken en zomerdijk	Hoogte: 1,2 m gem. Breedte: 1500-1800 m (excl. Zomerpolder s), 3km (met zomerpolder s)	Max. SSC = 1-3 g/L	Hs,gem = 7-10 cm Hs,99%= 0,3m	50-60% slib	Redelijke mix. Lage kwelder, hoge kwelder. Minder badkuipeffect aanwezig.	Voldoende ruimte. Hoge kwelderzones breiden uit. Opslibbing voldoende hoog. Let op verbinding voor sediment-aanvoer.	Buitenste dammen worden al niet meer onderhouden sinds 1991. Onderhoud achterliggende dammen overwegen te stoppen (mits/maar)
Noord Friesland Buitendijks Oost (Holwerd oostwaarts)	Stabiel tot uitbreiden d (tot jaren 1990 uitbreiden d, daarna wisselend, klein beetje uitbreiden d)	10 mm/j (afhankelijk van begrazing: 3 mm/j)	Sloten, kwelderwe rken en zomerdijk	Hoogte: onbekend Breedte: 0- 1500 m (18 ha, veel kleiner dan NFB west en midden)	Max. SSC heel hoog (3-6 g/L)	Hs,gem = 7-10 cm Hs,99%= 0,3m	50-70% slib	Pionierzone verschilt jaar-tot-jaar. Kwelderzon e breidt langzaam uit. Aandeel middenkwel der met zeekweek is heel hoog.	Bij de dam wat ruimte om af te graven, maar oostwaarts neemt de breedte af	Buitenste dammen niet meer onderhouden sinds 1991. Achterste dammen grotendeels onder maaiveld. Onderhoud middelste dammen stoppen (mits/maar)

Naam kwelder	10-jarige laterale ontwikkeling	Recente opslibbing (mm/j)	Kwelderbescherming	Hoogte- & breedteligging	Sedimentaanbod	Golfcondities (gem & 99%)	Bodemsamenstelling	Aanwezige kweldervegetatiezones	Conclusie voor afgraven	Conclusie voor stoppen onderhoud kwelderwerken
't Schoor	Stabiel/kleine uitbreiding ; terugtrekking in oostelijk deel leidend tot klifvorming	onbekend	Sloten, pier en zomerdijk	Hoogte: onbekend (vrij laag) Breedte: 300 m				Zeekweek en wat pionierkwelder	Heel kleine kwelder	
Wierum	terugtrekking leidend tot klifvorming	Nog niet gemeten	Sloten, pier en zomerdijk. Recent kwelderwerken geplaatst.	Hoogte: onbekend Breedte: onbekend					Terugtrekkende kwelder	Kwelderwerken recent geplaatst
Peazemerlanden	Uitbreiding oostelijk deel	Hoge opslibbing: 8-15 mm/j (bodemdaling 3 mm/j)	Sloten, pier en zomerdijk	Hoogte: onbekend Breedte: max. 800m			neemt sterk af (tot 40% slib)	Bijna alleen maar climaxvegetatie. Klein strookje pionierzone waar onbeschermd van dijk.	Reeds andere ingrepen, eerst laten ontwikkelen (mogelijk zeewaarts daarvan ruimte voor ontgraving)	N.v.t. (oud voorliggend dijke, creëert nog luwte; daarvoor oude rijshoutendammen niet langer onderhouden)

Naam kwelder	10-jarige laterale ontwikkeling	Recente opslibbing (mm/j)	Kwelderbescherming	Hoogte- & breedte- ligging	Sediment- aanbod	Golfcon- dities (gem & 99%)	Bodemsaa- menstelling	Aanwezige kwelder- vegetatie- zones	Conclusie voor afgraven	Conclusie voor stoppen onderhoud kwelder- werken
Groninger kwelders West	Uitbreiding	8 mm/j	Sloten en kwelderwerken	Hoogte: 1,3-1,5 m (wat lager t.o.v. hoogwater) Breedte: 200-1000m	Westelijke kant vergelijkbaar met Friesland Max. 3-4 g/L, oostwaarts afname	Hs,gem = 7-10 cm Hs,99%= 0,35m Grotere Hs op westelijke uiteinde		Veel lage kwelder. Tot 1 ^e of 2 ^e dam vegetatie	Wat lagere opslibbing. Minder doelmatig (Let op locatie winterdijk voor hoeveelheid ruimte voor afgraving)	Lokale verschillen in vegetatie en dammen. Buitenste dam sinds 2001 niet meer onderhouden
Groninger kwelders Midden	Uitbreiding	6,7 mm/j	Kwelderwerken	Hoogte: 1,2-1,4 m (wat lager t.o.v. hoogwater) Breedte: 200-700 m	Relatief wat lager (1-2 g/L)	Hs,gem = 7-10 cm Hs,99%= 0,35m		Veel lage kwelder. Tot 1 ^e of 2 ^e dam vegetatie	Lagere opslibbing. Minder doelmatig (ruimte is de vraag)	Buitenste dam sinds 2001 niet meer onderhouden
Groninger kwelders Oost	Uitbreiding	~8 mm/j	Kwelderwerken	Hoogte: 1,4 m (wat lager t.o.v. hoogwater) Breedte: 0-900m	Neemt weer wat toe	Hs,gem = 7-10 cm Hs,99%= 0,35m		Veel lage kwelder. Tot 1 ^e of 2 ^e dam vegetatie	Lagere opslibbing. Minder doelmatig (ruimte is de vraag)	Buitenste dam sinds 2001 niet meer onderhouden. Voorzichtig met stoppen onderhoud overige dammen zijn, vanwege risico op klifvorming op sommige plekken

7 Discussie

De potentie om lokaal stukken kwelder af te graven en om het onderhoud aan de kwelderwerken te stoppen ten behoeve van kwelderdynamiek, is in deze studie in kaart gebracht op basis van een kwantitatieve analyse van beschikbare gegevens (Hoofdstukken 4 en 5) en een kwalitatieve expertbeoordeling (Hoofdstuk 6). In paragraaf 7.1 worden de methode en interpretatie van de resultaten van de kwantitatieve analyse besproken. Aandachtspunten over de methode en resultaten van de expertbeoordeling komen aan bod in paragraaf 7.2. Tot slot worden een aantal praktische overwegingen voor kwelderbeheer besproken in paragraaf 7.3.

7.1 Kwantitatieve analyse

De kwantitatieve analyse was gericht op abiotische randvoorwaarden voor kweldergroei: hoogteligging, inundatietijd, sedimentbeschikbaarheid, golfcondities en bodemsamenstelling. Andere factoren die van belang kunnen zijn voor kwelderdynamiek en herstel na maatregelen zijn nutriënten, consolidatie en het lange termijn onderhoud van andere structuren (naast de rijshoutendammen). Deze aspecten zijn buiten beschouwing gelaten in deze studie omwille van de focus op beschikbare abiotische parameters.

De abiotische randvoorwaarden zijn in deze studie bepaald langs de randen van de Waddenzee op basis van beschikbare meetgegevens of modeluitvoer. Vanwege de hoge resolutie langs de kust van 100 m ontstaat er ruimtelijke afhankelijkheid tussen de locaties, wat vanuit statistische perspectief geen representatieve (onafhankelijke) vergelijking geeft. Desondanks is voor deze hoge resolutie gekozen om gedetailleerde informatie te hebben voor de vergelijking met lokale opslibingsmetingen. Daarnaast zijn de gekozen parameters deels wederzijds afhankelijk (bijv. hoogteligging en inundatietijd). De abiotische randvoorwaarden zijn dus beschouwd op basis van de huidige, volgroeide kwelders. De abiotische condities na een maatregel (afgraving of stoppen met het onderhoud van rijshoutendammen) kunnen wezenlijk anders zijn. Dit is niet meegenomen in de huidige aanpak, er is dus (ten onrechte) aangenomen dat de maatregel geen invloed zal hebben op de abiotische condities.

Voor de sedimentconcentraties in de waterkolom (SPM) zijn in de analyse tijdsgemiddelde waarden en 99-percentielwaarden op de voorliggende wadplaat gebruikt. Een meer representatieve waarde voor de opslibing kan worden afgeleid door de sedimentconcentratie alleen te bepalen voor momenten waarop de kwelder onder water staat, aangezien dat de momenten zijn waarop potentieel sedimentatie kan plaatsvinden. Hierdoor zal vanwege stormopzet het relatieve belang van stormcondities groter zijn, als de sedimentconcentraties relatief hoog zijn.

Uit een vergelijking van de gemeten opslibing in de kweldervakken met bodemslibgehalten, blijkt dat er zowel hogere als lagere opslibing (of zelfs netto verlaging) wordt waargenomen voor slibrijke kwelders, met ook grote variaties tussen de opslibing in afzonderlijke jaren. De zandigere eilandkwelders zijn stabiel, maar kennen gemiddeld een lagere sedimentatie (Figuur 5-2). Dit komt overeen met algemene inzichten uit literatuur (o.a. Elsschot et al., 2020) en uit het veld. Vermoedelijk is er geen sprake van een causaal verband tussen bodemslibgehalte en opslibing, maar heeft dit te maken met de verschillen in ontstaansgeschiedenis (aanleg stuifdijken), oriëntatie en mate van blootstelling/beschutting tijdens stormcondities tussen vastelands- en eilandkwelders.

Voor de droogvalduur op de voorliggende wadplaat blijkt een zeer scherp onderscheid op locaties met en zonder kwelders. Er is dus vooral een sterke samenhang met kweldervoorkomen (positief verband tot ongeveer 80% droogval), maar het verband met de gemeten opslibbing was niet eenduidig. Mogelijk komt dit door het beperkte aantal opslibbingsmetingen en door de grote jaarlijkse variatie in opslibbing.

Voor de andere parameters zijn geen eenduidige verbanden gevonden, vanwege twee redenen: (1) de beperkte hoeveelheid beschikbare en geschikte meetpunten in verhouding tot het grote aantal locaties waarvoor de randvoorwaarden zijn bestudeerd; en (2) doordat er veel overlap zit tussen (slibrijke) kwelders met ingrepen (met name kwelderwerken) en opslibbingsmetingen aan de vastelandskust enerzijds en zandige eilandkwelders zonder ingrepen en zonder opslibbingsmetingen anderzijds. Op basis van de beschreven literatuur en de data analyse kan enkel speculatief een verwachting worden geschetst voor de andere abiotische randvoorwaarden:

- dat er een optimum bestaat van sedimentbeschikbaarheid voor kweldergroei. Tot op zekere hoogte leidt een hogere sedimentconcentratie tot hogere opslibbing. Een sedimentoverschot kan echter ook belemmerend zijn voor kweldergroei door onvoldoende consolidatie (sterkteontwikkeling; Cao et al., 2021) of verminderde ontkieming (Cao et al., 2018).
- dat de meeste kwelders reeds op locaties liggen met milde golfcondities, waardoor waargenomen het verband tussen de golfhoogte en de opslibbing niet erg sterk is (er worden immers geen opslibbingsmetingen gedaan op locaties zonder kwelders).
- dat de hoogteligging van de kwelderrand niet de meest representatieve waarde geeft. Beter zou zijn om de gemiddelde hoogte van de kwelder te nemen ten opzichte van de lokale hoogwaterlijn, aangezien de getijslag sterk verschilt over de Waddenzee (d.w.z. in de oostelijke Waddenzee is de maximale getijslag ongeveer twee keer zo groot als in westelijke Waddenzee).

De kwantitatieve analyse is vooral gericht op het voorkomen van kwelders en op verbanden met gemeten opslibbing. Dit geeft vooral inzicht in de huidige kwelderdynamiek, maar slechts beperkt inzicht in het herstel na een ingreep. Door de beperkte ervaring met eerdere afgravingen is het niet mogelijk om hier op basis van beschikbare gegevens uitspraken over te doen.

7.2 Expertbeoordeling

Door de inzichten uit eerdere onderzoeken, veldmetingen en de kwantitatieve analyse uit dit rapport te combineren, kon op basis van expertbeoordeling een zoekkaart worden opgesteld voor toepassing van de maatregelen 'afgraven van een gedeelte van het kwelderareaal' en 'het niet onderhouden van rijshoutendammen'. Hierbij is voor Peazemerlannen en de Groninger kwelders aangegeven dat lokale condities in meer detail onderzocht moeten worden.

Mogelijke aanvullende onderzoeksmethoden die voort kunnen bouwen op de inzichten uit deze studie zijn:

- het modelleren van kwelderafgraving en -herstel (en mogelijke complicaties) in een analytisch kweldermodel;
- het monitoren van recent uitgevoerde afgravingen en andere ingrepen, o.a. afgravingen in Peazemerlannen voor Deltagoot experiment (één met verbinding naar Waddenzee, één zonder verbinding); vogelbroedeilanden Holwerd en Peazemerlannen; voortgang van monitoring Terp van de Toekomst bij Blije; polder Breebaart; inzichten rond jaarlijks greppelen; Klutenplas; Dubbele Dijk; vispassage Vierhuizergat; ervaringen uit Duitsland, (o.a. bij Leybucht).

7.3 Praktische overwegingen voor kwelderbeheer

7.3.1 Stopzetten onderhoud rijshoutendammen

Op verschillende plaatsen is het onderhoud aan de rijshoutendammen al gestopt, zoals per locatie beschreven in Hoofdstuk 6. De effecten hiervan op de Friese kwelders lijken voorsnog beperkt, al zijn langetermijneffecten nog niet meetbaar. Naar verwachting zal door het stopzetten van het onderhoud de golfhoogte na verloop van tijd toenemen. Dit kan leiden tot minder opslibbing en mogelijk tot erosie van de kwelderrand en pionierzone totdat zich een nieuw (natuurlijker) evenwicht heeft gevormd tussen kwelder en wadplaat. Door erosie van de kwelderrand kan klifvorming plaatsvinden. Als er een nieuw evenwicht is bereikt, kan er weer ruimte ontstaan voor de ontwikkeling van een nieuwe pionierzone.

7.3.2 Lokaal afgraven van kwelders

Een aantal reeds uitgevoerde afgravingen, waaronder de Terp van de Toekomst, laten sedimentatie zien. Hieruit zijn een aantal belangrijke praktische lessen geleerd voor de uitvoering van deze maatregel:

- Het af te graven gedeelte van de kwelder moet beschermd zijn tegen golven (door een uitgebreide en hooggelegen wadplaat, een bestaande kwelder of door randbescherming), zie Van Wesenbeeck et al. (2014). Afgraving op de zeewaartse kwelderrand wordt afgeraden (dit is overigens veelal pionierzone of een al bestaande klif, dus niet aantrekkelijk om af te graven).
- De afgegraven kwelder moet een goede verbinding hebben met de voorliggende wadplaat, zodat deze tijdens stormen overstroomt en opslibt en zodat de kwelder kan afwateren via een kreek.
- Naar verwachting is de opslibbingsnelheid vergelijkbaar met de naastliggende kwelder, ondanks dat de afgegraven kwelder een lager maaiveld heeft. Het is van belang dat de opslibbingssnelheid op de kwelder voor aanvang van de afgraving bekend is om een goede referentiewaarde te hebben.
- In Duitsland is ervaring met het afgraven van kwelders tot de diepte van de gewenste vegetatietype (o.a. in de Leybucht) en lijkt dit uiterst succesvol (pers. comm. Jurre de Vries, oktober 2024).
- Het herstel van de kwelder zal sneller zijn als er geen vee overheen loopt. Het vee zorgt voor extra compactie, wat leidt tot minder opslibbing (Koppenaar et al., 2022) en langzamer herstel.
- Het afgraven van kwelders kan lokaal ook gevolgen hebben voor de waterveiligheid, met name waar het voorland is meegenomen in het dijkontwerp. Dit is een aandachtspunt om mee te nemen in het lokale, gedetailleerde ontwerp van een kwelderafgraving.

8 Conclusie

8.1 Bevindingen

Om de ecologische dynamiek op de kwelders te bevorderen worden in het Natura 2000 beheerplan als mogelijke maatregelen genoemd om lokaal stukken kwelder af te graven of te plaggen, of om het onderhoud aan de kwelderwerken te stoppen. Rijkswaterstaat wil inzicht krijgen op welke locaties deze maatregelen kansrijk zijn om verjonging van verouderde kwelders mogelijk te maken. In deze studie is daarom de potentie voor beide maatregelen in kaart gebracht op basis van een kwantitatieve analyse van beschikbare gegevens en een kwalitatieve expertbeoordeling.

De belangrijkste abiotische randvoorwaarden voor kweldergroei (hoogteligging, inundatiefrequentie, sedimentbeschikbaarheid, golfcondities en bodemsamenstelling) zijn bepaald langs de randen van de Waddenzee op basis van beschikbare meetgegevens of modeluitvoer. Uit een vergelijking met de hoogtemetingen in de kweldervakken blijkt dat alleen de bodemsamenstelling een duidelijk verband heeft met de opslibbing: voor toenemende bodemslibgehalten (vooral langs de vastelandskust) wordt meer variatie in jaarlijkse opslibbing waargenomen, waarbij grote variaties tussen afzonderlijke jaren bestaan. De zandigere eilandkwelders blijken stabiel, maar kennen gemiddeld ook lagere sedimentatie, al is onduidelijk of er sprake is van een causaal verband. Voor de andere geanalyseerde parameters (hoogteligging, inundatietijd, sedimentbeschikbaarheid, golfhoogte) zijn geen eenduidige en statistisch significante verbanden naar voren gekomen uit de analyse.

Op basis van alle beschikbare gegevens is middels expertbeoordeling een verkennende zoekkaart opgesteld als indicatie voor locaties om maatregelen toe te passen ten behoeve van kwelderdynamiek. De meeste potentie voor herstel na afgraven lijkt aanwezig bij de grote, brede kwelders bij Noord-Friesland Buitendijks. Hier breiden de hoge kwelderzones uit, is de opslibbing voldoende hoog en is voldoende accommodatieruimte aanwezig voor herstel na afgraven. Achterin de kwelder, achter de zomerkades is de opslibbing echter beperkt, doordat deze delen nauwelijks nog overstroomd. Belangrijke overwegingen voor de selectie van de precieze locatie zijn de lokale hoogteligging (laaggelegen locaties vermijden), lokale ecologische waarde (enkel hoge kweldervegetatie afgraven) en de mate waarin gebruik kan worden gemaakt van bestaande waterlopen naar de voorliggende wadplaat, zodat er sedimentaanvoer plaatsvindt naar het afgegraven gebied.

Mogelijk kan het afgraven ook als maatregel worden toegepast bij Peazemerlannen, al zijn daar reeds verschillende ingrepen gedaan, waarvan het effect beter eerst kan worden afgewacht. Voor de Groninger kwelders is de potentie voor afgraven nog onvoldoende duidelijk door grote lokale variaties in breedte en sedimentbeschikbaarheid en door de relatief lagere opslibbing. De lokale mogelijkheden voor afgraven moeten hier in meer detail worden bekeken. Op de overige Friese kwelders en op het Balgzand wordt afgraven als maatregel afgeraden, vanwege beperkte breedte, geringe herstel mogelijkheden of gebrek aan doelmatigheid. Op de eilandkwelders wordt, door de verschillen in abiotische condities en andere aard van de veroudering, afgeraden om af te graven en kunnen beter maatregelen tegen verzoeting worden genomen.

Noord-Friesland Buitendijks biedt ook potentie om te stoppen met het onderhoud van de rijshoutendammen. De buitenste rijshoutendammen worden hier al sinds 1991 niet meer onderhouden. In het middelste en oostelijke gedeelte kan dit ook voor de achterliggende

dammen worden overwogen. Mogelijk kan ook op de Groninger kwelders het onderhoud aan de resterende kwelderwerken worden gestopt, al moet dit (net als voor het afgraven) ook lokaal in meer detail worden onderzocht door de grote variabiliteit in kwelderbreedte, vegetatie en dammen. Aan de oostzijde van de Groninger kwelders wordt afgeraden om te stoppen met het onderhoud van de dammen vanwege het risico op klifvorming, waardoor er weinig tot geen (natuurlijk) herstel kan worden verwacht. Ook op het Balgzand en Wierum raden we af om het onderhoud aan de rijshoutendammen te stoppen, omdat deze relatief nieuw zijn (of bij Wierum zelfs recent geplaatst).

8.2 Aanbevelingen

Op basis van de expertbeoordeling van deze verkennende studie is de potentie voor toepassing van zowel de maatregel om lokaal stukken kwelder af te graven, als het onderhoud aan de kwelderwerken lokaal te stoppen, het grootst bij Noord Friesland Buitendijks. In deze studie is de potentie voor deze maatregelen echter alleen beschouwd vanuit de abiotische condities. Andere belangen, zoals de omgeving, natuurwaarde en hoogwaterveiligheid, moeten ook worden beschouwd in de besluitvorming over deze maatregelen. Een detailontwerp voor een afgraving moet nog worden uitgewerkt, alvorens deze maatregel kan worden toegepast. Het is aan te raden om het effect van uitgevoerde maatregelen nauwgezet te monitoren, zodat er van de ervaringen geleerd kan worden voor het optimaliseren van de maatregel. Mede daarom wordt afgeraden om beide maatregelen tegelijkertijd toe te passen, zodat de afzonderlijke effecten waargenomen kunnen worden.

Uit deze studie zijn verschillende aanbevelingen voortgekomen voor nader onderzoek:

- Er zouden meer inzichten uit de kwantitatieve, data-gedreven methode kunnen worden gehaald door een aantal randvoorwaarden specifiek te bepalen:
 - Kwelders ontstaan van nature alleen bij een voldoende grote en hoge voorliggende wadplaat. De morfologische ontwikkeling (zowel qua hoogte als qua breedte) van de voorliggende wadplaat kan dan ook worden toegevoegd aan de analyse, omdat deze sturend is voor de ontwikkeling van de kwelder en ook als lokale indicator kan dienen voor de sedimentbeschikbaarheid.
 - De oriëntatie van kwelders kan worden toegevoegd aan de analyse in combinatie met de dominante wind- of golfrichting tijdens stormen, waarmee de expositie tijdens stormcondities kan worden bepaald en meer duiding kan worden gegeven aan de gemeten opslibbing.
 - Voor de kwelderhoogte zou de relatieve hoogte ten opzichte van de hoogwaterlijn een duidelijker verband met de opslibbing kunnen geven, dan de absolute hoogteligging. Daarnaast zou de vorm van het dwarsprofiel als parameter kunnen worden toegevoegd, bijvoorbeeld aan de hand van de concaviteitsindex beschreven door Hanssen et al. (2024).
 - Voor de sedimentconcentraties in de waterkolom (SPM) zou naar verwachting een sterker verband met de opslibbing bestaan door sedimentconcentraties alleen te bepalen voor momenten waarop de kwelder onder water staat. Hiervoor is wel van belang dat de gebruikte modelresultaten de droogvalduur goed reproduceren. Daarom wordt aangeraden om de methode uit Van Weerdenburg & Hanssen (2023) te hanteren, waarbij de modelresultaten van het 2D D-Flow FM model van de Waddenzee worden geïnterpoleerd een bodemkaart met 20m resolutie (vergelijkbaar met de methode gebruikt voor Intertides).
 - De laterale ontwikkeling kan worden gekwantificeerd door de kwelderrand te bepalen voor verschillende historische situaties. Deze laterale ontwikkeling kan vervolgens worden vergeleken met de opslibbing.
- Er kan in meer detail worden gekeken naar verschillen tussen natuurlijke kwelders en kwelders met rijshoutendammen, alsook naar aanvullende locaties in de Duitse en

Deense Waddenzee om gradiënten in de dataset groter te maken voor een beter procesbegrip.

- Voor de westelijke Waddenzee en de eilandkwelders zijn er weinig tot geen gegevens beschikbaar over de opslibbing. Het is van belang om ook in deze gebieden de opslibbing te monitoren. Daarnaast zouden referentiemetingen van de opslibbing op kwelders zonder kwelderwerken helpen om een betere statistische vergelijking te maken tussen locaties met en zonder kwelderwerken.
- Om de data-gedreven methode meer te verweven met proceskennis zou het nuttig zijn om een aantal berekeningen te maken met een versimpeld analytisch model (te denken valt bijvoorbeeld aan bestaande kweldermodellen als 2DHydroMEM, MarshMorpho2D en mogelijk CMFT en WARMER-II). Hiervoor kan een versimpelde geometrie worden gebruikt met een representatieve dwarsdoorsnede voor een kwelder met en zonder een ingreep. Zo kunnen de randvoorwaarden uit Hoofdstuk 4 worden vergeleken met observaties om meer inzicht te krijgen in het belang van de afzonderlijke parameters en de combinatie van deze parameters.
- Het is nog onduidelijk wat het effect is van het stopzetten van het onderhoud van de rijshoutendammen op de kwelder. Er moet onderzocht worden hoe het beëindigen van dit onderhoud invloed heeft op de opslibbing en vegetatie, en hoe dit samenhangt met de beschikbaarheid van sediment. Dit betekent dat er in meer detail gekeken moet worden naar de ontwikkeling van de voorste kweldervakken na stopzetten van onderhoud aan de rijshouten dammen. Deze ontwikkeling kan vergeleken worden met locaties waar rijshouten dammen nog wel in onderhoud zijn. Zoals beschreven in paragraaf 6.2 zijn er in de afgelopen decennia natuurlijke kreekpatronen ontstaan in de voorste onbegroeide bezinkvakken voor de kust van Groningen-oost (zie ook bijlage E). Door verder uit te zoeken hoe deze patronen ontstaan zijn, ontstaat een blauwdruk voor het verkrijgen van een meer natuurlijke morfologische ontwikkeling in afgegraven kwelders.
- Voor de lange termijn ontwikkeling van kwelders is de sedimentbeschikbaarheid van groot belang. Deze wordt in belangrijke mate beïnvloed door de ontwikkeling van de voorliggende wadplaat. Er bestaat echter nog veel onduidelijkheid over de respons van wadplaten op verschillende scenario's van zeespiegelstijging: groeien wadplaten volledig of gedeeltelijk mee, of verdrinken wadplaten? Hier bestaat nog geen uitsluitend, maar deze onderzoeksvraag is van groot belang voor kwelderontwikkeling en kwelderbeheer op de lange termijn.
- In de zoekkaart is voor Peazemerlannen en de Groninger kwelders aangegeven dat lokale condities in meer detail onderzocht moeten worden. Hiervoor kunnen ook de bevindingen en adviezen van Van Duin (2018) in het kader van de NAM-kweldermonitoring worden meegenomen. Hierin werd o.a. aangeraden om beweiding toe te staan op de Peazemerlannen om meer variatie in de vegetatie te krijgen.
- Het verdient aandacht om de specifieke problematiek (verzoeting en weggevalen dynamiek) voor de eilandkwelders in meer detail te bekijken en om deze zoekkaart uit te breiden voor de kwelders in het Eems-Dollard estuarium.
- Tot slot liepen er tijdens deze studie verschillende wetenschappelijke en toegepaste onderzoeksprojecten die relevant zijn voor kwelderbeheer (o.a. Living Dikes, Saltgarden, Zuidgors, Gute Küste en Manabas) en verschillende veldtesten/pilots (o.a. afgegraven kwelderdelen voor Deltagootproef, voor de gootexperimenten van Möller et al. (2014) in Duitsland en met recente afgravingen in de Leybucht, zie Rupprecht et al. (2013)). De reeds beschikbare informatie uit deze onderzoeksprojecten is zoveel mogelijk

meegenomen in dit rapport. Nieuwe bevindingen die nog uit deze projecten gaan volgen na afronding van dit rapport kunnen van grote meerwaarde zijn voor het beheer van kwelders in de Waddenzee. Voor de veldtesten is van belang dat de effecten worden gemeten inclusief een goede nulmeting en referentiemeting.

Referentielijst

- Altenburg, W., Arts, G., Baretta-Bekker, J. G., van den Berg, M. S., van den Broek Broek, T., Buskens, R., Bijkerk, R., Coops, H. C., van Dam, H., van Ee, G., Evers, C. H. M., Franken, R., Higler, B., Ietswaart, T., Jaarsma, N., de Jong, D. J., Joosten, A. M. T., Klinge, M., Knoben, R. A. E., ... Walvoort, D. (2018). *Referenties en maatlatten voor natuurlijke watertypen voor de Kaderrichtlijn Water 2021-2027*. (Stowa rapport; No. 2018-49). STOWA. <https://edepot.wur.nl/469646>
- Balke, T., Stock, M., Jensen, K., Bouma, T. J., & Kleyer, M. (2016). A global analysis of the seaward salt marsh extent: The importance of tidal range. *Water Resources Research*, 52(5), 3775-3786.
- Baptist, M. J., Gerkema, T., Van Prooijen, B. C., Van Maren, D. S., Van Regteren, M., Schulz, K., ... & van Puijenbroek, M. E. B. (2019). Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor'. *Ecological Engineering*, 127, 312-323.
- Bijleveld, A.I., van Gils, J.A., van der Meer, J., Dekinga, A., Kraan, C., van der Veer, H.W., Piersma, T., 2012. Designing a benthic monitoring programme with multiple conflicting objectives. *Methods Ecol. Evol.* 3, 526–536.
- Billah, M. M., Bhuiyan, M. K. A., Islam, M. A., Das, J., & Hoque, A. R. (2022). Salt marsh restoration: an overview of techniques and success indicators. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(11), 15347-15363.
- Bockelmann, A.-C., Bakker, J. P., Neuhaus, R., & Lage, J. (2002). The relation between vegetation zonation, elevation and inundation frequency in a Wadden Sea salt marsh. *Aquatic Botany*, 73(3), 211–221. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00022-0)
- Bouma, T. J., Van Belzen, J., Balke, T., Van Dalen, J., Klaassen, P., Hartog, A. M., ... & Herman, P. M. J. (2016). Short-term mudflat dynamics drive long-term cyclic salt marsh dynamics. *Limnology and oceanography*, 61(6), 2261-2275.
- Cao, H., Zhu, Z., Balke, T., Zhang, L., & Bouma, T. J. (2018). Effects of sediment disturbance regimes on *Spartina* seedling establishment: Implications for salt marsh creation and restoration. *Limnology and Oceanography*, 63(2), 647-659.
- Cao, H., Zhu, Z., van Belzen, J., Gourgue, O., van de Koppel, J., Temmerman, O. S., ... & Bouma, T. J. (2021). Salt marsh establishment in poorly consolidated muddy systems: effects of surface drainage, elevation, and plant age. *Ecosphere*, 12(9), e03755.
- Colina Alonso, A., van Maren, D. S., Herman, P. M. J., van Weerdenburg, R. J. A., Huisman, Y., Holthuisen, S. J., ... & Wang, Z. B. (2022). The existence and origin of multiple equilibria in sand-mud sediment beds. *Geophysical Research Letters*, 49(22), e2022GL101141.
- Colina Alonso, A., van Maren, D. S., Oost, A. P., Esselink, P., Lepper, R., Kösters, F., ... & Wang, Z. B. (2024). A mud budget of the Wadden Sea and its implications for sediment management. *Communications Earth & Environment*, 5(1), 153.
- Corenblit, D., Steiger, J., Gurnell, A., & Tabacchi, E. (2007). Darwinian origin of landforms. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(13), 2070-2073.
- Crawford, J.T., Stone, A.G. Relationships Between Soil Composition and *Spartina Alterniflora* Dieback in an Atlantic Salt Marsh. *Wetlands* 35, 13–20 (2015). <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0588-0>
- de Groot, A., van Wesenbeeck, B., & van Loon-Steensma, J. (2013). *Stuurbaarheid van kwelders*. Wageningen: IMARES.
- de Vet, P. L. M., van Prooijen, B. C., Colosimo, I., Ysebaert, T., Herman, P. M. J., & Wang, Z. B. (2020). Sediment disposals in estuarine channels alter the ecomorphology of intertidal flats. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125, e2019JF005432. <https://doi.org/10.1029/2019JF005432>

- de Vriend, 1991. Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour, Part 1: physical processes. *Journal of Hydraulic Research* 29, p. 727-740.
- de Vries, B., Willemsen, P.W., van Puijenbroek, M.E.B., Coumou, L., Baptist, M.J., Cleveringa, J., Dankers, P., Elschot, K. (2021). Salt marsh pilot Marconi. Monitoring results. EcoShape report.
- Dijkema, K.S., 1987. Changes in salt-marsh area in the Netherlands Wadden Sea after 1600. In: Huiskes, A., Blom, C.W.P.M. & Rozema, J. (eds). *Vegetation between land and sea*. Dr. W. Junk Publishers, Dordrecht/Boston/Lancaster, pp. 42-49.
- Dijkema, K., Nicolai, A. D., de Vlas, J., Smit, C., Jongerius, H., & Nauta, H. (2001). *Van landaanwinning naar kwelderwerken*. ISBN 9036935830.
- Doody, J. (2008). *Saltmarsh conservation, management and restoration*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Elias, E.P.L. & Van der Spek, A.J.F., 2006. Long-term evolution of Texel Inlet and its ebb-tidal delta (the Netherlands). *Marine Geology* 225: 5–21.
- Elschot, K., Bakker, J. P., Temmerman, S., Van De Koppel, J., and Bouma, T. J. (2015). Ecosystem engineering by large grazers enhances carbon stocks in a tidal salt marsh. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 537, 9–21. doi: 10.3354/meps11447
- Elschot, K., Duin, W., Van De Groot, A. V., Dijkema, K. S., Sonneveld, C., Van Der Wal, J. T., et al. (2017). Chapter 4: Ontwikkeling kwelder ameland-oost; evaluatie bodemdalingsonderzoek 1986-2016 (Wageningen UR, Den Helder: Wageningen Marine Research). Available at: <https://edepot.wur.nl/425069>.
- Elschot, K., Van Puijenbroek, M., Lagendijk, D., Van der Wal, J.-T., & Sonneveld, C. (2020). Lange-termijnontwikkeling van kwelders in de Waddenzee (1960-2018). *Wageningen Marine Research*.
- Esselink, P., Petersen, J., Arens, S., Bakker, J., Bunje, J., Dijkema, K., . . . Wolters, M. (2009). Salt marshes: Thematic report no.8 . Common Wadden Sea Secretariat.
- Esselink, P. et al. *Wadden Sea Quality Status Report: Salt Marshes*. Tech. Rep. (2017).
- Esselink, P., van Duin, W. E., & Wielemaker, A. (2019). Variatie op de kwelder door beweiding: een handreiking aan natuurbeheerders. Puccimar.
- Hanssen, J. L., van Prooijen, B. C., & van Maren, D. S. (2024). The shape of fringing tidal flats in engineered estuaries. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1354716.
- Hoefsloot, G., J. Haringa & D. van Leeuwen. 2024. Monitoring vegetatie en opslibbing Terp fan de Takomst. Verslag meetjaar 2023. Rapport 24-125. Waardenburg Ecology, Culemborg.
- Houwing, E., Houwing, E.J., van Duin, W.E. et al. Biological and abiotic factors influencing the settlement and survival of *Salicornia dolichostachya* in the intertidal pioneer zone. *Mangroves and Salt Marshes* 3, 197–206 (1999). <https://doi.org/10.1023/A:1009919008313>
- Hu, Z., van Belzen, J., van der Wal, D., Balke, T., Wang, Z. B., Stive, M., & Bouma, T. J. (2015). Windows of opportunity for salt marsh vegetation establishment on bare tidal flats: The importance of temporal and spatial variability in hydrodynamic forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(7), 1450-1469.
- Hu, Z., Willemsen, P. W., Borsje, B. W., Wang, C., Wang, H., Van Der Wal, D., ... & Bouma, T. J. (2021). Synchronized high-resolution bed-level change and biophysical data from 10 marsh–mudflat sites in northwestern Europe. *Earth System Science Data*, 13(2), 405-416.
- Huismans, Y., Van der Spek, A., Lodder, Q., Zijlstra, R., Elias, E., Wang, Z.B., 2022. Development of intertidal flats in the Dutch Wadden Sea in response to a rising sea level: spatial differentiation and sensitivity to the rate of sea level rise. *Ocean Coast Manag.* 216, 105969. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105969>.
- Jentink, R. (2023). *Ontwikkeling kwelder en schorvegetaties Nederland, in de verschillende waterlichamen in Nederland, periode 1991-2020*. Rijkswaterstaat Centrale Informatievoorziening, Inwinning en Gegevensanalyse, Gisanalyse en Procesadviesing Datastromen, Middelburg 02-03-2023.
- Koppenaar, E. C., Esselink, P., van Duin, W. E., & Bakker, J. P. (2022). Temporal and spatial accretion patterns and the impact of livestock grazing in a restored coastal salt marsh. *Estuaries and coasts*, 45(2), 510-522.

- Krap, S. & Elzinga G., 2014. Kennis inventarisatie Natuurlijke Klimaatbuffer Zuidwest Ameland. Memo Coalitie Natuurlijke Klimaatbuffers januari 2014. 17 pp.
- Ladd, C. J. T., Duggan-Edwards, M. F., Pagès, J. F., & Skov, M. W. (2021). Saltmarsh resilience to periodic shifts in tidal channels. *Frontiers in Marine Science*, 8, 757715.
- Lodder, Q.J., Wang, Z.B., Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., de Looft, H., Townend, I.H., 2019. Future response of the Wadden Sea tidal basins to relative sea-level rise: an aggregated modelling approach. *Water* 11 (10). <https://doi.org/10.3390/w11102198>.
- Lodder, Q., Huismans, Y., Elias, E., de Looft, H., & Wang, Z. B. (2022). Future sediment exchange between the Dutch Wadden Sea and North Sea Coast-Insights based on ASMITA modelling. *Ocean & Coastal Management*, 219, 106067.
- Ketelaar, G., Van de Veen, W., Doornhof, W., 2011. Bodemdaling. In: Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland (Ed.), *Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost*, pp. 10-27.
- Mason, V.G., Willemsen, P.W.J.M. ., Adams, R.O., Borsje, B.W., Fivash, G.S., van de Koppel, J., Stoorvogel, M.M., Bouma, T.J. (submitted), Emerging trade-offs in saltmarsh ecosystem services under sea-level rise.
- Möller, I., Kudella, M., Rupprecht, F., Spencer, T., Paul, M., Van Wesenbeeck, B. K., ... & Schimmels, S. (2014). Wave attenuation over coastal salt marshes under storm surge conditions. *Nature Geoscience*, 7(10), 727-731.
- Olf, H., Huisman, J., & van Tooren, B. (1993). Species dynamics and nutrient accumulation during early primary succession in coastal sand dunes. *Journal of Ecology*, 81(4), 693–706.
- Oost, A.P., 1995. Dynamics and sedimentary development of the Dutch Wadden Sea with emphasis on the Frisian Inlet. A study of barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins. *Geologica Ultraiectina* 126: 454 pp.
- Poppema, D. W., Willemsen, P. W., de Vries, M. B., Zhu, Z., Borsje, B. W., & Hulscher, S. J. (2019). Experiment-supported modelling of salt marsh establishment. *Ocean & coastal management*, 168, 238-250.
- RIKZ. (1998). *Sedimentatlas Waddenzee (CD-Rom)*. Rijksinstituut voor Kust en Zee.
- Rupprecht, F., Reichert, G., Meling, B., Oltmanns, B. 2023. Renaturierung von Salzwiesen im Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer. *Berichte aus dem Nationalpark und der Biosphärenregion Niedersächsisches Wattenmeer*. 2023-03
- Schwarz, C., Gourgue, O., Van Belzen, J., Zhu, Z., Bouma, T. J., Van De Koppel, J., ... & Temmerman, S. (2018). Self-organization of a biogeomorphic landscape controlled by plant life-history traits. *Nature Geoscience*, 11(9), 672-677.
- Siegersma, T. R., Willemsen, P. W., Horstman, E. M., Hu, Z., & Borsje, B. W. (2023). Protective structures as adaptive management strategy in Nature-based Solutions to mitigate sea level rise effects. *Ecological Engineering*, 196, 107079.
- Sipma, E. (2023). Flood protection by Living Dikes: From salt marsh dynamics to coastal safety (literature report). University of Twente.
- Smits, B.P. & Nederhoff, K. (2018). Meso-schaal volumebalans Westelijke Waddenzee. *Deltares rapport 11202177-000-ZKS-0007*. Deltares, Delft, 66 pp.
- Stolte, W., Baart, F., Muis, S., Hijma, M., Taal, M., Le Bars, D., Drijfhout, S. (2022). *Zeespiegelmonitor 2022*. *Deltares rapport 11209266-000-ZKS-0001*. Deltares, Delft.
- Van de Lageweg, W.I., de Paiva, J.N.S., De Vet, P.L.M., van der Werf, J.J., de Louw, P.G. B., Walles, B., ... & Ysebaert, T.J.W. (2019). *Perkpolder tidal restoration: final report*. Center of expertise delta technology, the Netherlands.
- Van der Spek, A.J.F., 1995. Reconstruction of tidal inlet and channel dimensions in the Frisian Middelzee, a former tidal basin in the Dutch Wadden Sea. In: Flemming, B.W. & Bartholomä, A. (eds): *Tidal signatures in modern and ancient sediments*. International Association of Sedimentologists, Special Publication 24: 239–258.
- Van der Wal, D., van Dalen, J., Willemsen, P. W., Borsje, B. W., & Bouma, T. J. (2023). Gradual versus episodic lateral saltmarsh cliff erosion: Evidence from Terrestrial Laser Scans (TLS) and Surface Elevation Dynamics (SED) sensors. *Geomorphology*, 426, 108590.

- Van Duin, W.E., Esselink, P., Bos, D., Klaver, R., Verweij, G. & van Leeuwen, P.-W. 2007. Proefverkweldering Noord-Fryslân Bûtendyks. Evaluatie kwelderherstel 2000-2005. Wageningen- IMARES-rapport C020/07, Texel, Koeman en Bijkerk rapport 2006-045, Haren, Altenburg & Wymenga-rapport 840, Veenwouden. 126 p. + bijlagen.
- Van Duin, W.E. 2018. Kweldermonitoring in de Peazemerlannen en het referentiegebied West-Groningen: Jaarrapport 2017. *Artemis*rapport 2017-03, *Artemisia*-kwelderonderzoek, Den Helder. 74 p.
- Van Loon-Steenma, J., de Groot, A., van Duin, W., van Wesenbeeck, B., & Smale, A. (2012). Zoekkaart Kwelders en Waterveiligheid: Een verkenning naar locaties in het Waddengebied waar bestaande kwelders of. Wageningen: Alterra Wageningen UR.
- Van Maren, D., Colina Alonso, A., Engels, A., Vandenbruwaene, W., Vet, P., Vroom, J., & Wang, Z. (2023). Adaptation timescales of estuarine systems to human interventions. *Frontiers in Earth Science*.
- Van Marion, B.B. (1999). Morfologie kwelders en platen Balgzand. Autonome ontwikkeling Hoogwatervluchtplaatsen. Werkdocument RIKZ/AB – 99.607x
- Van Nieuwkoop, J., Doeleman, M., De Ridder, M. en Gautier, C. (2023). Actualization and validation of SWAN-North Sea and SWAN-Kuststrook models. Deltares rapport 11209278-005-ZKS-0005. Deltares, Delft, 78 pp.
- Van Wesenbeeck, B.K., Esselink, P., Oost, A.P., Van Duin, W.E., De Groot, A.V., Veeneklaas, R.M., Balke, T., Van Geer, P., Calderon, A.C., Smale, A. 2014. Verjonging van half-natuurlijke kwelders en schorren. Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren. Rapport nr. 2014/OBN196-DK. KNNV Uitgeverij.
- Van Weerdenburg, R. en Hanssen, J. (2023). Modelling van droogvalduur in de Waddenzee met D-Flow FM. Deltares rapport 1209278-010-ZKS-0001. Deltares, Delft. 60 pp.
- Van Wijnen, H. J., & Bakker, J. P. (2001). Long-term surface elevation change in salt marshes: a prediction of marsh response to future sea-level rise. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52(3), 381-390.
- Veeneklaas, R. M., Dijkema, K. S., Hecker, N., & Bakker, J. P. (2013). Spatio-temporal dynamics of the invasive plant species *Elytrigia atherica* on natural salt marshes. *Applied Vegetation Science*, 16(2), 205–216. <https://doi.org/10.1111/J.1654-109X.2012.01228.X>
- Vos, P. C., & Knol, E. (2015). Holocene landscape reconstruction of the Wadden Sea area between Marsdiep and Weser: explanation of the coastal evolution and visualisation of the landscape development of the northern Netherlands and Niedersachsen in five palaeogeographical maps from 500 BC to present. *Netherlands Journal of Geosciences*, 94(2), 157-183.
- Vroom, J., Van Weerdenburg, R., Smits, B.P. & Herman, P. (2020). Modellinger sliedynamiek voor de Waddenzee: Kalibratie voor KRW Slib. Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0001. Deltares, Delft, 61 pp.
- Wasson, K., Jeppesen, R., Endris, C., Perry, D. C., Woolfolk, A., Beheshti, K., ... & Hughes, B. B. (2017). Eutrophication decreases salt marsh resilience through proliferation of algal mats. *Biological Conservation*, 212, 1-11.
- Wielakker, D., A. Bak & J.M. Reitsma, 2011. Herziening referenties en doelen Kaderrichtlijn Water voor zeegras en kwelders in K2, O2 en M32 meren. Bureau Waardenburg bv. Rapport nr. 11-196. In opdracht van Rijkswaterstaat, Waterdienst.
- Willemsen, P. W. J. M., Borsje, B. W., Hulscher, S. J. M. H., Van der Wal, D., Zhu, Z., Oteman, B., ... & Bouma, T. J. (2018). Quantifying bed level change at the transition of tidal flat and salt marsh: can we understand the lateral location of the marsh edge?. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(10), 2509-2524.
- Willemsen, P.W., Borsje, B., Vuik, V., Bouma, T., & Hulscher, S. (2020). Field-based decadal wave attenuating capacity of combined tidal flats and salt marshes. *Coastal Engineering*.
- Willemsen, P. W. J. M. (2021). Biogeomorphology of salt marshes: Understanding the decadal salt marsh dynamics for flood defense.
- Willemsen, P. W. J. M., Smits, B. P., Borsje, B. W., Herman, P. M. J., Dijkstra, J. T., Bouma, T. J., & Hulscher, S. J. M. H. (2022). Modeling decadal salt marsh development: variability of the salt

marsh edge under influence of waves and sediment availability. *Water resources research*, 58(1), e2020WR028962.

Willemsen, P.W., Klein Breteler, M., Doeleman, M., Borsje, B., van Maren, D.S. (2024). Bijdrage van kweldervegetatie aan het waterkeringssysteem. Huidige kennis en bijdrage van geplande Deltagootproeven. Deltares rapport 112051325-002-HYE-0010

A Literatuuroverzicht ingrepen aan kwelderdynamiek

Er bestaan verschillende redenen om in te grijpen op kwelders. De focus van ingrepen heeft in het verleden veelal gelegen op toename van areaal (kwantiteit), wat op sommige locaties ten koste is gegaan van de dynamiek (kwaliteit). Recent is de focus meer verschoven naar de kwaliteit van kwelders in termen van dynamiek en biodiversiteit. De ingrepen kunnen uitgevoerd worden in een bestaand kweldersysteem of in onbegroeid getijdengebied om kweldergroei te stimuleren.

De belangrijkste ingreep die veel is toegepast in de Nederlandse Waddenzee is het gebruik van rijshoutendammen, die beschreven staan in paragrafen 3.3.2 en 3.1. Een recent internationaal overzicht van andere ingrepen aan kwelders wordt uiteengezet in Billah et al. (2022), zie Figuur A-1. Het grootste deel van de technieken zijn abiotisch, ingezet om kwelderdynamiek en/of randvoorwaarden te herstellen voor biogeomorfologische successie.



Figuur A-1 Overzicht van recente maatregelen om kwelders uit te breiden en te revitaliseren beschreven in internationale wetenschappelijke literatuur. De meeste voorbeelden zijn afkomstig uit de Verenigde Staten en zijn niet direct van toepassing op de Nederlandse situatie. Overgenomen uit Billah et al. (2022).

A.1 Ingrepen in bestaande kwelders

In bestaande kwelders worden ingrepen gedaan om kwelders op verschillende manieren te ondersteunen: gebruik van maatregelen om omgevingsstress te verlagen, zodat de kwelder kan floreren op een locatie waar dit zonder deze maatregelen niet het geval is (bijvoorbeeld strekdammen of rijshoutendammetjes); vergroten van de sedimentbeschikbaarheid om verticale of laterale groei te stimuleren; maatregelen in de kwelder om vegetatiesoorten en bedekking te beheren (bijvoorbeeld grazen en afgraven). Zowel in Nederland als het buitenland is kwelderdynamiek ondersteund middels het toepassen van deze maatregelen.

Van Wesenbeeck et al. (2014) beschrijft afgravingen in kwelders in Nederland en Duitsland ten behoeve van klei voor het verzwaren van dijken, zogenaamde kleiputten. Deze afgravingen zijn uitgevoerd op de midden en hoge kwelder tot een diepte van 50 tot 150 cm. De kleiputten werden veelal vlak gemaakt met het voorliggende wad, echter blijkt uit onderzoek naar kleiputten in de Jadebusen (Duitsland), dat een zeewaartse bescherming van de kleiput van belang is. In de Jadebusen was dit een hoge kwelderrand. Uit bevindingen uit Zeeland en Duitsland blijkt dat er een goede, open verbinding moet zijn met het watersysteem voor aan- en afvoer van water en sediment. Indien deze niet aanwezig is, blijft een poel bestaan. Tenslotte is het niet aan te bevelen om dammen aan de zijkant van de afgraving op te werpen of te behouden, aangezien dit tientallen jaren in het landschap zichtbaar blijft (Van Wesenbeeck et al., 2014).

In Zuidgors (Westerschelde) en Noard-Fryslân Bûtendyks (Nederlandse Waddenzee) is afgegraven om lokale aanwezigheid van vegetatiesoorten te stimuleren en kwelderverjonging in de praktijk te brengen. In de kwelder Zuidgors aan de noordelijke kust van de Westerschelde (ten westen van Ellewoutsdijk), is in de hoge kwelderzone afgegraven en een verbindingsgeul aangelegd met de Westerschelde. Metingen van bodemhoogte en stroomsnelheid worden uitgevoerd door Hogeschool Zeeland (nog niet gepubliceerd). De krekens in het afgegraven gebied sedimenteren, terwijl de verbindende krekens naar de Westerschelde juist verruimen (pers. comm. Van de Lageweg, 3 juli 2024). Lagere vegetatiesoorten komen nu voor in dit afgegraven gebied, echter is er weinig dynamiek door beperkte overstroming. Mogelijk zorgt de nabijheid van de hoge kwelderzone en beperkte aanvoer van zaden van lage kweldersoorten alsnog voor een groei van hoge kweldervegetatie.

In het Slibmotor project nabij Koehoal is sedimentbeschikbaarheid is vergroot door baggerslib uit de haven van Harlingen op strategische posities te dumpen, zodat de natuurlijk voorkomende waterbeweging dit naar de kust kan brengen (Baptist et al., 2019). Sedimenttransport nabij Koehoal bleek sterk windgedreven. Hier kan gebruik van gemaakt worden door het slib tijdelijk af te zetten op een locatie uit de kust, waarna de stroming dit op kan pikken en richting de kwelders aan de kust kan transporteren. Dit heeft veel potentie in gebieden met een lage sedimentbeschikbaarheid. Nabij Koehoal is er juist een sedimentoverschot geobserveerd en lijkt het permanent vastleggen van het slib juist de beperking voor kweldergroei, doordat de snelle sedimentatie de zaden kan begraven, waardoor pionier planten niet meer kunnen ontkiemen (Baptist et al., 2019).

Tot slot hebben er verschillende kwelderverjongingsprojecten plaatsgevonden in Duitsland, maar daarvan zijn voor zover ons bekend geen metingen beschikbaar.

A.2 Ingrepen om kwelders te ontwikkelen

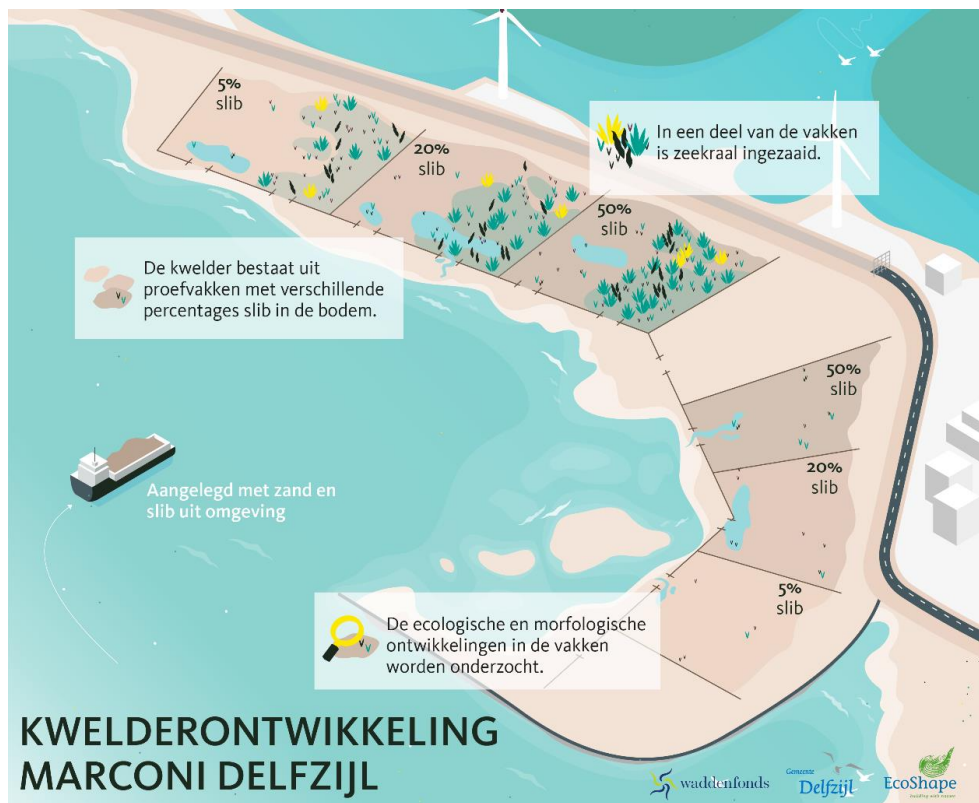
Kwelders kunnen ontwikkeld worden op locaties waar ze zich voorheen niet bevonden of het landgebruik/habitat veranderd is, nadat er kwelders aanwezig zijn geweest in het verleden. Veel kwelders zijn verdwenen door bedijkingen en inpolderingen (zie paragraaf 3.1.1), maar

kunnen ook buitendijks verdwenen zijn door erosie of menselijke ingrepen. Ondanks dat we niet propageren om overal kwelders aan te leggen, kan er wel geleerd worden van deze casussen. Voor de volledigheid worden hieronder een aantal casussen beschreven met ingrepen die hebben geleid tot deels begroeid intergetijdengebied.

Kwelders bevinden zich over het algemeen op plaatsen waar slib kan sedimenteren (zie sectie 2.2), doordat er voldoende luwte is. In het verleden is deze luwte ook gecreëerd, bijvoorbeeld door kwelderwerken bij Noord-Friesland Buitendijks en Wierum. Rijshoutendammen stimuleren slibinvang, waardoor sedimentatie wordt versneld, zodat vegetatie zich kan vestigen. Als de maatregelen onderhouden worden, blijft het systeem bestaan. Indien dit niet het geval is, zoals bij Wierum, verdwijnt de luwte en daarmee langzaam ook de kwelder. Het creëren van (tijdelijk) voldoende luwte in het systeem, kan de balans van het systeem op sommige plekken dusdanig doen omslaan dat vegetatie zich wel kan vestigen. Het is sterk afhankelijk van de locatie in hoeverre maatregelen nodig zijn (zie bijvoorbeeld Van Loon-Steensma et al., 2012).

Het onderhoud van de rijshoutendammen is in de afgelopen dertig jaar geoptimaliseerd ter bescherming van de kwelders en de pionierzone, samengevat door Elschot et al. (2020). Vanaf 1989 werd aandacht besteed aan het voorkomen van uitspoeling of onderspoeling van dammen (ook wel bekend als 'achterloopsheid') middels extra tussendammen (op 200m afstand i.p.v. 400m) en het verlaten van de buitenste bezinkvelden. Ook is de damhoogte aangepast vanwege stijging in de gemiddelde hoogwaterstanden en door de bodemdaling ten gevolge van gaswinning. In 2006 is het damonderhoud tussen Zwarte Haan en Nieuwe Bildtstijl gestopt vanwege de snelle opslibbing. Vanwege de bodemdaling door gaswinning werd in de periode 1994-1998 renovatiewerkzaamheden verricht om de opslibbing te verhogen in Groningen-Oost, waarbij tussendammen en een 10km-lange dwarsdam zijn geplaatst. Sinds 2000 worden de rijshoutendammen flexibel onderhouden, afhankelijk van de veranderingen in arealen van kwelder- en pionierzone. Oostelijk van Holwerd worden sinds 2011 helemaal geen dammen meer bijgevoerd.

Projecten waarin buitendijks kwelders worden aangelegd op laaggelegen intergetijdengebied, zijn niet talrijk. Een voorbeeld hiervan is Marconi bij Delfzijl in het Eems-Dollard estuarium (Figuur A-2). Hier is een combinatie van ingrepen gebruikt om kwelderontwikkeling te stimuleren: (1) het ophogen van de bodem met een zandpakket, waarna 5%, 20% en 50% gerijpte klei is doorgemengd. Hiermee is een hoogteligging geconstrueerd waarop kweldervegetatie zich kan vestigen; (2) Luwte is gecreëerd door de aanleg van een stortstenen dam en rijshouten dammetjes met een inlaat voor in- en uitstroom; (3) pioniervegetatie is op een deel van de kwelder ingezaaid, als katalysator voor vegetatie ontwikkeling. De lessen die hier geleerd zijn voor herstel van kwelders kunnen als volgt samengevat worden: zodra de bodemhoogte, relatief aan het getij, voldoende hoog is, vestigt kweldervegetatie zich. In het eerste jaar na aanleg zijn 14 vegetatiesoorten geobserveerd, en in het tweede jaar 17 soorten. Het inzaaien van zeekraal (*Salicornia procumbens*) na aanleg, was van invloed op het voorkomen van vegetatie. Dit blijkt echter een tijdelijk effect, dat snel afneemt. De bodemsoort, en meer specifiek het percentage doorgemengde klei heeft wel degelijk een effect op de vegetatie ontwikkeling. Zowel soortenrijkheid als bedekking is significant hoger in de vakken met hogere kleipercentages (20% en 50%) in vergelijking met vakken met een kleipercentage van 5% (De Vries et al., 2021), waarbij niet duidelijk was of dit te maken had met weerstand tegen erosie, vochtgehalte of nutriënten.



Figuur A-2 De Marconi proefkwelder tegen de haven van Delfzijl in het Eems-Dollard estuarium. De stortstenen dam (zuidzijde), rijshoutendammen, vakken met verschillende slijbpercentages en ingezaaide proefvakken zijn zichtbaar.

Projecten waar binnendijs kwelders worden aangelegd oftewel gerestaureerd in voormalige polders, voorheen kwelders, zijn talrijker. In Nederland kan men denken aan Perkpolder en de Hedwigepolder. Perkpolder is een *managed realignment* locatie. 75 ha voormalig agrarisch land is opengesteld voor het getij in 2015. Het gebied is bijna volledig omgeven met dijken, waardoor amper golven voorkomen. In het relatief laaggelegen gebied is Engels Slijkgras aangeplant op 15 locaties. Op 6 locaties heeft deze vegetatie het overleefd en zijn er patches gevormd, inmiddels vormen zich nieuwe pollen nabij deze patches (Mason et al., submitted). Het voorkomen van vegetatie op deze lage bodemligging (relatief lange overstromingsduur), veruit lager dan op andere locaties in de Westerschelde, komt hoogstwaarschijnlijk door de minimale golfwerking lokaal. Het ontwikkelde intergetijdengebied slijbt vrij langzaam aan (ongeveer 0-15 cm in de eerste jaren na aanleg), alhoewel in de kreken grotere veranderingen geobserveerd zijn (0-50 cm), mogelijk door overdimensionering (Lageweg et al., 2019). Los van het aangeplante Engels Slijkgras en de daaruit groeiende pollen, lijkt er voorsnog amper vegetatie te groeien. Ook de Hertogin Hedwigepolder in de Westerschelde tegen de Belgische grens is recent ontpolderd. Deze jonge polder (ingepolderd in 1907), is opnieuw onder invloed gebracht van het getij. Bepanting werd verwijderd en een krekensiel werd gegraven om estuariene dynamiek te stimuleren. In 2022 is daadwerkelijk de verbinding gemaakt met de Westerschelde. De eerste visuele waarnemingen (o.a. toename van het aantal waargenomen vogels en vissen, en ontwikkeling van geulen in het ontpolderde gebied) zijn veelbelovend, maar er zijn nog geen kwantitatieve meetresultaten beschikbaar van de bodemhoogte- en vegetatieontwikkeling.

B Ruimtelijk-gemiddelde abiotische condities met en zonder kwelders

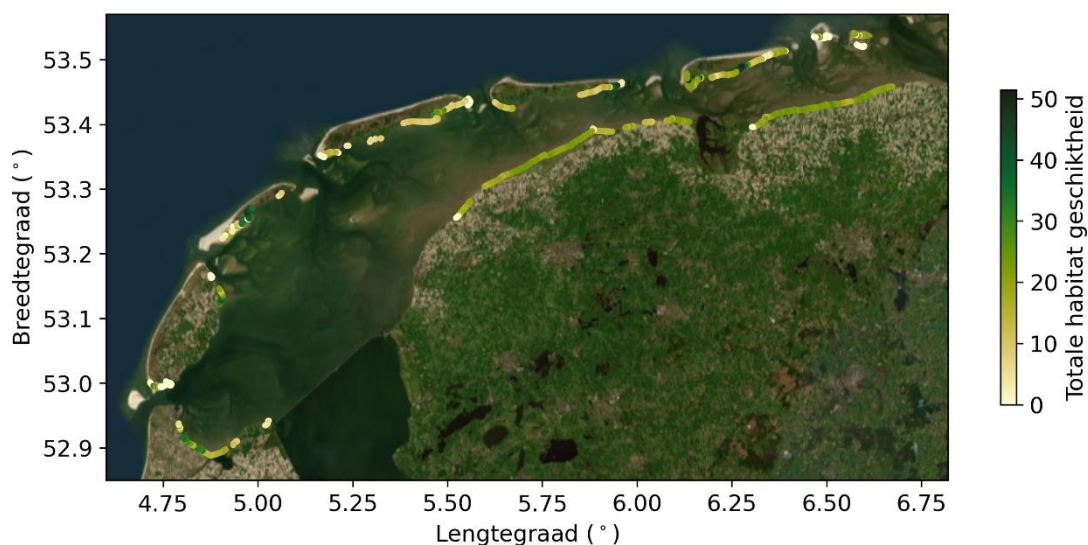
Tabel B-1 Ruimtelijk-gemiddelde waarden van alle punten langs de randen van het Wad voor de abiotische condities, waarin onderscheid gemaakt wordt in locaties met en zonder kwelders.

Parameter	Ruimtelijk-gemiddelde waarde		
	zonder kwelder	met kwelder	
Droogvalduur	op kwelderrand/dijkteen	49,5%	75,6%
	op 500 m zeewaarts	11,3%	40,3%
	op 1 km zeewaarts	5,9%	21,2%
	op 1500 m zeewaarts	5,4%	11,3%
	op 2 km zeewaarts	4,3%	8,2%
Tijdgemiddelde significante golfhoogte	op kwelderrand/dijkteen	0,11 m	0,12 m
	op 500 m zeewaarts	0,13 m	0,11 m
	op 1 km zeewaarts	0,14 m	0,12 m
	op 1500 m zeewaarts	0,15 m	0,13 m
	op 2 km zeewaarts	0,16 m	0,14 m
Temporeel-maximale significante golfhoogte	op kwelderrand/dijkteen	0,33 m	0,32 m
	op 500 m zeewaarts	0,54 m	0,40 m
	op 1 km m zeewaarts	0,57 m	0,45 m
	op 1500 m zeewaarts	0,60 m	0,49 m
	op 2 km zeewaarts	0,61 m	0,51 m
Bodemslibpercentage	op kwelderrand/dijkteen	33,4%	29,2%
	op 500 m zeewaarts	27,6%	26,7%
	op 1 km zeewaarts	21,1%	23,1%
	op 1500 m zeewaarts	16,9%	18,5%
	op 2 km zeewaarts	14,0%	14,0%

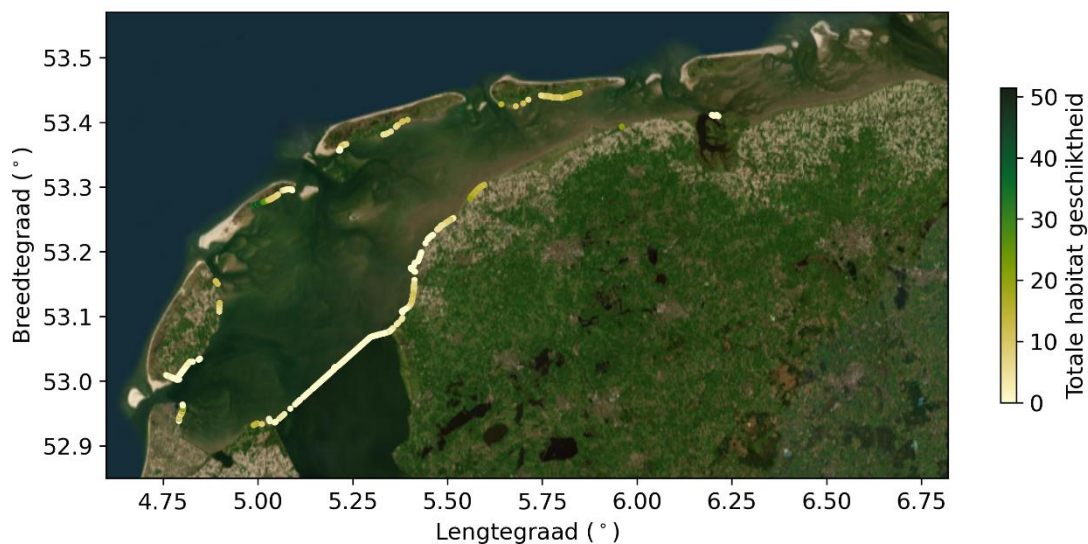
C Habitatgeschiktheid

Op basis van de statistische relatie tussen het voorkomen van kwelders en de abiotische condities, beschreven in Hoofdstuk 4, kan de habitatgeschiktheid voor kwelders worden bepaald met een *Habitat Suitability Index* (HSI). Dit kan zowel per parameter, als gecombineerd voor de combinatie van verschillende condities.

Door het verschil tussen de habitatgeschiktheid van bekende kwelderlocaties (Figuur C-1) te vergelijken met de habitatgeschiktheid van locaties zonder kwelder (Figuur C-2), kan de methode worden geverifieerd en kan worden bekeken op welke locaties nieuwe kwelders kunnen worden ontwikkeld.

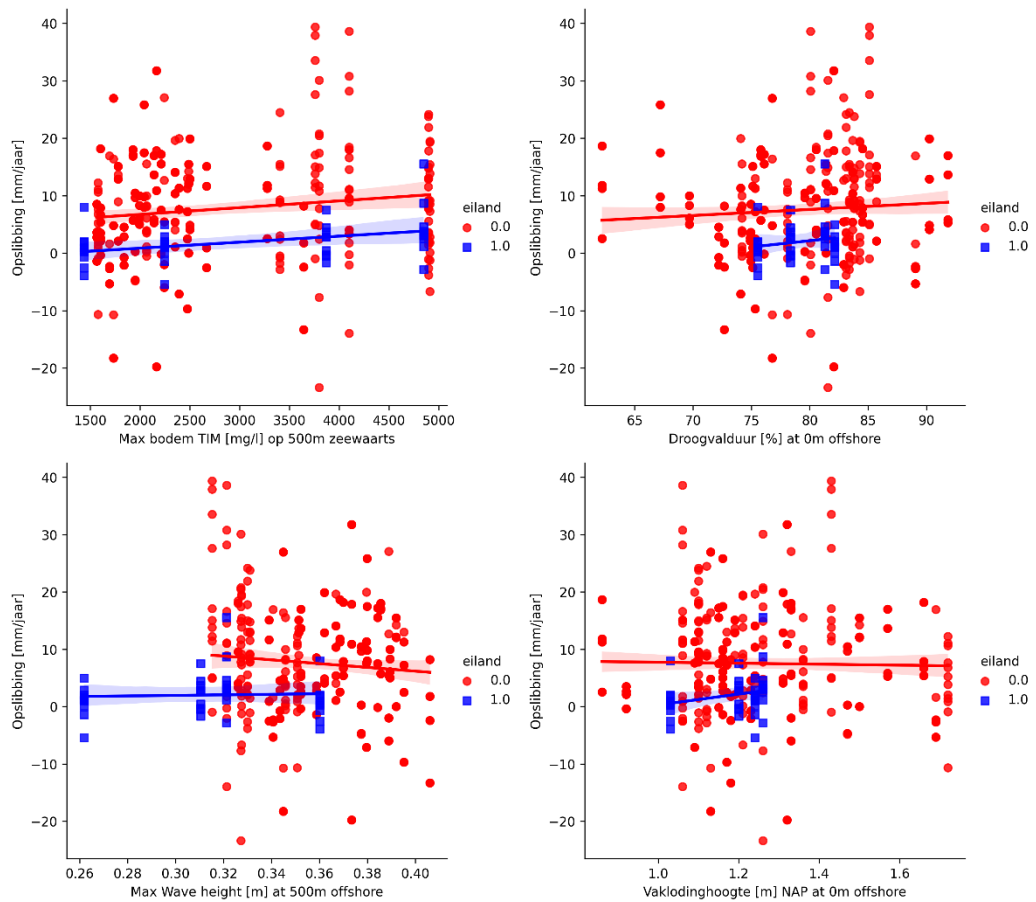


Figuur C-1 Indicatieve habitatgeschiktheid op locaties met kwelders, op basis van de abiotische parameters uit Hoofdstuk 4.



Figuur C-2 Indicatieve habitatgeschiktheid op locaties zonder kwelders, op basis van de abiotische parameters uit Hoofdstuk 4.

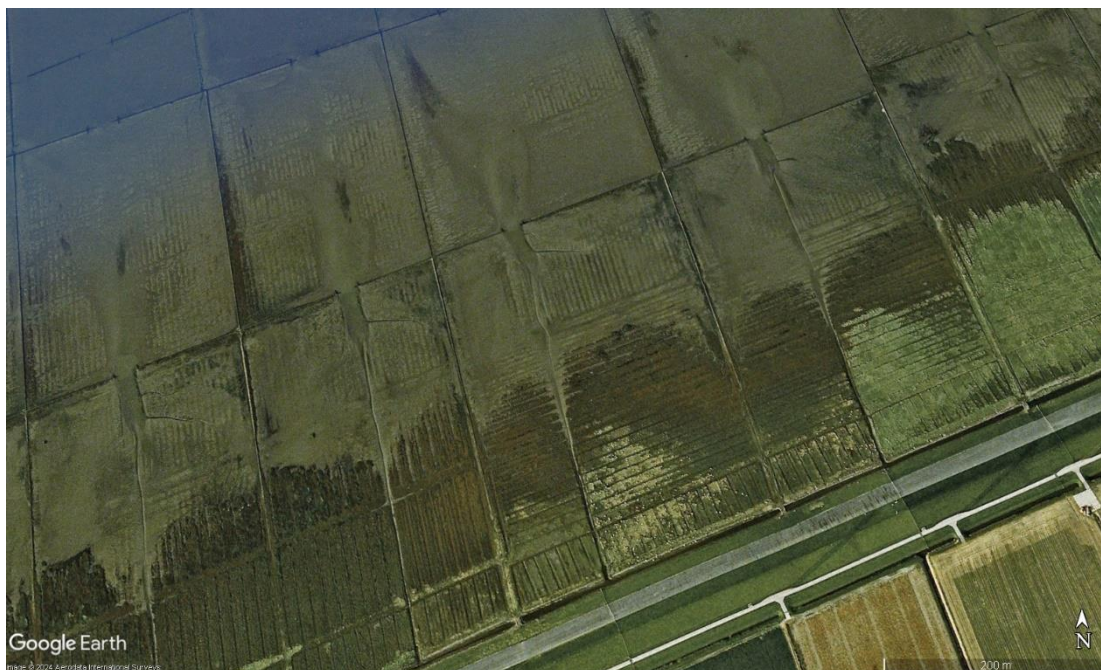
D Verband kwelderhoogte met abiotische condities



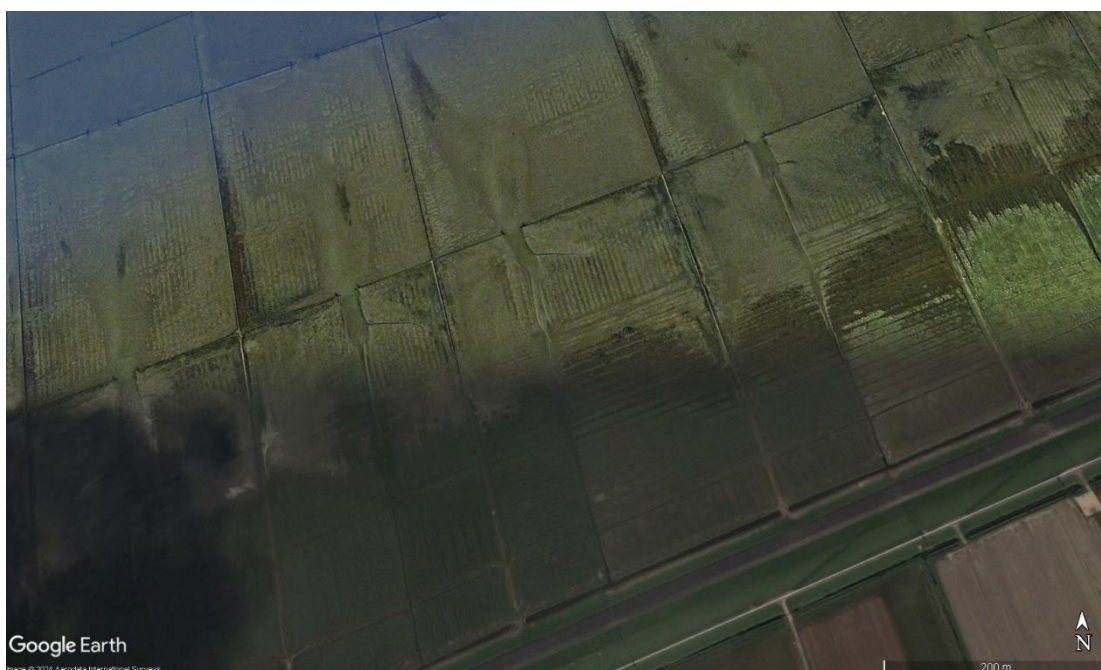
Figuur 0-1 Verbanden tussen opslibbing en abiotische randvoorwaarden, waarbij in rood de vastelandskwelders zijn weergegeven en in blauw de eilandkwelders. Linksboven staat het zwevend stofgehalte, rechtsboven de droogvalduur, linksonder de maximale golfhoogte en rechtsonder de hoogteligging van de kwelderrand. De regressielijnen zijn geen van allen statistisch significant en alleen ter indicatie toegevoegd.

E Kreekvorming Groninger kwelders

Op de Groninger kwelders worden de buitenste dammen van de kwelderwerken sinds 2001 niet meer onderhouden. In de voorste onbegroeide bezinkvakken aan de oostkant zijn sindsdien natuurlijke kreekpatronen ontstaan. Het gaat bijvoorbeeld om de volgende locatie: $53^{\circ}26'49.05''\text{N}$ $6^{\circ}37'14.47''\text{O}$. Zie de opeenvolging van satellietbeelden (2005, 2011, 2014, 2016, 2018, 2022, 2024) in Figuur E-1 tot en met Figuur E-7.



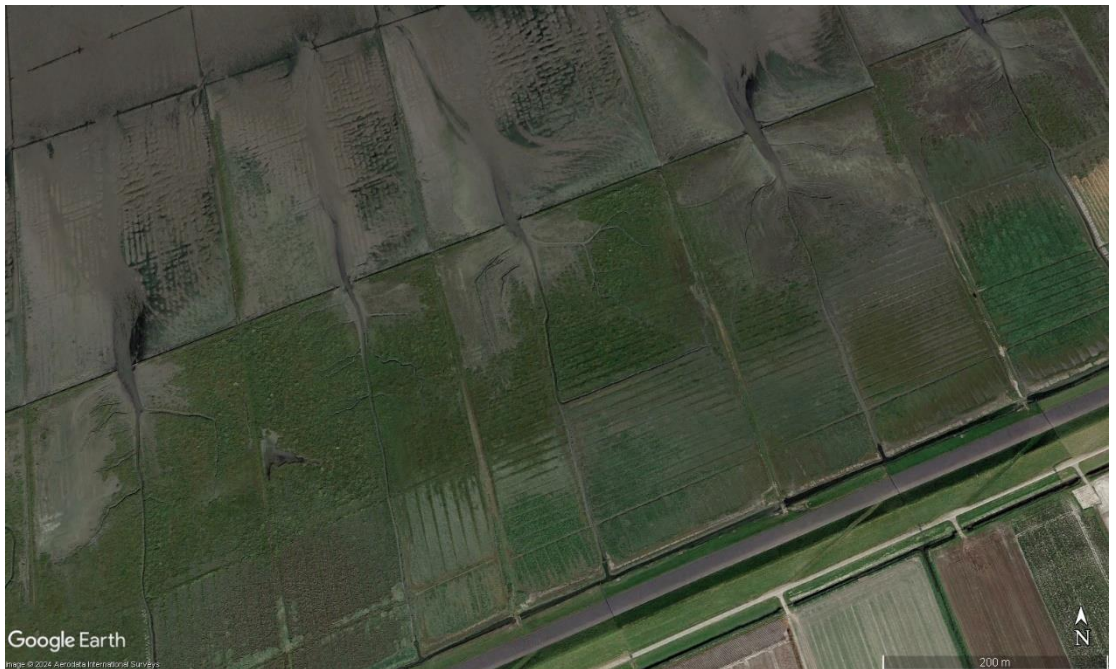
Figuur E-1 Satellietbeeld Groninger kwelders oost uit 2005.



Figuur E-2 Satellietbeeld Groninger kwelders oost uit 2011.



Figuur E-3 Satellietbeeld Groninger kwelders oost uit 2014.



Figuur E-4 Satellietbeeld Groninger kwelders oost uit 2016.



Figuur E-5 Satellietbeeld Groninger kwelders oost uit 2018.



Figuur E-6 Satellietbeeld Groninger kwelders oost uit 2022.



Figuur E-7 Satellietbeeld Groninger kwelders oost uit 2024.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl