



Vegetatieverandering op Ameland-Oost

Jaarrapportage 2021

Auteur(s): Marinka van Puijenbroek, Cor Sonneveld en Kelly Elschot

Wageningen University &
Research rapport C040/22

Vegetatieverandering op Ameland-Oost

Jaarrapportage 2021

Auteur(s): Marinka van Puijenbroek, Cor Sonneveld en Kelly Elschot



Wageningen Marine Research
Den Helder, juli 2022

VERTROUWELIJK Nee

Wageningen Marine Research rapport C040/22

© Wageningen Marine Research

Wageningen Marine Research, instituut
binnen de rechtspersoon Stichting
Wageningen Research, hierbij
vertegenwoordigd door
Drs.ir. M.T. van Manen, directeur
bedrijfsvoering

KvK nr. 09098104,
WMR BTW nr. NL 8113.83.696.B16.
Code BIC/SWIFT address: RABONL2U
IBAN code: NL 73 RABO 0373599285

A_4_3_1 V32 (2021)

Wageningen Marine Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor
gevolgschade, noch voor schade welke voortvloeit uit toepassingen van de
resultaten van werkzaamheden of andere gegevens verkregen van Wageningen
Marine Research. Opdrachtgever vrijwaart Wageningen Marine Research van
aanspraken van derden in verband met deze toepassing.
Alle rechten voorbehouden. Niets uit deze uitgave mag weergegeven en/of
gepubliceerd worden, gefotokopieerd of op enige andere manier gebruikt worden
zonder schriftelijke toestemming van de uitgever of auteur.

Keywords: kwelder, monitoring, bodemdaling, sedimentatie, vegetatie, Natura2000, Waddenzee

Opdrachtgever: Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
T.a.v.: Erwin Bruinewoud (contactpersoon)
Postbus 28000
9400 HH Assen

Dit rapport is gratis te downloaden van <https://doi.org/10.18174/573879>
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Foto omslag: Marinka van Puijenbroek

Inhoud

Samenvatting	7
1 Introductie	9
1.1 Achtergrond	9
1.2 Kennisvragen	10
1.3 Doel van deze rapportage	11
2 Methode	12
2.1 Oud monitoringsnetwerk	12
2.2 Meetpunten 'nieuw' monitoringsnetwerk	12
2.3 Opslibbing	14
2.3.1 Sedimentatie-Erosie-Balk(SEB)-meting	14
2.3.2 Bodemdaling & maaiveldhoogtes	15
2.3.3 Kleidikte	15
2.3.4 Sedimentatieplaat	15
2.4 Vegetatie	15
2.4.1 Vegetatiekaarten Rijkswaterstaat	15
2.4.2 PQ's (Puntmetingen)	15
2.5 Overig	16
2.5.1 Waterstanden	16
2.5.2 Ruimtelijke ligging op de kwelder	17
2.5.3 Abiotische factoren PQ's	18
2.6 Statistische analyses	18
2.6.1 Relaties abiotische variabelen	18
2.6.2 Vegetatiekaarten Rijkswaterstaat	19
2.6.3 PQ meetnet	19
3 Resultaten	20
3.1 Abiotische factoren	20
3.2 Vegetatiekaarten	23
3.3 Permanente kwadranten	25
3.3.1 Multivariate analyse ruimtelijke ligging	28
3.3.2 Multivariate analyse abiotische factoren	30
3.4 Individuele soorten	31
4 Conclusies en aanbevelingen	32
4.1 Abiotische omstandigheden	32
4.2 Regressie op de kwelder	32
4.3 Ligging op de kwelder	33
4.4 Individuele soorten	33
4.5 Effect bodemdaling op kweldervegetatie	34
4.6 Onderzoeksvragen van bodemdalingscommissie	36
4.7 Aanbevelingen	36
5 Kwaliteitsborging	38
Literatuur	39
Verantwoording	41

Bijlage 1	Meetnet PQ's & VQ's NLR	42
Bijlage 2	Meetnet PQ's en VQ's de Hon	43
Bijlage 3	Successie/regressie TMAP types	44
Bijlage 4	CCA oud meetnet	45
Bijlage 5	CCA nieuw meetnet abiotische factoren	46

Samenvatting

Op het Waddeneiland Ameland vindt sinds 1986 bodemdaling plaats als gevolg van gaswinning. Vanaf 1993 vindt er langlopende monitoring plaats naar de mogelijke effecten van de bodemdaling op Ameland-Oost. Een van de effecten van bodemdaling is dat door maaiveld daling regressie van vegetatie kan optreden. Regressie is het omgekeerde van successie; er treedt een terugkeer naar jongere vegetatiestadia op in plaats van dat de vegetatie naar oudere stadia gaat. De laatste integrale rapportage concludeerde dat vegetatieregressie voor kan komen op plekken met een laag maaiveld waar slechte drainage is. De verwachting is dat dit meer voorkomt op plekken verder weg van de sedimentbron. Daarnaast werd er geconcludeerd dat het huidige monitoringsnetwerk niet geheel representatief was voor de hele kwelder.

Daarom is er in 2019 een nieuw monitoringsplan opgesteld en in het veld uitgezet, bestaande uit twee onderdelen. Het eerste onderdeel omvat 80 permanente kwadraten (PQ's) verspreid over de beweidde kwelder ten westen van het Oerd genaamd Neerlands Reid en de onbeweidde kwelder ten oosten van Het Oerd genaamd De Hon. Het tweede onderdeel omvat 60 extra vegetatieopnames om het jaar uitgevoerd op verschillende locaties (variabele kwadraten (VQ's)). In 2020 zijn 60 VQ's opgenomen verspreid over de kwelders, daarvan is de vegetatiesamenstelling, kleidikte en maaiveldhoogte gemeten. In 2021 zijn de PQ's van het nieuwe meetnet opgenomen en daarbij zijn ook bodemonsters verzameld om de volgende abiotische factoren te kunnen meten: vochtgehalte, elektrische conductiviteit, bulkdichtheid en organische stof. Daarnaast is er ook op verschillende dieptes de redox-waarde gemeten. De ruimtelijke ligging van elk PQ en VQ is bepaald door de afstand tot de sedimentbron en afstand wad via sedimentbron te berekenen.

Om het effect van bodemdaling op de kweldervegetatie te bepalen zijn verschillende analyses uitgevoerd.

- 1 Onderzocht is in hoeverre bodemdaling en ruimtelijke ligging de abiotische factoren beïnvloeden.
- 2 De vegetatieverandering is geanalyseerd met vegetatiekaarten van Rijkswaterstaat.
- 3 Het voorkomen van regressie en de soorten samenstelling van de PQ's en VQ's is geanalyseerd in relatie tot de ruimtelijke ligging van de kwelder en abiotische factoren.
- 4 De maaiveldhoogte van karakteristieke kweldersoorten is vergeleken tussen 1986 en 2020/2021.

Uit de voorgaande rapportage bleek dat bodemdaling kan leiden tot een lager maaiveld als de opslibbing niet hoog genoeg is om te compenseren voor de bodemdaling. Uit deze rapportage blijkt dat deze lagere plekken vaker worden overstroomd, waardoor het natter en zouter is. Deze plekken hebben ook een lagere redox-waarde wat een indicatie is voor zuurstofloze omstandigheden. Op Ameland vindt door de bodemdaling regressie plaats waarbij voornamelijk hoge kweldervegetatie veranderd in lage kweldervegetatie. Maaiveldhoogte en zoutgehalte zijn de belangrijkste factoren voor het voorkomen van regressie, maar het maaiveld van de plots die regressie vertoonden hadden een ruime range. Met de analyse in de huidige rapportage is het niet mogelijk om de precieze omstandigheden te bepalen voor regressie van de vegetatie. De analyse laat wel zien dat verschillende plantensoorten nu op een lagere maaiveldhoogte voorkomen dan in 1986. Verder kunnen de volgende vragen van de bodemdalingscommissie deels worden beantwoord.

- Wat is het effect van bodemdaling op de inundatiefrequentie, en welk effect heeft inundatiefrequentie op de kweldervegetatie?
 - o Door bodemdaling is de gemiddelde maaiveldhoogte en de maximale inundatie-vrije periode significant lager op de kwelder. Er is geen significant direct effect van de maximale inundatie vrije periode op het plaatsvinden van vegetatieregressie op de kwelder gevonden.

-
- Wat is het effect van bodemdaling op de drainage, en wat is het effect van drainage op de kweldervegetatie?
 - o In gebieden met meer bodemdaling is de kwelder vochtiger en is de redox waarde lager, wat een indicatie kan zijn voor slechtere drainage. Er is geen directe significante relatie tussen vocht en de redox waardes en de vegetatieontwikkeling gevonden.
 - Neemt het komvolume toe door de bodemdaling, en heeft die eventuele toename in komvolume een effect op de vegetatie?
 - o Door de bodemdaling is de gemiddelde maaiveldhoogte lager, waardoor het komvolume toeneemt. In hoeverre komen zich hebben ontwikkeld achter een oeverwal is onduidelijk. Er was geen significante relatie met maaiveldhoogte en afstand tot de sedimentbron, maar dat is niet de beste manier om komvolume te bepalen. Daarnaast had de afstand tot de sedimentbron en de afstand tot het wad via de kreek ook geen direct effect op de vegetatieontwikkeling.

Om de onderzoeksvragen beter te beantwoorden zijn voor de integrale rapportage van 2023 de volgende aanbevelingen:

- De vegetatiekaarten gebruiken om de vegetatieontwikkeling te analyseren.
- De analyse uitbreiden door begrazingsdruk toe te voegen als factor voor het Neerlands Reid en interacties tussen factoren toe te voegen aan de modellen.
- Extra PQ's toevoegen om een beter beeld te hebben van de range in maaiveldhoogte van individuele soorten.
- Onderzoeken wat het effect is van bodemdaling op het komvolume.

1 Introductie

1.1 Achtergrond

Eind 1986 is de gaswinning op Ameland-Oost gestart. In opdracht van de NAM is toen in een samenwerkingsverband tussen diverse kennisinstituten een voorspelling gemaakt van de mogelijke effecten van de bodemdaling op de morfologie en flora en fauna van Ameland-Oost en de omliggende wandplaten (Dankers et al. 1987). Op basis daarvan is in 1986 begonnen met monitoring van een uitgebreide reeks abiotische en biotische parameters om zowel de bodemdaling als eventuele effecten daarvan op de morfologie en flora en fauna te volgen in de tijd.

Kwelders zijn zeer dynamische systemen waarbij de samenstelling van de kweldervegetatie en de opslibbingssnelheid afhankelijk zijn van de inundatiefrequentie (het aantal keer per jaar dat het gebied onder water staat). Op haar beurt wordt de inundatiefrequentie bepaald door de hoogte van het maaiveld (figuur 1.1) ten opzichte van zeeniveau. Door bodemdaling neemt de hoogte van het maaiveld af wat consequenties kan hebben voor zowel de vegetatiesamenstelling als de opslibbingssnelheid. De terugkoppeling tussen hoogteligging en opslibbingssnelheid kan er echter voor zorgen dat, wanneer sedimentbeschikbaarheid en transportcapaciteit voldoende zijn, de opslibbing de bodemdaling compenseert.

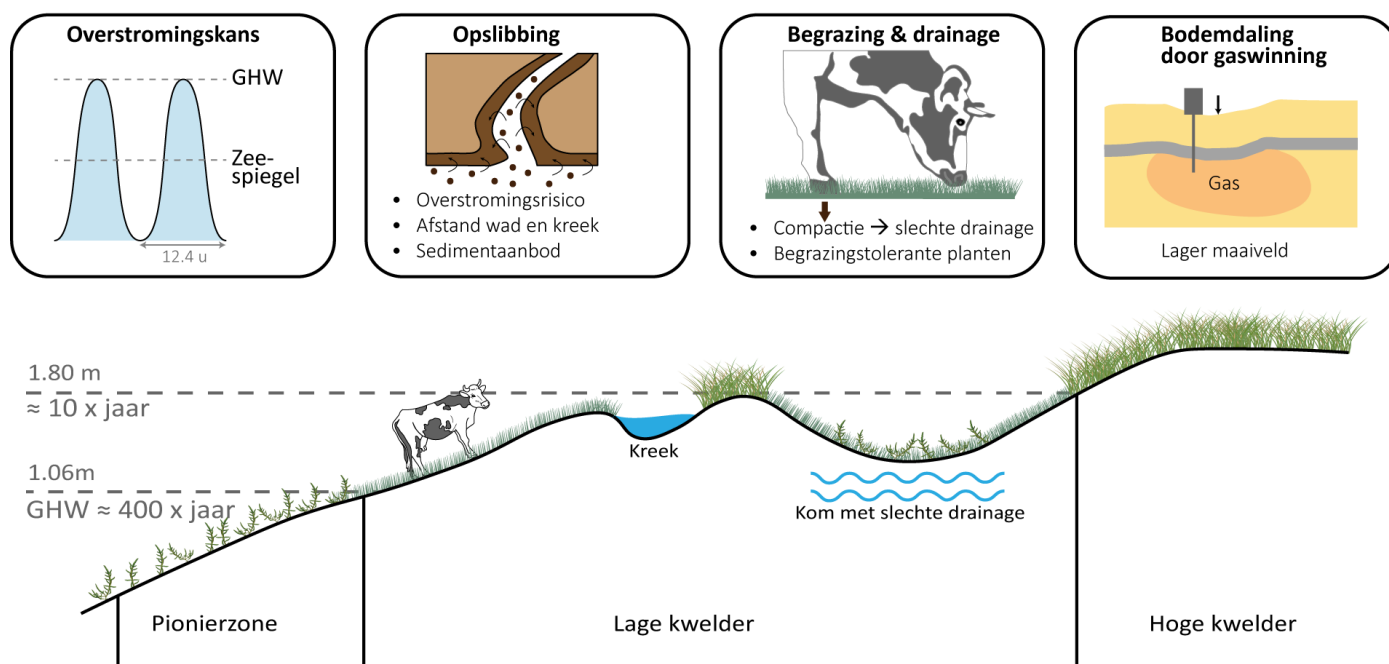
Op Oost-Ameland bestaat de kwelder uit twee delen: het oudere, beweide Neerlands Reid (NLR, ook wel 'De Vennoot' genoemd) ten westen van het duincomplex Het Oerd, en de jongere, onbeweide De Hon ten oosten daarvan. Omdat de bodemdaling de vorm van een schotel heeft (Piening et al. 2017), varieert de mate van bodemdaling over het gebied met de afstand tot het middelpunt van de schotel. In september 2018, het moment van de laatste waterpassing, was op Neerlands Reid de cumulatieve bodemdaling sinds 1986, de start van de gaswinning, 6 - 27 cm (gemiddeld 7 mm/jaar) en op De Hon 26 - 38 cm (gemiddeld 10 mm/jaar) (Piening et al. 2017). Dichter bij de gaswinlocatie is de bodemdaling hoger.

In 1986 is een eerste voorspelling van de mogelijke veranderingen in de opslibbing en vegetatiesamenstelling op Ameland gemaakt. Deze effectvoorspelling ging uit van de typische zonering van de kwelder, en van de aanname dat een hoogteverandering rechtstreeks leidt tot een verandering van de kweldervegetatie. De prognose was toen (Dankers et al. 1987):

- Op Neerlands Reid zou door achterblijvende opslibbing t.o.v. de bodemdaling de vegetatiesamenstelling over een aanzienlijke oppervlakte verschuiven naar soorten die bij een hogere inundatiefrequentie horen. Dit zou in sommige gevallen zelfs tot een algehele verschuiving naar een lagergelegen vegetatiezone kunnen leiden ('zonehypothese'). Het totale kwelderoppervlak zou gelijk blijven.
- Op De Hon zouden de vegetatiezones langzaam richting duinen gaan opschuiven. Een deel van de lage kwelder zou overgaan in wad.

Op basis van deze verwachtingen is ten behoeve van de monitoring een meetnet ingericht in 1986, dat in de loop van de jaren op basis van voortschrijdend inzicht is aangepast. Over de resultaten is jaarlijks aan de Begeleidingscommissie Monitoring Bodemdaling Ameland gerapporteerd, en elke vijf tot zes jaar is een uitgebreide integrale rapportage opgesteld. De meest recente (integrale) evaluatie is van Elschoot et al. (2017). Deze evaluaties hebben geleid tot een bijstelling van de zonehypothese omdat niet uitsluitend een negatieve opslibbingsbalans bepalend is voor het veroorzaken van regressie van de vegetatie (nog los van eventueel geldende grenswaarden voor maaiveld daling die overschreden moeten zijn om tot een verandering in de vegetatie te leiden). Het is de combinatie van netto-daling van het maaiveld, lage initiële maaiveldhoogte én slechtere drainage die lijkt te resulteren in regressie van de vegetatie, wat vooral voorkomt bij hoge kwelder vegetatie.

Factoren van kwelderontwikkeling op Ameland



Figuur 1-1 Een infographic over verschillende factoren die een effect kunnen hebben op de kwelderontwikkeling. De kweldervegetatiesamenstelling wordt voornamelijk bepaald door de inundatiefrequentie. Opslibbing zorgt voor een hoger maaiveld en daardoor zal de inundatiefrequentie omlaaggaan. Begrazing en veranderingen in drainage kunnen leiden tot een begroeiing van plantensoorten die meer resistent zijn tegen begrazing of aangepast zijn aan een betere of slechtere drainage. Door bodemdaling daalt het maaiveld wat een effect kan hebben op de inundatiefrequentie, opslibbing, drainage en de kweldervegetatie.

1.2 Kennisvragen

Na de laatste integrale rapportage (Elschot et al. 2017) heeft de bodemdalingscommissie nieuwe onderzoeksvragen opgesteld die in de volgende integrale rapportage (2023) zullen worden behandeld:

- Wat is het effect van bodemdaling op de inundatiefrequentie, en welk effect heeft inundatiefrequentie op de kweldervegetatie?
- Wat is het effect van bodemdaling op de erosie van de onbeschermde kwelderrand op De Hon? (Deze onderzoeksvraag wordt uitgevoerd door Wageningen Environmental Research).
- Wat is het effect van bodemdaling op de drainage, en wat is het effect van drainage op de kweldervegetatie?
- Neemt het komvolume toe door de bodemdaling, en heeft die eventuele toename in komvolume een effect op de vegetatie?

Deze onderzoeksvragen zullen in zijn geheel worden beantwoord in de volgende integrale rapportage. In deze en de komende jaarrapportages worden verschillende onderdelen van deze onderzoeksvragen behandeld.

Daarnaast gelden er aanvullende doelstellingen vanuit de effectenanalyse/passende beoordeling wijziging gaswinning Ameland. Veranderingen in areaal en kwaliteit van de drie habitattypen H1310A (Zilte pionierbegroeiing (Zeekraal)), H1320A (Slijkgrasvelden) en H1330A (Schorren en zilte graslanden (buitendijks)) zullen worden beschreven in de nieuwe integrale rapportage.

Het effect van bodemdaling op de vegetatie is als eerste afhankelijk van de verandering in maaiveldhoogte. Als de opslibbing hoog genoeg is compenseert het voor de bodemdaling en is er geen of een positieve maaiveld verandering (Van Wijnen and Bakker 2001, Kirwan and Megonigal 2013, Schuerch et al. 2018). Wanneer er maaiveld daling plaats vindt op een locatie blijkt de ruimtelijke ligging bepalend voor de verdere vegetatieontwikkeling. Plekken vlakbij een kreek of kwelderrand hebben een hogere opslibbingsnelheid en over tijd kan er op die plekken een oeverwal ontstaan (van Dobben et al.

2022). Op de plekken achter een oeverwal met een lagere opslibbingssnelheid kan dan een kom ontstaan, waar het water na overstroming of hevige regenval moeilijker weer wegstroomt (Silvestri et al. 2005). Als de bodem verzadigd is met water leidt dat tot zuurstofloze en stressvolle omstandigheden waar veel planten niet tegenkunnen (Justin and Armstrong 1987, Colmer and Flowers 2008a). Eenjarige pioniersoorten zoals zeekraal en Engels slijkgras kunnen er wel tegen (Holmer et al. 2002), en zullen zich vestigen en uitbreiden. Dit hangt wel af van welke plantensoorten al op deze plekken aanwezig zijn. Sommige soorten kunnen als ze eenmaal zijn gevestigd, erg goed tegen verslechterde condities, zoals een nattere standplaats en zullen zich kunnen handhaven.

Op het Neerlands Reid wordt de kwelder begraasd. Deze begrazing zorgt ervoor dat soorten die begrazing niet tolereren, zoals zeekweek en zoutmelde, zullen verdwijnen (Oloff et al. 1997). Andere soorten zoals rood zwenkgras en kweldergras zijn begrazingstolerant en zullen zich vestigen. Verder vertrapen begrazers de bodem waardoor de kleibodem een hogere bulkdichtheid krijgt (Schrama et al. 2013, van Klink et al. 2015). Met een hogere bulkdichtheid kan het water minder makkelijk draineren en kan het dus ook natter worden. De begrazing kan het effect van bodemdaling versterken.

Bij de laatste evaluatie (Elschot et al. 2017) is vastgesteld dat het tot en met 2018 gebruikte meetnet bestaande uit twee meetraaien niet representatief is voor de gehele kwelder op Ameland-Oost. Een groot deel van de PQ's waren geplaatst op oeverwallen vlak bij een kreek, waar een relatief hoge opslibbing plaatsvond, waardoor de conclusie werd getrokken dat op een groot deel van de kwelder de bodemdaling (vrijwel) geheel werd gecompenseerd door een hoge opslibbingssnelheid. Doordat er netto nauwelijks maaiveld daling plaatsvond vertoonde de vegetatie in de naast gelegen PQ ook geen regressie, terwijl de analyse van vlakdekkende vegetatiekaarten weergaf dat er op veel plekken op de kwelder wel degelijk regressie plaatsvond. In overleg met de bodemdalingscommissie is daaropvolgend besloten om een nieuw monitoringsplan te ontwikkelen. Hierbij is als doel gesteld om een representatief monitoringsmeetnet voor alle kwelders op Ameland-Oost te implementeren met een goede spreiding over de gehele kwelder en om rekening te houden met de effectbepaling van bodemdaling op de N2000-instandhoudingsdoelstellingen. Dit is in 2019 gerealiseerd.

In de jaarrapportage van 2021 (van Puijenbroek and Sonneveld 2021) is er bepaald welke factoren de totale kleidikte en jaarlijkse opslibbing van de kwelder beïnvloeden. De jaarrapportage kwam met de volgende conclusies.

1. De kleidikte is groter op lagergelegen delen en dicht bij de sedimentbron, over tijd neemt de kleidikte toe.
2. De gemiddelde opslibbingssnelheid is lager dan de bodemdaling, PQ's met een grote afstand tot de kwelderrand hebben meer netto inklinking dan opslibbing.
3. De opslibbing is afhankelijk van de ruimtelijke ligging van de meetpunten op de kwelder, binnen 25m van de kreek was de opslibbing het hoogst. Daarnaast zorgen hogere waterstanden voor meer opslibbing. Op het Neerlands Reid was er minder opslibbing bij een hoger maaiveld.

1.3 Doel van deze rapportage

Het doel van deze rapportage is te bepalen wat het effect van de bodemdaling is op de vegetatieontwikkeling van de kwelder.

1. Onderzocht is in hoeverre bodemdaling en ruimtelijke ligging de abiotische factoren beïnvloeden.
2. De vegetatieverandering is geanalyseerd met de vegetatiekaart van Rijkswaterstaat.
3. Het voorkomen van regressie en de soortensamenstelling van de PQ's is geanalyseerd met ruimtelijke ligging van de kwelder en abiotische factoren.
4. De maaiveldhoogte van karakteristieke kweldersoorten is vergeleken tussen 1986 en 2020/2021

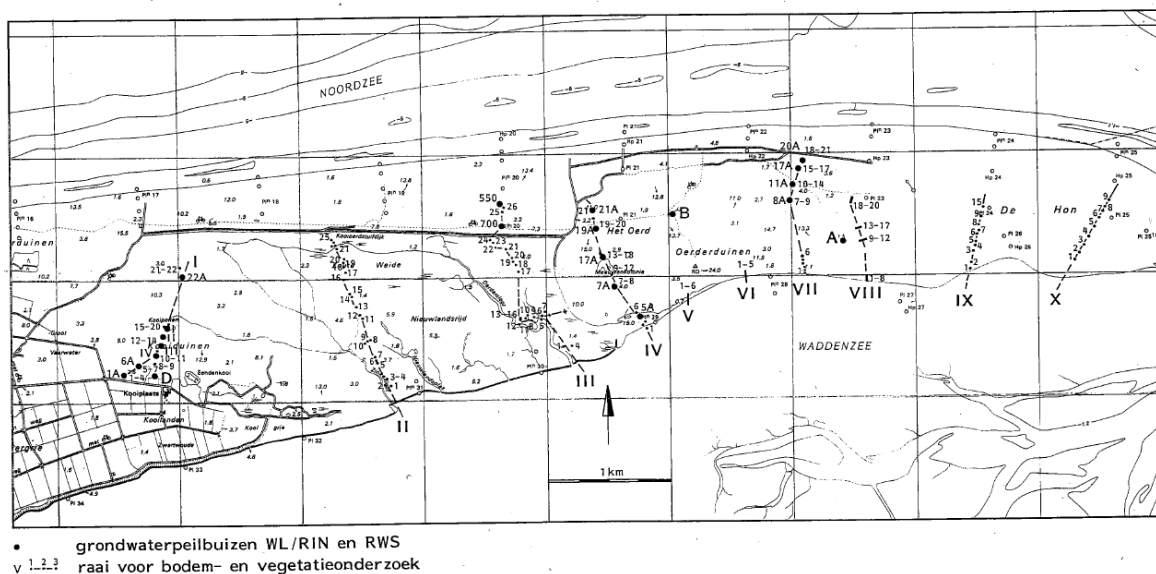
De analyses in deze rapportage zullen onderdeel zijn van de uitgebreidere analyses voor het volgende evaluatierapport in 2023.

2 Methode

2.1 Oud monitoringsnetwerk

In 1986 is er een monitoringsnetwerk opgezet met 10 meetraaien die de kwelders en duinen van Ameland-Oost bevatten. In 1986 is van de PQ's in deze meetraaien de vegetatie en kleidikte gemeten. Vanaf 1993 wordt transect 3 (III) (Neerlands Reid) elk jaar gemeten en vanaf 1995 worden de PQ's langs transect 9 (IX) (De Hon) elk jaar gemeten.

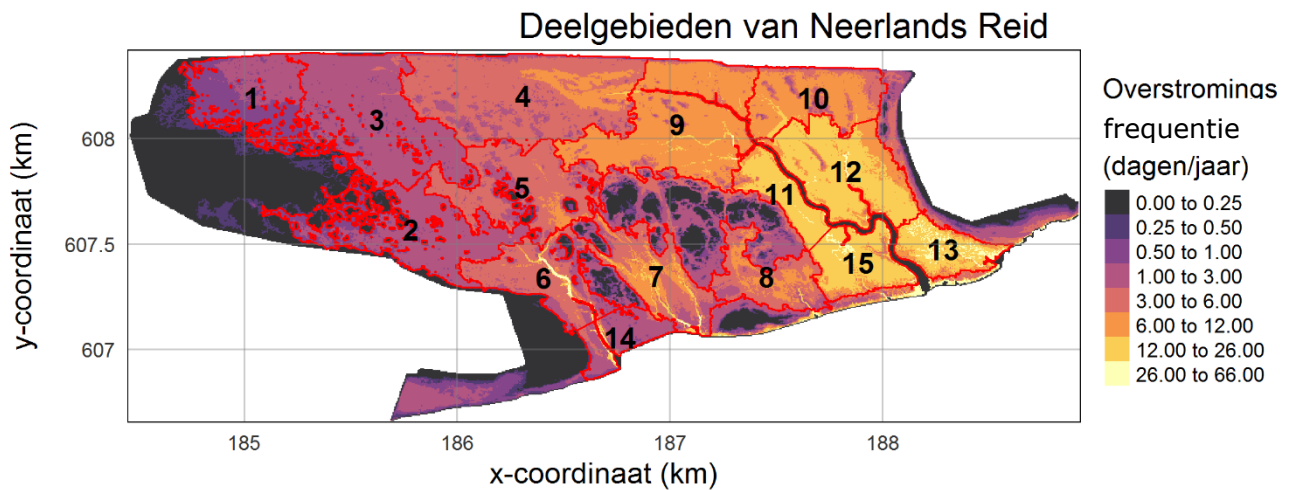
Delen van het Neerlands Reid worden beweide met schapen, koeien en/of paarden met een variërende begrazingsdruk (Elschot et al. 2017). Meetraai 3 bevindt zich in het gebied dat voornamelijk door koeien wordt begraasd en heeft een iets lagere begrazingsdruk dan meetraai 2 dat door schapen wordt begraasd. Op De Hon vindt geen beweiding plaats.



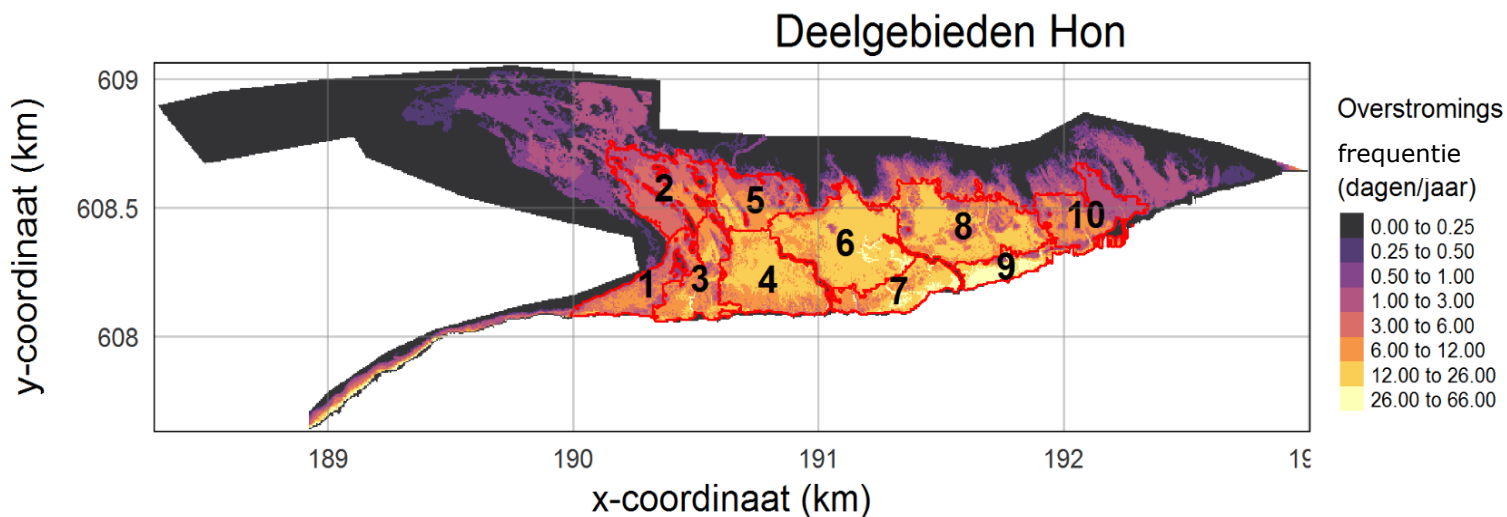
Figuur 2-1. Oorspronkelijke meetraaien voor maaiveldhoogte en vegetatie in de kwelders en duinen van Ameland uit 1986 (Dankers et al. 1987). Uiteindelijk werden vanaf 1998 tot 2018, in het kader van de kweldermonitoring, alleen nog metingen verricht langs raai III (3) en IX (9).

2.2 Meetpunten 'nieuw' monitoringsnetwerk

Het nieuwe monitoringsmeetnet heeft meer PQ's dan het oude meetnet en deze liggen verspreid over de gehele kwelder. Daardoor heeft het een betere dekking over het hele gebied. Voor een goede spreiding van de inundatiefrequentie van de PQ's, zijn de kwelders opgedeeld in deelgebieden op basis van inundatiefrequentie. Voor Neerlands Reid en de Hon zijn er respectievelijk 15 en 10 deelgebieden. Binnen de deelgebieden zijn een aantal PQ's geselecteerd op basis van vlakdekkende vegetatiekaart zodat er verschillen zijn in vegetatietypes (3-4 PQ's). De gegevens over de inundatiefrequentie zijn bepaald met een sedimentatiemodel van Brinkman et al. (2017), waar naast de maaiveldhoogte als belangrijkste factor ook de stroomsnelheid van het water en de afstand tot de kreek zijn meegenomen. Delen (zoals duinkopjes) die minder dan eens in de twee jaar worden overstroomd zijn geen kwelders en daarom niet meegenomen in de deelgebieden. Dit verklaart waarom sommige deelgebieden gaten hebben.



Figuur 2-2 Locatie van de 15 deelgebieden op Neerlands Reid (genummerd), met de inundatiefrequentie (dagen/jaar).



Figuur 2-3 Locatie van de 10 deelgebieden op De Hon (genummerd), met de inundatiefrequentie (dagen/jaar).

In totaal zijn er 80 PQ's voor de hele kwelder op Ameland en er zijn 35 PQ's uit het 'oude' meetnet uit 1986 opgenomen in het nieuwe monitoringsmeetnet. In deze 80 PQ's zullen elk jaar de opslibbingsnelheid en eens in de twee jaar de vegetatiesamenstelling worden gemeten. Daarnaast worden er ook eens per 2 jaar 60 variabele kwadraten (VQ's) verdeeld over de deelgebieden, waar kleidikte, maaiveldhoogte en vegetatiesamenstelling worden gemeten (bijlage 1 & 2). Een VQ wordt dus slechts éénmaal opgenomen.

In 2019 zijn 62 x 2 Sedimentatie-Erosie-Balk (SEB)-palen geplaatst en daarna zijn van de 80 PQ's, de vegetatiesamenstelling, kleidikte en maaiveldhoogte gemeten. 18 'oude' PQ's van meetraai 3 en 9 zijn in het nieuwe monitoringsmeetnet opgenomen waar in 2019 ook de opslibbingssnelheid t.o.v. 2018 kon worden gemeten. Daarnaast zijn er 17 SEB's geplaatst bij PQ's van de 'oude' meettraaien 2, 7 en 8. Er zijn in totaal 45 nieuwe PQ's gekozen.

In 2020 is de opslibbing gemeten van de 80 PQ's, en de vegetatiesamenstelling, kleidikte en maaiveldhoogte gemeten van 60 eenmalige VQ's. In 2021 zijn van de 80 PQ's de opslibbing en vegetatiesamenstelling gemeten. Daarnaast zijn als extra metingen bodemonsters genomen om abiotische variabelen te meten.

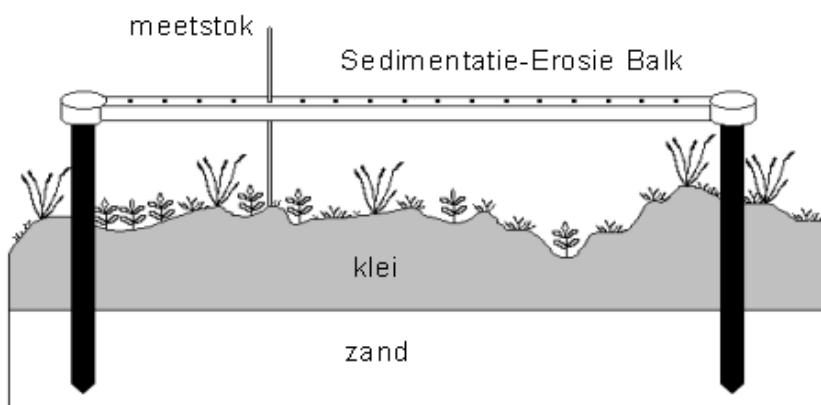
Tabel 2-1 Overzicht van de metingen bij de PQ's en de VQ's inclusief het jaar van de meting.

	2019	2020	2021
80 permante kwadraten (PQ's)			
Vegetatie	x		x
Opslibbing (SEB)	x	x	x
Kleidikte	x		
Maaiveldhoogte	x		
Abiotiek bodem			x
60 variabele kwadraten (VQ's)			
Vegetatie		x	
Kleidikte		x	
Maaiveldhoogte		x	

2.3 Opslibbing

2.3.1 Sedimentatie-Erosie-Balk(SEB)-meting

De opslibbing wordt jaarlijks gemeten met de Sedimentatie-Erosie-Balk methode (Figuur 2.4, Nolte et al. 2013). Bij elk PQ staan twee stevige kunststof palen (doorsnee 7,5 cm) tot in de zandondergrond, die als referentiepunten dienen. Een draagbare aluminium balk (de SEB) wordt op de palen gelegd, en de afstand tussen de bodem en de bovenkant van de balk (en daarmee de koppen van de palen) wordt gemeten op 17 vaste punten tussen de beide palen. Deze meting geeft, na vergelijking met een eerdere meting, het nettoresultaat van de opslibbing van nieuw sediment en de compactie van de gehele kleilaag, inclusief organisch materiaal. Overigens wordt de bodemdaling zelf hier niet direct mee gemeten, omdat de palen mee zakken met de dalende bodem. De opslibbing werd voorheen altijd twee keer per jaar gemeten in maart en september. Aangezien voor modelberekening vooral de opslibbing per jaar wordt gebruikt, is er besloten om vanaf 2019 de opslibbing alleen nog jaarlijks in september te meten.



Figuur 2-4 Principe van een SEB-meting: De Sedimentatie-Erosie Balk (SEB) wordt op twee SEB-palen gelegd die permanent en onwrikbaar in het veld staan. Met een meetstok wordt vervolgens de afstand van de bovenkant van de SEB tot de bodem gemeten op 17 vaste punten (Nolte et al. 2013).

Op delen van het Neerlands Reid gebruikten schapen de SEB-palen om tegenaan te schuren wat resulteerde in extra vertrapping bij de SEB-palen. Deze vertrapping gaf extra inklinking, waardoor op deze locaties de opslibbingsmetingen niet representatief zijn voor de gehele kwelder. Daarom is in maart 2021 besloten de SEB-palen af te zagen tot 5 – 10 cm boven het maaiveld in maart 2021.

2.3.2 Bodemdaling & maaiveldhoogtes

De bodemdalingsgegevens zijn berekend met het bodemdalingsmodel van de NAM (Piening et al. 2017). Dit model bepaalt de bodemdaling voor elk x en y coördinaat op de Amelandse kwelders. Het model gaat tot en met 2020 en voor de jaren daarna zijn de waardes lineair geëxtrapoleerd. Daarnaast is er ook een shapefile gebruikt met contouren van de bodemdaling, deze shapefile is gebruikt om voor de polygonen van de vegetatiekaart de bodemdaling te bepalen.

Met het plaatsen van de nieuwe SEB palen, is van alle vaste PQ's van het nieuwe meetnet de hoogte van de SEB-palen ingemeten met een RTK-DGPS, waarmee de maaiveldhoogte kan worden berekend. In 2020 is de maaiveldhoogte van de eenmalige VQ's in 2020 gemeten met een RTK-DGPS.

Voor het oude meetnet kan de maaiveldverandering worden berekend vanaf de start van de bodemdaling, omdat de maaiveldhoogte in 1986 bekend is. Dat is niet mogelijk voor het nieuwe meetnet, voor deze PQ's wordt de bruto bodemdaling gebruikt.

2.3.3 Kleidikte

Aan de rand van elk PQ en VQ van het nieuwe meetnet is in 2019 (PQ's) of 2020 (VQ's) de kleidikte gemeten. Deze dikte geeft de totale netto opslibbing vanaf het ontstaan van de kwelder weer. Door dit te delen door de kwelderleeftijd kan een ruwe schatting gemaakt worden van de gemiddelde opslibbingssnelheid in het betreffende PQ. Daarnaast is er in maart 2020 een meetcampagne uitgevoerd om de kleidikte van De Hon te bepalen voor een vlakdekkend raster met een celgrootte van 50 m. Voor het Neerlands Reid was de kleidikte al vlakdekkend gemeten in 2016 (Elschot et al. 2017). In de vorige rapportage is de kleidikte geanalyseerd, in deze rapportage wordt deze data niet gebruikt.

2.3.4 Sedimentatieplaat

Naast de opslibbingmetingen met behulp van de SEB's wordt bij negen PQ's de opslibbing ook gemeten door middel van een sedimentatieplaat. Op Neerlands Reid liggen de platen op transect 3 naast de PQ's 3.01, 3.04, 3.07, 3.17, 3.21 en 3.23 en op De Hon liggen ze naast de PQ's 9.04, 9.06 en 9.08. De diepte van de sedimentatieplaten worden jaarlijks gemeten door het Natuurcentrum Ameland (NCA). In het nieuwe meetnet zijn in PQ's 3.23 en 9.08 geen SEB-metingen gedaan, voor opslibbingsgegevens van deze twee PQ's zullen voortaan de diepte van de sedimentatieplaten worden gebruikt. De sedimentatieplaten zijn RVS-platen of stenen tegels die in 1989 op circa 20 cm diepte zijn ingegraven. Jaarlijks wordt de sedimentdikte boven deze sedimentatieplaten gemeten. Dit is een indicatie van de hoeveelheid sediment die er ieder jaar bijkomt, zonder dat de autocompactie van de diepere kleilaag onder de tegel wordt meegenomen (Nolte et al. 2013). In de integrale rapportage zullen deze data worden vergeleken met de opslibbingsdata.

2.4 Vegetatie

2.4.1 Vegetatiekaarten Rijkswaterstaat

De vegetatiekaarten van Rijkswaterstaat geven een vlakdekkend beeld van de vegetatie op het Neerlands Reid en De Hon. Van de volgende jaren zijn vegetatiekaarten beschikbaar 1993, 1997, 2003, 2008 en 2014. In 1993 was er nog nauwelijks bodemdaling, dus de effecten van bodemdaling kunnen goed worden vergeleken met de vegetatiekaart van 1993. De vegetatiekaart van 2020 komt in 2022 uit, maar was op het moment van schrijven nog niet beschikbaar. Daarom is er geen statistische analyse uitgevoerd van de vegetatieontwikkeling op de gehele kwelder, wel zijn er grafieken gemaakt die aangeven hoe de vegetatie zich ontwikkelt.

2.4.2 PQ's (Puntmetingen)

Van 13 tot 17 september 2021 is er bij de 80 PQ's een vegetatieopname gemaakt, waarbij de bedekking van plantensoorten is bepaald met de Londo opnameschaal (Londo 1976), de hoogte van de vegetatie, mate van begrazing (konijnen/hazen/ganzen en beweidingstype en intensiteit) werd genoteerd en is er

een inschatting gemaakt van de drainage (slecht, matig en goed). Dezelfde metingen zijn gedaan in 2020 bij 60 VQ's. Bij de 80 PQ's zijn ook twee bodemonsters genomen.

Om de maaiveldhoogte te bepalen voor het voorkomen van specifieke kweldersoorten is er data gebruikt van de onbegrasde kwelder op Schiermonnikoog als referentiegebied. In 2009 zijn er van 121 PQ's (2m x 2m) een vegetatieopname gemaakt met de Londo opnameschaal (Londo 1976). De maaiveldhoogte is 4 keer gemeten per PQ met een Spectra Precision Laser LI500. De PQ's liggen gelijkmatig verspreid over 4 kwelderdelen over een natuurlijke leeftijdsgradiënt van een 15 tot 55 jaar oude kwelder (Elschot et al. 2013).

Met de bedekking van de plantensoorten kan de TMAP vegetatietypering worden bepaald (Petersen et al. 2014). In vorige rapportages werd door WMR altijd de Salt-97 vegetatie typering gebruikt, maar sinds dit jaar is WMR overgestapt naar de TMAP typering. De TMAP typering is ontwikkeld in samenwerking met Duitse en Deense kwelderbeheerders en -onderzoekers en wordt daardoor internationaal gebruikt. Daarmee is deze data beter te vergelijken met data van andere delen van de Waddenzee. Salt-97 is vergelijkbaar met TMAP waardoor er geen grote veranderingen zijn in de vegetatieontwikkeling. Een relevant verschil tussen Salt-97 en TMAP is dat TMAP geen onderscheid maakt naar middenkwelder, maar in wetenschappelijke studies wordt een middenkwelder ook niet onderscheiden.

Met de vegetatietypes kan worden bepaald of er bij een bepaalde PQ successie of regressie heeft plaatsgevonden. Bijvoorbeeld een overgang van lage kwelder naar hoge kwelder is successie, terwijl als de hoge kwelder veranderd in lage kwelder dan is er sprake van regressie. Voor de PQ's van het oude meetnet is de vegetatietype van de opname in 1986 gebruikt om te bepalen of er successie of regressie heeft plaatsgevonden tussen 1986 en 2018. Voor het nieuwe meetnet is de vegetatiekaart uit 1993 gebruikt om te bepalen of er successie of regressie heeft plaatsgevonden tussen 1993 en 2020/2021. Een overzicht welke veranderingen zorgen voor successie of regressie staat in bijlage 3.

2.5 Overig

2.5.1 Waterstanden

In de winter van 2019 zijn er 50 drukmeters geplaatst bij 50 PQ's (bijlage 1&2) door Sovon. Deze drukmeters meten elke 5 minuten de omgevingsdruk. Met het verschil in druk (hPa) tussen de drukmeters en een referentie drukmeter (die boven de hoogwaterlijn wordt geplaatst) kan het aantal cm dat de drukmeter onderwater stond worden berekend. De data is vervolgens opgeschoond om voor uitschieters te compenseren die niet in verband kunnen worden gebracht met hoogwaters.

1. De variatie rond het gemiddelde is uitgerekend over een interval van 9 metingen (40 minuten) rondom elke meeting. Als de variatie rondom een meetpunt onrealistisch hoog was werd de data verwijderd. De vastgestelde drempel voor de variatie was 500 hPa. Indien een hogere drempelwaarde wordt gebruikt blijven te veel onrealistische uitschieters in de gegevens, bij het gebruik van een lagere drempelwaarde gaan te veel echte hoogwater events verloren.
2. Om de soms onrustige curven van de meetreeksen overzichtelijker te maken werd er een smoothing-stap toegepast met een voortschrijdend gemiddelde. Van elk schuivend venster werd de middelste waarde vervangen door het gemiddelde van alle negen waarden in het betreffende venster.
3. Op Ameland werd er geen referentie drukmeter geplaatst en daarom is de drukmeter van het KNMI op Terschelling als referentie gebruikt. Aangezien de afstand tussen beide eilanden vrij groot is en de druk tijdens een storm snel kan veranderen, kan het zijn dat de verschillen tussen de drukmeters en de referentie drukmeter niet altijd een hoogwater event was. Om daar voor te compenseren zijn alleen drukverschillen hoger dan 2 hPa meegerekend.
4. Als extra check zijn de hoogwaterevents vergeleken met de gemeten waterstanden door Rijkswaterstaat bij Nes. Als er bij een berekend hoogwaterevent geen verhoogde waterstand door Rijkswaterstand was gemeten, is deze niet meegenomen. Het nadeel hiervan is dat het ontstaan van plassen door veel neerslag niet altijd wordt meegenomen.

Voor PQ's waar geen drukmeters zijn geplaatst zijn de hoogwaterevents van het dichtstbijzijnde lagergelegen PQ gebruikt, en dan gecorrigeerd voor het verschil in maaiveldhoogte tussen de PQ's.

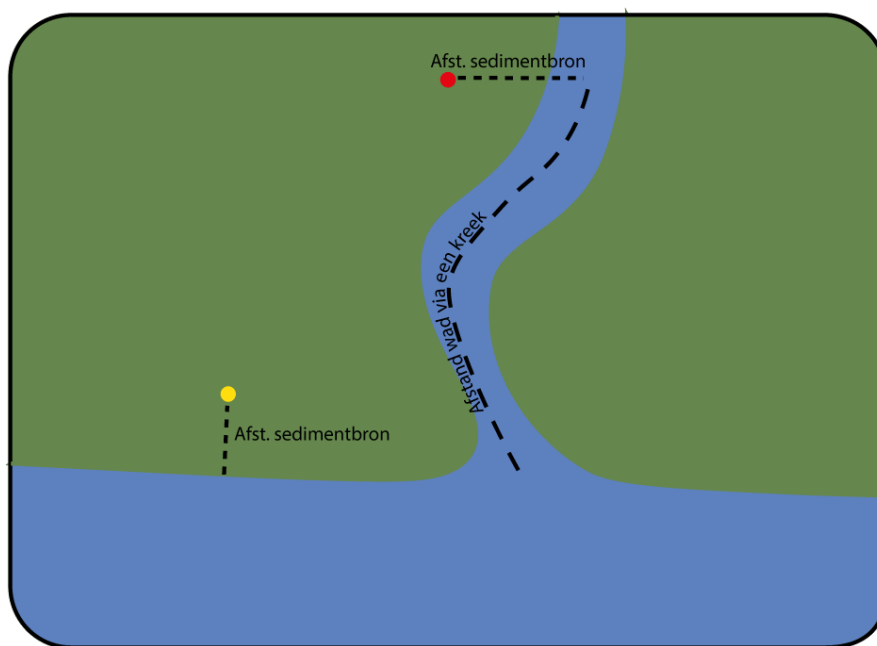
Vanuit de aanwezigheid van hoogwaterevents is het aantal dagen berekend dat de PQ onafgebroken droogstaat in de groeiperiode (1 april – 31 september). Voor de analyse is het maximale aantal dagen dat een PQ onafgebroken droogstaat meegenomen als factor.

Plassen die zijn ontstaan door neerslag of stagnerend water kunnen een groot effect hebben op de vegetatieontwikkeling, bijvoorbeeld doordat zaden slechter kiemen in natte condities. Door het opschonen van de data komt de aanwezigheid van stagnerend water minder duidelijk naar voren waardoor veranderingen in vegetatie minder goed verklaard kunnen worden. De data kan nauwkeuriger worden als er een referentie drukmeter op Ameland wordt geplaatst.

2.5.2 Ruimtelijke ligging op de kwelder

Wageningen Environmental Research heeft databestanden met de locaties van de krekken op NLR en de ontwikkeling en ouderdom van de kwelder op De Hon aangeleverd. De locatie van de kwelderrand van NLR was in het verleden al door WMR bepaald. WMR heeft ook de locatie van de krekken op de Hon bepaald met behulp van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN 2013). Door de maaiveldhoogte van het AHN te corrigeren met de gemiddelde maaiveldhoogte van de omliggende 5 meter, konden de lagere delen in het landschap worden geïdentificeerd. Vanuit deze data kon de ligging en omvang van de voornaamste krekken worden bepaald.

Voor elk PQ is de afstand tot de dichtstbijzijnde sedimentbron bepaald. Afhankelijk van de PQ locaties is dit ofwel de afstand tot de dichtstbijzijnde kreek of rechtstreeks naar het wad (Figuur 2-5). Als tweede variabele is de afstand tussen de respectievelijke sedimentbron via de kreek naar het wad meegenomen (Figuur 2-5). Als de PQ dicht bij het wad lag dan een kreek is deze afstand 0 m.



Figuur 2-5 Schematische weergave hoe de afstand tot de sedimentbron en vervolgens de afstand van het wad via de kreek wordt berekend. Voor het rode punt is de afstand tot de sedimentbron de afstand naar de dichtstbijzijnde kreek. Voor het gele punt is de afstand tot de sedimentbron de afstand naar het wad. De afstand naar het wad via de kreek is bij het gele punt 0m.

2.5.3 Abiotische factoren PQ's

In de zomer 2020 is er voor elk PQ in het veld met een schep een bodemprofiel gestoken. Op elke 3 cm van dat bodemprofiel is de redoxwaarde gemeten (mVolt), de redox waarde geeft een indicatie van de reductie en oxidatie in de bodem. Bij een positieve waarde is er veel zuurstof in de bodem (geoxideerde staat), bij een negatieve waarde is er weinig zuurstof in de bodem (gereduceerde staat), wat een indicatie kan zijn dat de bodem is verzadigd met water en slecht draineert. Voor de analyses zijn de redox-waardes tot 15 cm diepte gemiddeld, omdat wortels meestal tot ongeveer 15 cm diepte groeien en zijn de diepere redoxwaardes niet relevant voor plantengroei.

In de zomer van 2021 zijn bodemmonsters met een inhoud van 200 cc genomen van elk PQ. De bodemmonsters zijn bewaard in een vriezer tot ze werden geanalyseerd. Voor het bepalen van het vochtgehalte zijn de monsters gewogen voor en na drogen in de oven (24 uur op 105 °C). De bulkdichtheid werd bepaald door het drooggewicht te delen door de inhoud van de bodemmonsters. Het zoutgehalte was gemeten door twee sub-monsters te nemen van elk 10 gram, deze werden verdund met 40mL gedemineraliseerd water en minimaal 12 uur gecentrifugeerd. Daarna werd de elektrische conductiviteit gemeten in mS/cm met een multimeter. Het percentage organische stof werd bepaald door twee sub-monsters van 20 gram in de oven de organische stof te verbranden op 560 °C voor 24 uur. Het gewicht dat was verloren na het verbranden is de hoeveelheid organische stof in de bodem.

2.6 Statistische analyses

2.6.1 Relaties abiotische variabelen

Verschillende abiotische variabelen zijn onderling gecorreleerd en met de ruimtelijke ligging op de kwelder, waardoor niet alle gemeten variabelen in de statistische toetsen tegelijk konden worden meegenomen. De abiotische factoren zijn getoetst met lineaire modellen en de verklarende factoren verschilden per model (Tabel 2-2). Alle abiotische factoren, behalve de maximale overstromingsvrije-periode zijn normaal verdeeld. De overstromingsvrije-periode is geanalyseerd met een gegeneraliseerd lineair model met een poisson verdeling.

Tabel 2-2 Overzicht van de verklarende factoren voor de verschillende lineaire modellen per abiotische factor.

Abiotische factor	Verklarende variabelen
Redox meting	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. overstromingsvrije-periode, bodemdaling, organische stof, bulkdichtheid, EC, vochtgehalte en locatie
Organische stof	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. overstromingsvrije-periode, bodemdaling, bulkdichtheid, EC, vochtgehalte en locatie
EC	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. overstromingsvrije-periode, bodemdaling, bulkdichtheid, organische stof, vochtgehalte en Locatie
Vochtgehalte	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. overstromingsvrije-periode, bodemdaling, bulkdichtheid, organische stof, EC en locatie
Bulkdichtheid	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. overstromingsvrije-periode, bodemdaling, en locatie
Maaiveldhoogte	Afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, bodemdaling, en locatie
max. overstromingsvrije-periode	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, bodemdaling, en locatie

Abbreviation: EC = elektrische conductiviteit

2.6.2 Vegetatiekaarten Rijkswaterstaat

Om de vegetatieontwikkeling te bepalen zijn de vegetatiekaarten van Rijkswaterstaat gebruikt van 1993, 2003 en 2014. Deze kaarten bestaan uit circa 2506 (1993), 2422 (2003) en 3660 (2014) polygonen en voor elk polygoon is het vegetatietype bepaald door Rijkswaterstaat (Rijkswaterstaat 2022). Om inzichtelijk te maken of de vegetatieontwikkeling tussen 1993 en 2014 kan worden verklaard door bodemdaling, zijn de bodemdalingscontouren gebruikt om de bodemdaling te koppelen aan elk polygoon. De bodemdaling van de diepere lagen wordt gekoppeld aan de polygonen, maar door opslibbing hoeft dat niet te betekenen dat de polygonen ook zoveel zijn gedaald. Voor het Neerlands Reid zijn de polygonen opgedeeld in verschillende bodemdalingsklassen: 2 - 10 cm, 10 - 18 cm & 18 - 26 cm. Op De Hon is er weinig variatie in bodemdaling en daarom zijn de polygonen in dit gebied niet opgedeeld in bodemdalingsklassen. De vegetatieontwikkeling is daarna grafisch weergegeven in een grafiek.

2.6.3 PQ meetnet

Met de data van de PQ's en VQ's is het aantal PQ's dat regressie vertoont versus stabiel/successies geanalyseerd met een gegeneraliseerd lineair model met een binomiale verdeling. De bedekking van kale grond, zeekraal en klein schorrekruid is geanalyseerd met een lineair model. De verklarende variabelen voor deze modellen waren maaiveldhoogte, bodemdaling, afstand tot de sedimentbron, afstand wad via kreek en locatie (HON of NLR). Met de data van alleen de PQ's van 2021 kon dezelfde analyse worden gedaan maar dan met de abiotische factoren als verklarende variabelen (redoxwaarde, elektrische conductiviteit, vochtgehalte, organische stof en maximale overstromingsvrijeperiode).

Als extra controle is op vergelijkbare wijze het aandeel regressie ten opzichte van stabiel/regressie geanalyseerd van het oude meetnet met een gegeneraliseerd lineair model met een binomiale verdeling. De verklarende variabelen waren maaiveldhoogte, bodemdaling, afstand tot de sedimentbron, afstand wad via kreek en locatie (HON of NLR).

Om het effect van abiotische omstandigheden te bepalen op de soortensamenstelling van PQ's is een multivariate analyse uitgevoerd. De data is geplot op twee assen die de meeste variatie in de data verklaren. Door vervolgens de twee assen te plotten die de meeste variatie verklaren kunnen onderlinge verschillen tussen de PQ's worden weergegeven. Voor deze analyse is er gekozen voor de Canonical Correspondence Analysis (CCA). Met CCA wordt de soortensamenstelling deels verklaard door de omgevingsvariabelen. Verder wordt er aangenomen dat de soorten een optimum hebben bij bepaalde omgevingsvariabelen. Deze analyse is gedaan voor het oude en het nieuwe meetnet. Het oude meetnet is geanalyseerd met de volgende factoren (maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand van het wad via kreek, en netto maaiveldverandering). Voor het nieuwe meetnet waren de twee locaties NLR en De Hon zo verschillend, dat er aparte CCA's moesten worden uitgevoerd voor de twee gebieden. Daarnaast zijn voor het nieuwe meetnet per locatie ook twee aparte CCA's uitgevoerd. Een CCA is gebaseerd op de ruimtelijk ligging (maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand van het wad via kreek en bodemdaling) waarbij de PQ's en VQ's samen zijn meegenomen. Een tweede CCA is gebaseerd op de abiotische factoren (redoxwaarde, elektrische conductiviteit, vochtgehalte, bulkdichtheid, organische stof, maximale inundatievrije periode) met alleen de PQ's.

Om te bepalen hoe kwelderplanten zich aanpassen aan maaiveldddaling is geanalyseerd hoe de range in maaiveldhoogte van specifieke kweldersoorten is veranderd ten opzichte van 1984. Er zijn alleen soorten geselecteerd die in minimaal 3 PQ's voorkwamen met meer dan 5% bedekking. Voor het Neerlands Reid zijn er voor de PQ's en VQ's in 2020/2021 twee groepen gemaakt afhankelijk van de bruto bodemdaling (0 - 15 cm of 15 - 30 cm bodemdaling). De Hon is onbegraasd en van vergelijkbare leeftijd als de onbegraasde kwelders op Schiermonnikoog, daarom is er voor gekozen om te vergelijken met vegetatiedata van Schiermonnikoog in 2009. Met een t-test is vergeleken of de maaiveldhoogte van specifieke kweldersoorten significant verschild met de maaiveldhoogte van 1986.

3 Resultaten

3.1 Abiotische factoren

Resultaten van de lineaire modellen voor abiotische factoren voor Neerlands Reid en De Hon gezamenlijk zijn weergegeven in Tabel 3-1, relaties tussen factoren voor de afzonderlijke gebieden zijn in grafiekvorm weergegeven in Figuur 3-1, Figuur 3-2 en Figuur 3-3.

Tussen Neerlands Reid en De Hon verschilden alleen de redoxpotentiaal significant, bij alle andere factoren werden geen verschillen tussen de twee locaties gevonden (Tabel 3-1, Figuur 3-1A). In het Neerlands Reid was de redox potentiaal het hoogst bij de toplaag en tot 15 cm diepte nam de redoxpotentiaal af tot het stabiliseerde. Bij De Hon had de redoxpotentiaal een kleine toename tot 15 cm diepte, van 0 tot 15 cm. Tussen de 15 en 30 cm diepte was de redoxpotentiaal lager, maar nog wel positief. Aangezien de worteldichtheid het hoogst is in de bovenste 15 cm is vervolgens de gemiddelde redoxpotentiaal uitgerekend van 0 tot 15 cm diepte per PQ en meegenomen in de analyses. De gemiddelde redox potentiaal van 0 tot 15 cm diepte bij Neerlands Reid was significant gecorreleerd met de elektrische conductiviteit (EC); op plekken met hogere EC waarden was de redox potentiaal lager. Daarnaast was de redoxpotentiaal lager op plekken met veel bodemdaling, maar deze relatie was niet heel sterk. Het statistische model verklaarde ongeveer 20% van de variatie van de redoxpotentiaal, andere factoren die niet zijn meegenomen in dit model zullen een belangrijk effect op de redoxpotentiaal hebben. De hoeveelheid variatie die een model verklaart wordt uitgedrukt met R^2 , waarbij deze is aangepast voor het aantal factoren in het model (Adj. R^2).

De elektrische conductiviteit was niet significant verschillend tussen de twee gebieden. Binnen de gebieden was de elektrische conductiviteit hoger op plekken met lager maaiveld en op grotere afstand tot het wad via een kreek (Figuur 3-1 D-F). De bulkdichtheid was negatief gecorreleerd met de elektrische conductiviteit; bij toenemende bulkdichtheid was de elektrische conductiviteit lager.

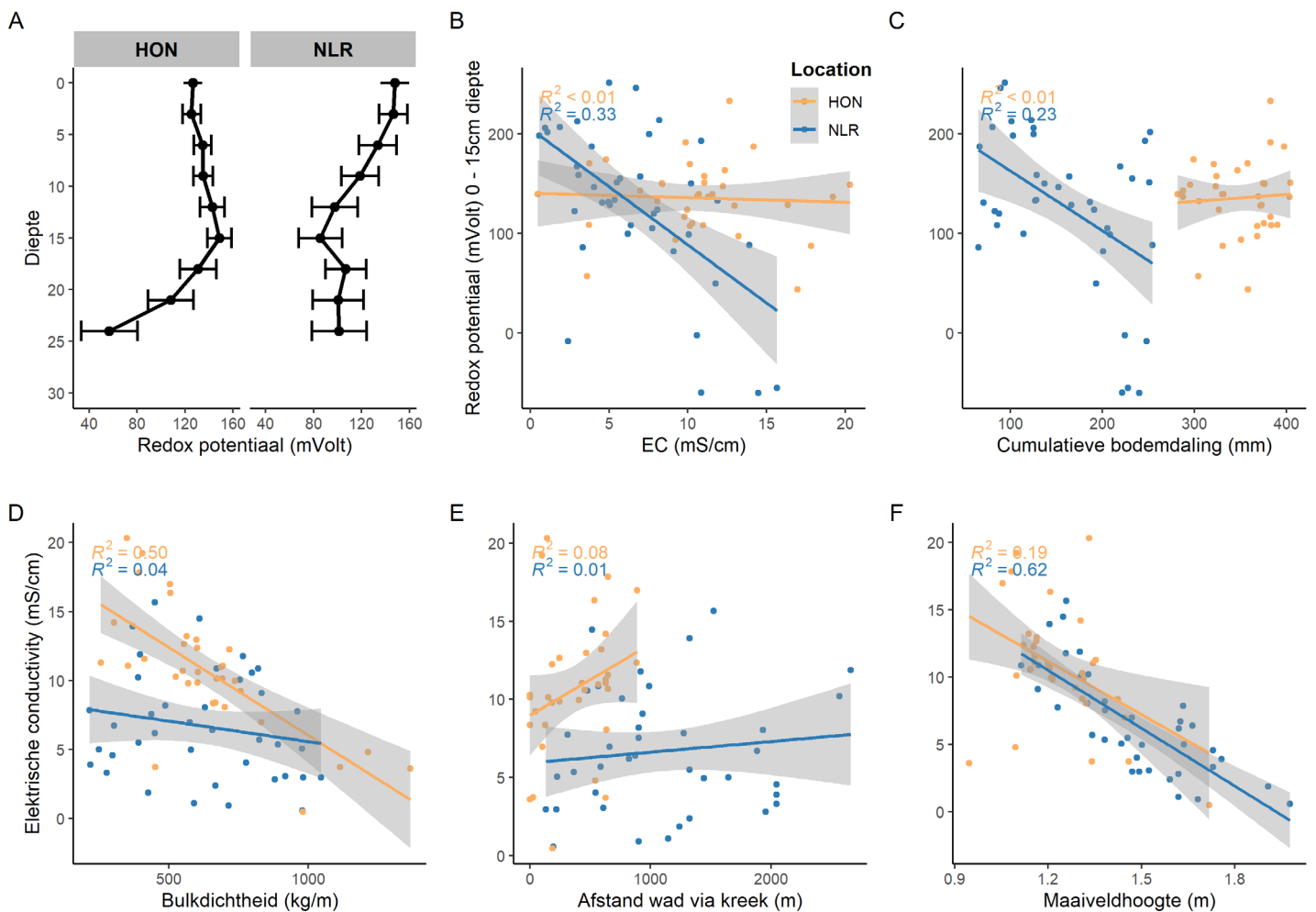
Tabel 3-1 Lineaire modellen voor redox, EC, vochtgehalte, organische stof, bulkdichtheid, overstromingsvrije dagen en maaiveldhoogte. Getallen geven de t-waarden weer, waarbij de significantie is uitgedrukt in p-waarden en aangegeven met sterretjes.

Factor	Redox	EC	Vochtgehalte	Organische stof	Bulk-dichtheid	Max. Overst. vrije periode	Maaiveld hoogte
Intercept	2.06*	4.96***	15.1***	-0.04	3.51***	2.39*	14.19***
Maaiveldhoogte	-0.87	-7.58***	-6.13***	0.7	-0.46	-1.07	
Afstand sedimentbron	0.56	-0.31	-2.47*	1.49	-3.73***	1.59	3.18**
Afstand wad via kreek	-1.37	-2.93**	1.27	-0.45	-5.76***	-2.56*	-1
Max. Overstromings-vrije dagen	-0.33	-1.04	-0.34	-0.22	-0.88		
Bodemdaling	-2.24*	-1.53	-2.23*	-0.44	-0.95	-3.14**	-5.24***
Organische stof	-0.11	-0.79	1.7				
Bulkdichtheid	-1.24	-3.35**	-16.41***	-0.53			
EC	-2.81**			-0.79			
Vochtgehalte	-0.15	-0.08		1.67			
Locatie	-3.02**	-0.35	-1.19	-0.33	1.58	-0.66	-1.59
Adj. R^2	0.2	0.77	0.92	0.48	0.48	0.21	0.5
F-statistics	2.84**	27.43***	101.5***	8.39***	11.97***	4.73***	18.67***
AIC	807	334	412	539	971	412	-59
BIC	835	359	435	564	990	428	-45
DF residual	62	63	64	63	66	67	68

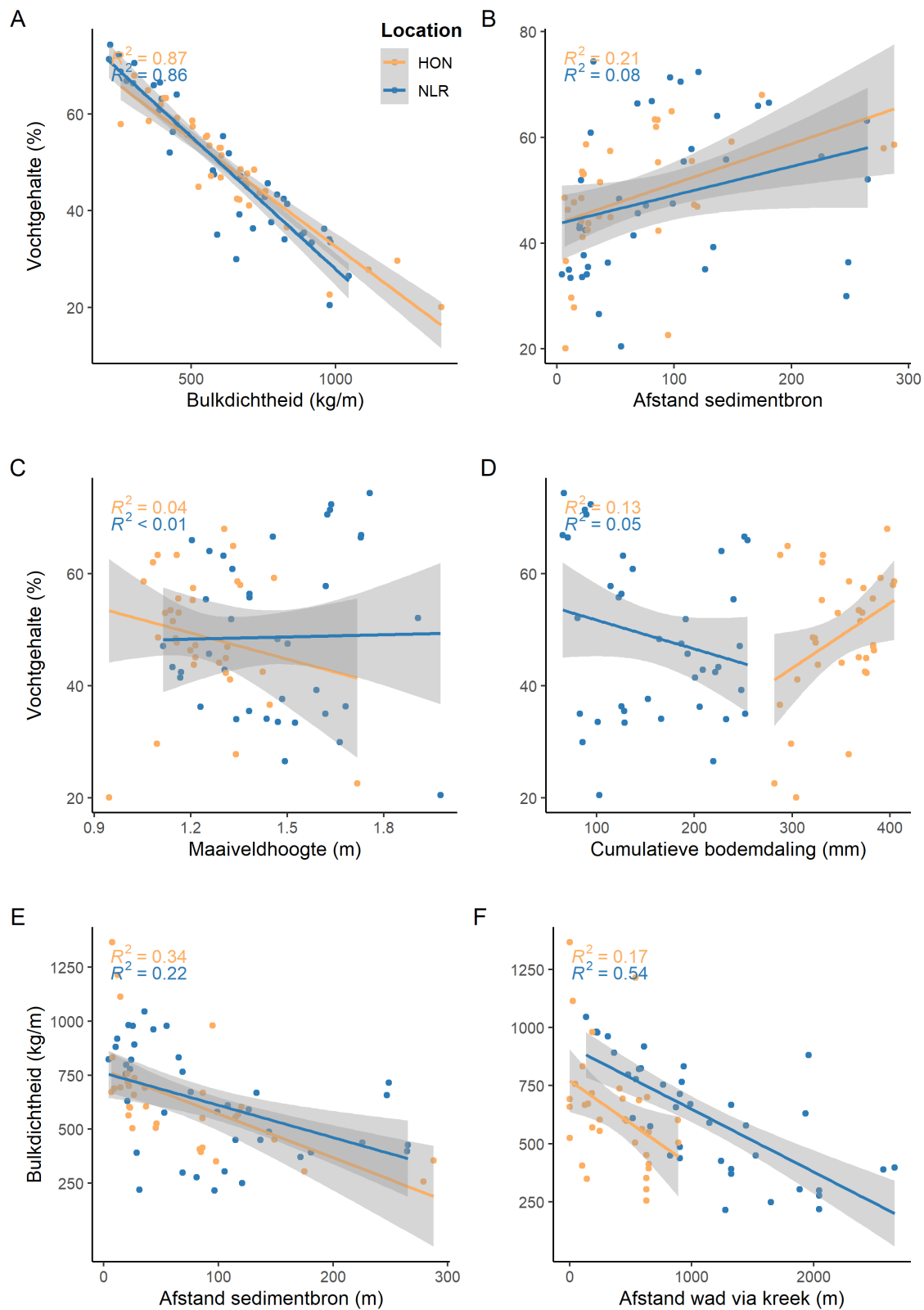
Afkortingen: EC = Elektrische conductiviteit, p-waarden: * < 0.05, ** < 0.01, *** < 0.001

Binnen beide deelgebieden was het vochtgehalte sterk gecorreleerd met de bulkdichtheid, bij hogere bulkdichtheid was het vochtgehalte lager (Figuur 3-2 A – D). Daarbij was het vochtgehalte hoger op plekken verder weg van de sedimentbron, en in De Hon met een lagere maaiveldhoogte. Daarnaast was het vochtgehalte in Neerlands Reid hoger op plekken met minder bodemdaling en in De Hon juist andersom. Het organische stofgehalte was niet significant gecorreleerd aan de factoren in het model. De bulkdichtheid nam af op grotere afstand van de sedimentbron en de afstand tot het wad via de kreek. Hierbij was er een niet-significant verschil tussen het Neerlands Reid en de Hon; het Neerlands Reid had meestal een hogere bulkdichtheid bij vergelijkbare afstand van het wad vergeleken met De Hon (Figuur 3-2 E-F).

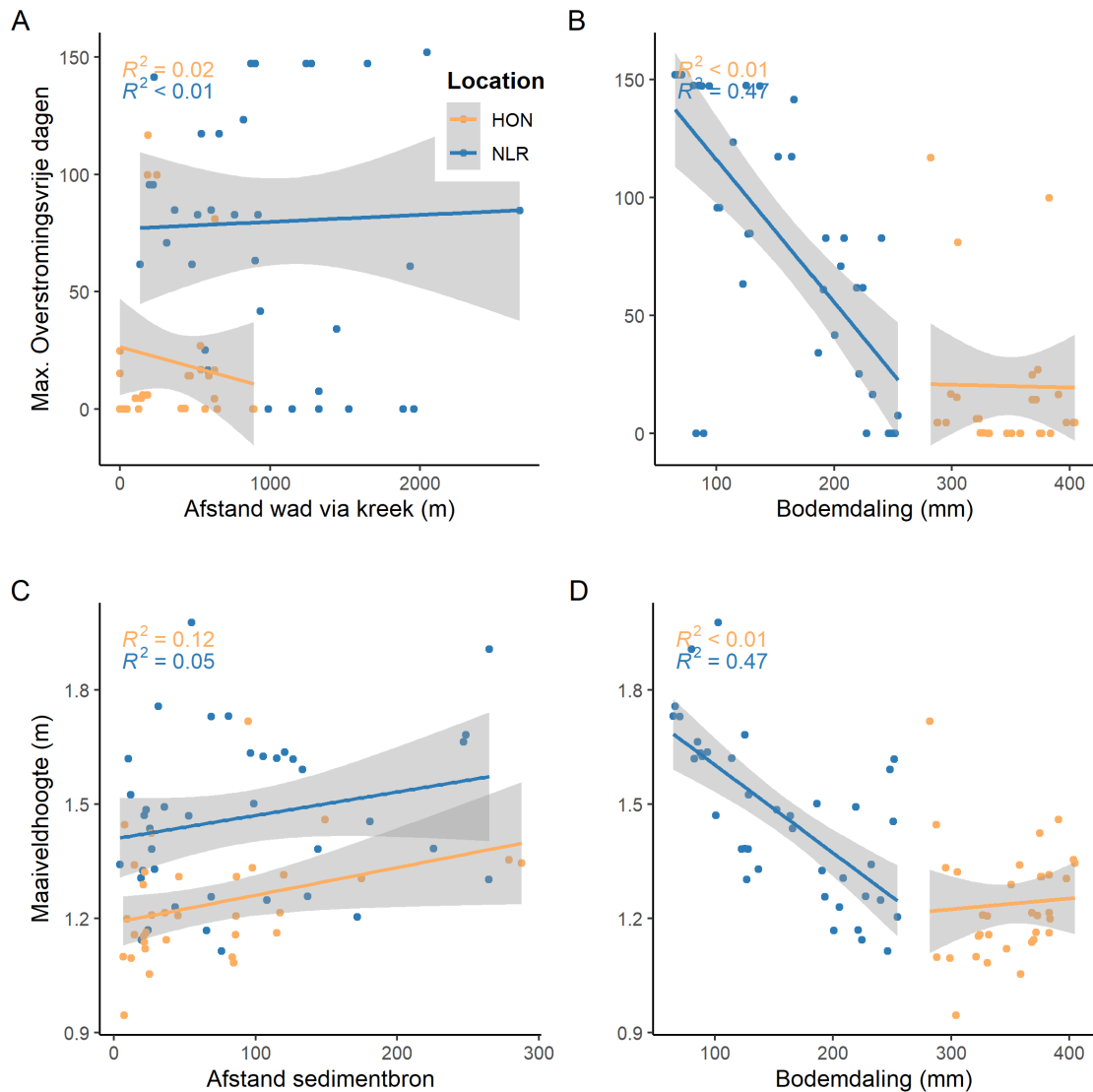
Het aantal maximaal overstromingsvrije dagen nam nauwelijks toe met toenemende afstand tot het wad in Neerlands Reid en nam licht af op De Hon (Figuur 3-3 A - B). Het aantal maximaal overstromingsvrije dagen nam sterk af met een toenemende bodemdaling voor Neerlands Reid. Het maaiveld was in beide gebieden hoger op een grotere afstand tot de sedimentbron, maar deze relatie was niet erg sterk. Het maaiveld op Neerlands Reid was lager op plekken met meer bodemdaling (Figuur 3-3 C - D).



Figuur 3-1 A) Redox potentiaal (mVolt) over diepte; B) Relatie EC en redox potentiaal; C) Relatie cumulatieve bodemdaling en redox potentiaal; D) Relatie bulkdichtheid en EC; E) Relatie afstand wad via kreek en EC; F) Relatie maaiveldhoogte en EC. De kleuren geven de verschillende gebieden aan. De R^2 in de grafiek is van een lineair model apart voor de locaties.



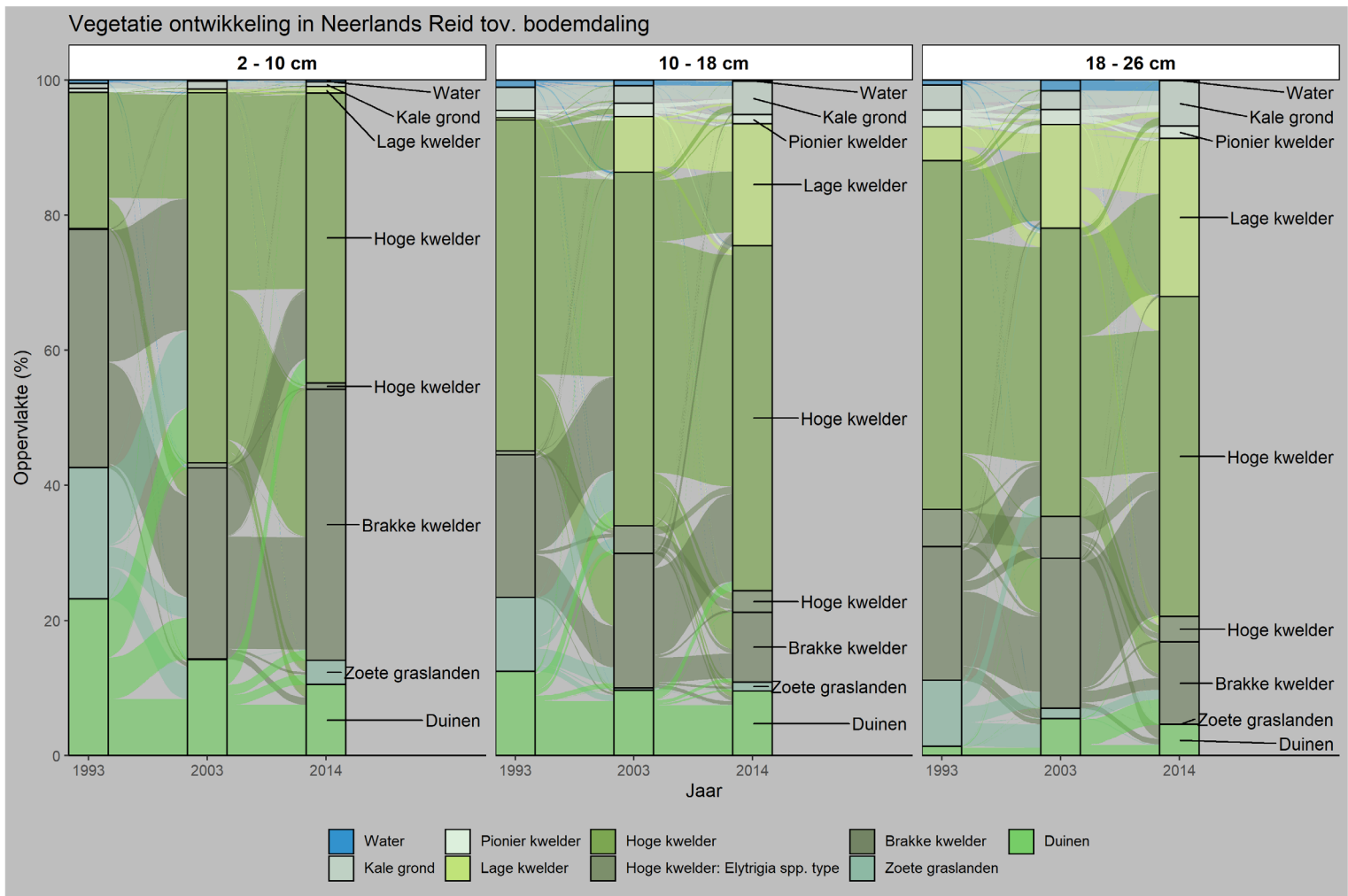
Figuur 3-2 A) Relatie bulkdichtheid en vochtgehalte; B) Relatie afstand sedimentbron en vochtgehalte; C) Relatie maaiveldhoogte vochtgehalte; D) Relatie cumulatieve bodemdaling en vochtgehalte; E) Relatie afstand sedimentbron en bulkdichtheid; F) Relatie afstand wad via de kreek en bulkdichtheid. De kleuren geven de verschillende gebieden aan. De R^2 in de grafiek is van een lineair model apart voor de locaties.



Figuur 3-3 A) Relatie afstand wad via de kreek en overstromingsvrije periode; B) Relatie cumulatieve bodemdaling en overstromingsvrije periode; C) Relatie afstand sedimentbron en maaiveldhoogte; D) Relatie cumulatieve bodemdaling en maaiveldhoogte. De kleuren geven de verschillende gebieden aan. De R^2 in de grafiek is van een lineair model apart voor de locaties.

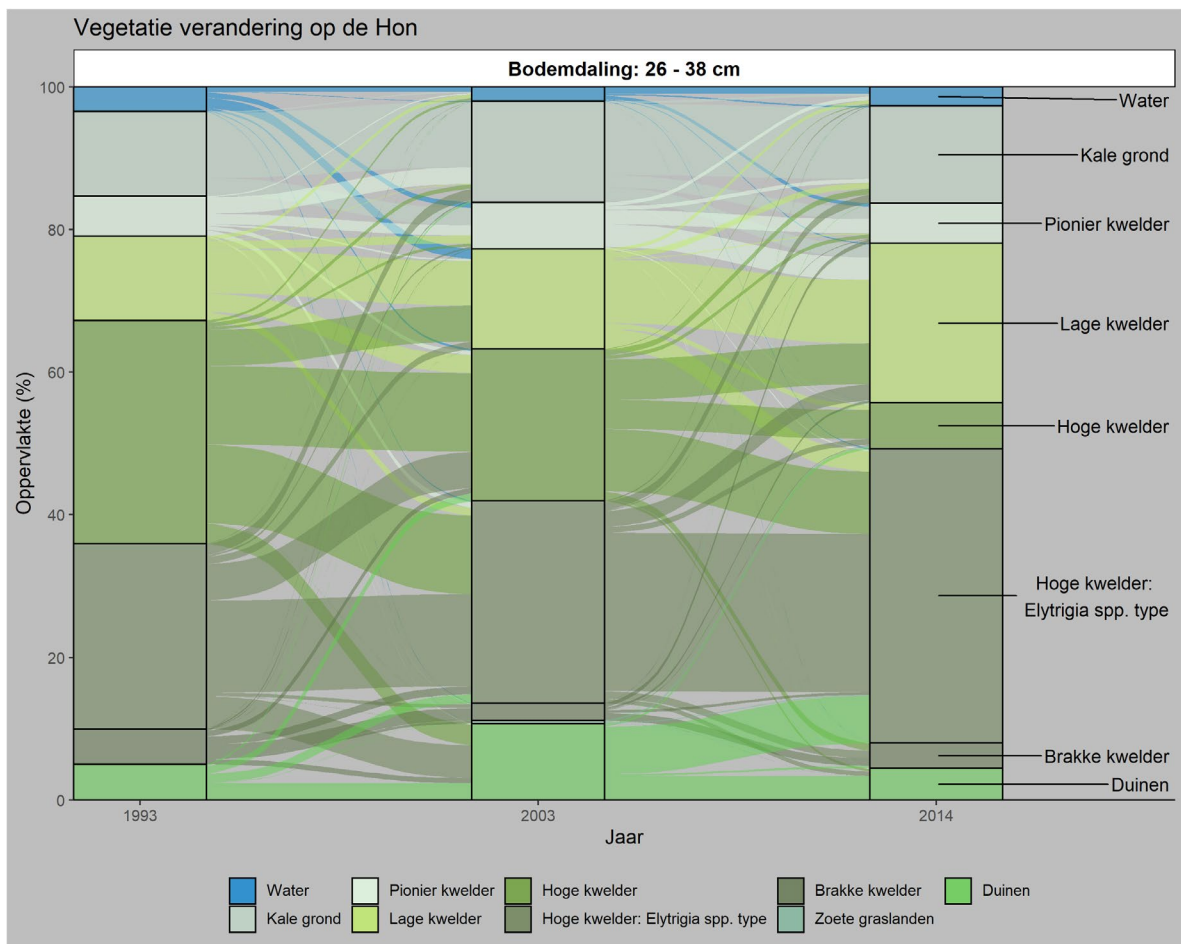
3.2 Vegetatiekaarten

De vegetatiekaarten van het Neerlands Reid laten duidelijk een verschil zien in vegetatieontwikkeling tussen 1993 en 2014 en tussen de verschillende bodemdalingsniveaus (Figuur 3-4). In het gebied met 2 - 10 cm bodemdaling was er gedurende de hele periode vooral hoge en brakke kweldervegetatie aanwezig. Een deel van de hoge kweldervegetatie in 1993 veranderende in brakke kweldervegetatie in 2003 en 2014, maar verder is het gebied vrij stabiel gebleven. In het gebied met 10 - 18 cm bodemdaling is het aandeel lage kwelder toegenomen over tijd. In 1993 was er nauwelijks lage kwelder aanwezig, terwijl in 2014 dit is toegenomen met ongeveer 15%. Deze toename is vooral door een verandering van hoge kwelder in lage kwelder. Tegelijkertijd nam het aandeel brakke kwelder af ten gunste van hoge kwelder. De totale bedekking hoge kwelder is daardoor op gelijk niveau gebleven. Daarnaast is er een kleine toename aan van de kale grond in het gebied met 10 - 18 cm en 18 - 26 cm bodemdaling. In het gebied met 18 - 26 cm bodemdaling zijn de verandering in vegetatie vergelijkbaar met het gebied met 10 - 18 cm bodemdaling. Het aandeel lage kwelder is hier wel meer toegenomen, met circa 25%. Ook in dit gebied is brakke kweldervegetatie veranderd naar hoge kwelder, en hoge kwelder naar lage kwelder.



Figuur 3-4 De vegetatieontwikkeling in Neerlands Reid in drie categorieën van toenemende bodemdaling, voor drie verschillende jaren: 1993, 2003, 2014. De vegetatietypes zijn de TMAP typologie.

Aangezien er op De Hon niet veel variatie is in bodemdaling, is hierin geen onderscheid gemaakt. Op De Hon is tussen 1993 – 2014 de hoge kwelder veranderd in een lage kweldervegetatie of in een climax vegetatie gedomineerd door zeekweek (Figuur 3-5). Hierdoor is het aandeel lage kwelder toegenomen. Verder is het aandeel zeekweek dominante vegetatie binnen de hoge kwelder toegenomen.



Figuur 3-5 De vegetatieontwikkeling in de Hon voor drie verschillende jaren, 1993, 2003, 2014. Voor de vegetatietypes is de TMAP typologie gebruikt.

3.3 Permanente kwadranten

In het oude PQ netwerk vond tussen 1986 en 2018 in negen PQ's van de 38 PQ's regressie van de vegetatie plaats, waarvan drie op het NLR en zes op De Hon.

- Zes PQ's met hoge kwelder vegetatie veranderden in lage kwelder (4), pionierzone (1) of kale grond (1) (maaiveldhoogtes in 2018 tussen 0.98 en 1.34 m boven NAP) .
- Bij één PQ is de lage kwelder vegetatie verdwenen en was er geen vegetatie meer aanwezig (maaiveldhoogte in 2018: 0.94 m boven NAP).
- Bij twee PQ's is de pioniervegetatie verdwenen door erosie van de kwelderrand (maaiveld in 2018 tussen 0.88 en 0.96 m boven NAP).

In het nieuwe meetnet vond in 21 PQ's (inclusief VQ's) van de honderdveertig PQ's regressie plaats, waarvan acht op het Neerlands Reid en dertien op De Hon (*Figuur 3-6A*).

- De meeste PQ's hadden in 1993 hoge kweldervegetatie, waarvan er dertien zijn veranderd in lage kwelder en één in pionier kwelder (de maaiveldhoogte in 2020/2021 tussen 1.11 en 1.51 m boven NAP).
- Drie PQ's zijn van lage kwelder naar pionier kwelder veranderd (maaiveldhoogte 2020/2021 tussen 1.06 en 1.15m boven NAP) en
- Eén PQ van brakke kwelder naar lage kwelder (maaiveldhoogte 2020/2021 1.21 m boven NAP).
- Eén PQ van pionier kwelder naar kale grond (maaiveldhoogte 2020/2021 0.99 m boven NAP).

Er is een grote range in maaiveldhoogtes van de PQ's waar regressie plaats vond (1.06 – 1.51 m boven NAP). Deze range in maaiveldhoogtes geeft aan dat regressie niet bij een specifieke maaiveldhoogte plaats vindt.

De bedekking kale grond is in het nieuwe meetnet vrijwel niet aanwezig in de PQ's met een bodemdaling van 2 - 18 cm. In de PQ's met meer dan 18 cm bodemdaling is het ongeveer 7.5% (Figuur 3-6B). De bedekking kale grond was gerelateerd aan maaiveldhoogte, namelijk in lager gelegen PQ's komt meer kale grond voor (Tabel 3-2). Klein schorrekruid is vrijwel alleen maar aanwezig ook hoger op PQ's met meer dan 18 cm bodemdaling (Figuur 3-6B) al is het dan niet direct gerelateerd aan bodemdaling (Tabel 3-2). Klein schorrekruid komt vooral veel voor in PQ's waar regressie heeft plaats gevonden. Zeekraal komt vooral op het Neerlands Reid voor, in de PQ's met meer dan 18 cm bodemdaling (Figuur 3-6B). Deze pioniersoort is voornamelijk aanwezig op de lagere maaiveldhoogtes en heeft de hoogste bedekking dicht bij het wad (Tabel 3-2).

Van de abiotische factoren had alleen het zoutgehalte (EC) een significant effect op het aandeel van de PQ's waar regressie heeft plaats gevonden (Tabel 3-3). PQ's waar regressie heeft plaatsgevonden hebben een significant hoger zoutgehalte. Op kale plekken was de bulkdichtheid hoger dan op plekken met vegetatie. PQ's met veel zeekraal hadden een lagere redox-waarde en de bulkdichtheid was hoger. De bedekking van klein schorrekruid was niet gerelateerd aan de abiotische variabelen, behalve bulkdichtheid.

Tabel 3-2 Lineaire modellen met wel/niet regressie van de vegetatie als binomiale verdeling (0 = regressie, 1 = stabiel/successie) en lineaire modellen met bedekking kale grond, zeekraal en klein schorrekruid. De modellen worden gerelateerd aan de ruimtelijke ligging in de kwelder. Getallen geven de t-waarden en de significantie weer, waarbij de significantie is uitgedrukt in p-waarden en aangegeven met sterretjes.

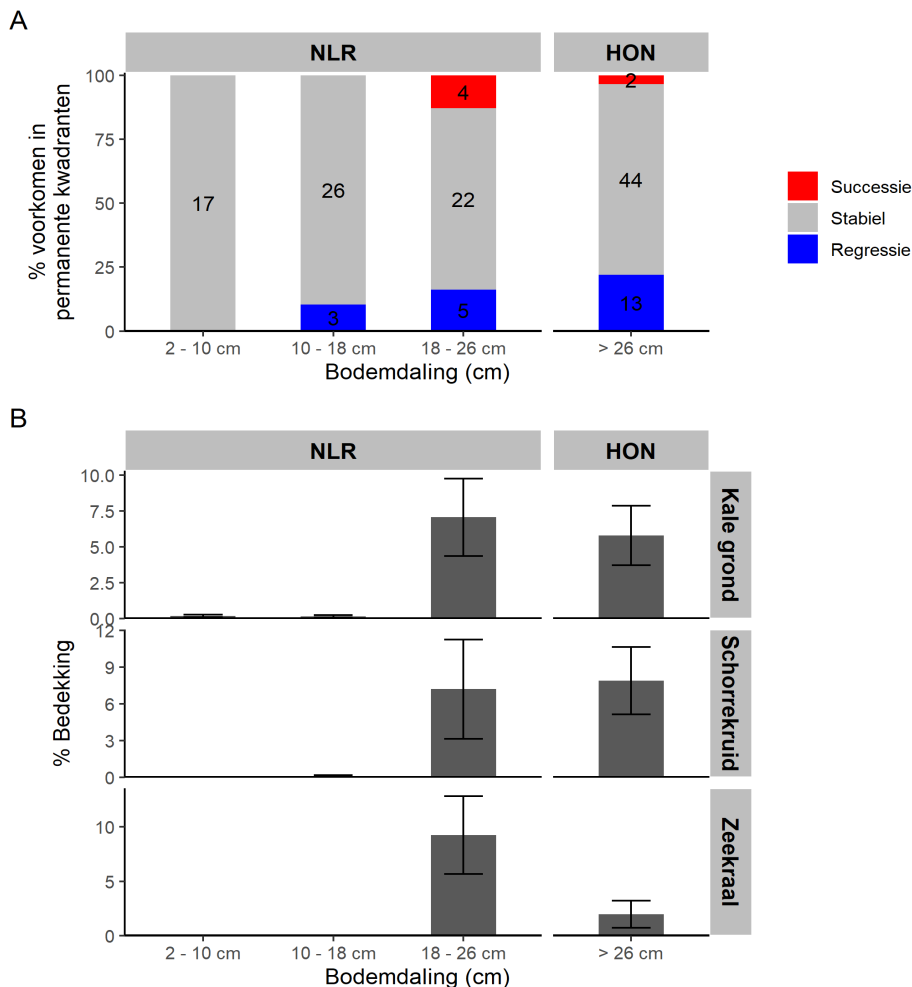
Factor	Regressie		Bedekking		
	Oud meetnet	Nieuw meetnet	kale grond	zeekraal	klein schorrekruid
Intercept	-1.78	-0.67	3.38***	2.63**	3.04**
Maaiveldhoogte	2.02*	2.1*	-3.79***	-4.55***	-1.86
Verandering in maaiveldhoogte	0.91				
Bodemdaling		-0.62	-1.23	0.02	-0.91
Afstand sedimentbron	-0.31	-0.18	1.45	0.93	-1.19
Afstand wad via kreek	0.33	1.3	-1.21	-3.19*	-1.18
Stabiel of Regressie			-1.61	0.96	-4.44***
Locatie	-0.71	-0.82	-0.3	3.1***	-1.37
log link	-11.33	-51.18			
F-statistics			4.08**	7.62**	8.57**
R ²	0.59	0.18	0.12	0.23	0.25
AIC	35	114	1073	989	1154
BIC	44	132	1097	1012	1177
DF residual	32	130	129	129	129

p-waarden: * < 0.05, ** < 0.01, *** < 0.001

Tabel 3-3 Lineaire modellen met wel/niet regressie van de vegetatie als binomiale verdeling (0 = regressie, 1 = stabiel/successie) en lineaire modellen met bedekking kale grond, zeekraal en klein schorrekruid. De modellen worden gerelateerd aan de abiotische factoren. Getallen geven de t-waarden en de significantie weer, waarbij de significantie is uitgedrukt in p-waarden en aangegeven met sterretjes.

Factor	Regressie	Bed. kale grond	Bed. zeekraal	Bed. klein schorrekruid
Intercept	0.69	-1.29	-2.46*	-1.84
Redox	-1.4	-1.98	-2.64*	0.75
Bulkdichtheid	-0.33	2.11*	3.49***	2.15*
Vochtgehalte	1.44	1.11	1.96	1.25
Elektrische conductiviteit	-2.39*	0.54	1.05	1.65
Organische stof	-1.26	0.49	0.45	0.01
Overstromingsvrije periode	1.21	-0.51	0.81	0.01
Locatie	-0.98	0.45	0.99	-0.08
log link	-15.1			
F-statistics		2.52**	5.36**	1.74**
R ²	0.33	0.13	0.3	0.07
AIC	46	568	515	595
BIC	65	588	535	616
DF residual	65	65	65	65

p-waarde: * < 0.05, ** < 0.01, *** < 0.001



Figuur 3-6 A: Aandeel PQ's die stabiel zijn of waar successie of regressie plaatsvindt ten opzichte van de bodemdaling, voor NLR en de Hon. B: De bedekking (in%) van de kale grond, klein schorrekruid en zeekraal ten opzichte van de bodemdaling en voor het NLR en De Hon.

3.3.1 Multivariate analyse ruimtelijke ligging

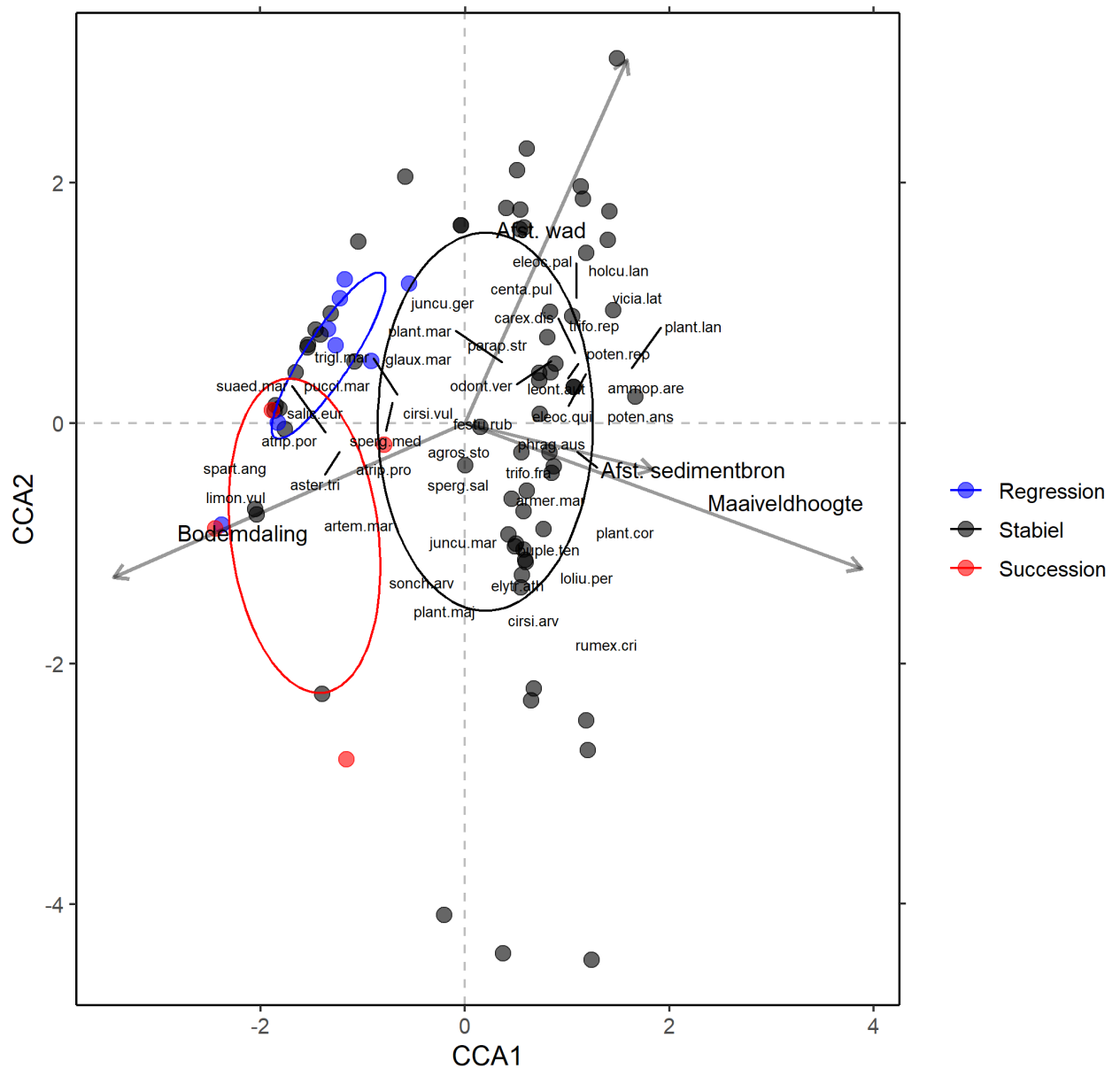
De soortensamenstelling van het oude PQ meetnet werd bepaald door de factoren maaiveldhoogte, maaiveldhoogte-verandering en de locatie (NLR of Hon) (Tabel 3-4). De pionier en lage kwelder soorten komen vooral voor bij een lagere maaiveldhoogte (Bijlage 4). Op de NLR komen vooral begrazingstolerante soorten voor, terwijl op De Hon meer soorten voorkomen die niet begrazingstolerant zijn. In PQ's met hogere opslibbingssnelheid komt meer regressie voor en is de bedekking met pioniersoorten hoger.

Tabel 3-4 Canonical Correspondence Analysis (CCA) met het oude meetnet en nieuwe meetnet. Voor het nieuwe meetnet zijn de twee gebieden apart geanalyseerd. Een anova met de omgevingsvariabelen. Getallen geven de F-waarden en de significantie weer, waarbij de significantie is uitgedrukt in p-waarden en aangegeven met sterretjes.

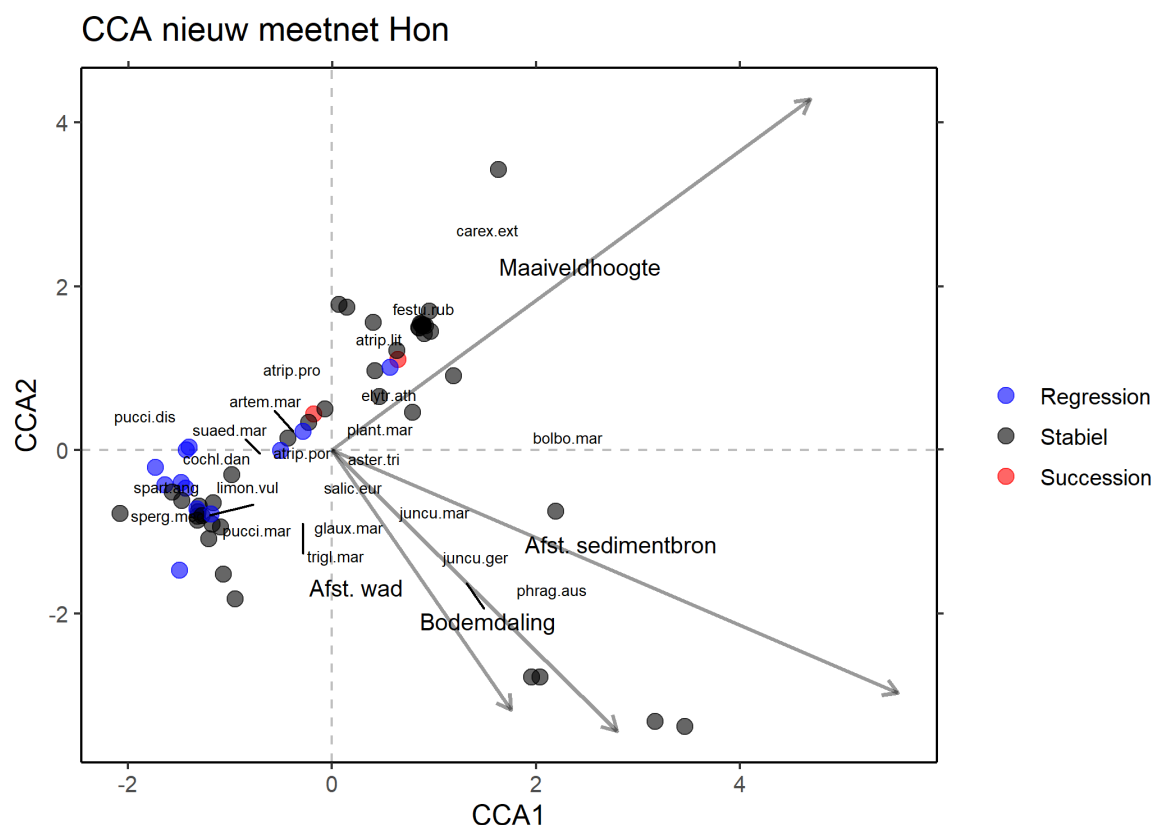
Factor	Oud meetnet Nieuw meetnet		
	NLR + HON	NLR	Hon
Maaiveldhoogte	3.69**	4.11**	4.21**
Maaiveldhoogte verandering	1.79*		
Bodemdaling		2.76**	2.98**
Afstand sedimentbron	1.08	1.25	1.65
Afstand wad via kreek	1	2.89**	1.94*
Locatie	2.68**		
R ²	0.3	0.19	0.2
Df	30	72	52

p-waarde: * < 0.05, ** < 0.01, *** < 0.001

Op het NLR en De Hon wordt de samenstelling van de nieuwe meetnet PQ's bepaald door de maaiveldhoogte, bodemdaling en de afstand van wad via de kreek (Tabel 3-4). Op het NLR komen soorten van de pionier- en lage kwelder veel voor op PQ's met een laag maaiveld en met een hoge bodemdaling. PQ's op het NLR met een grote afstand tot het wad via kreek hadden vooral soorten van de hoge kwelder of zoete graslanden. PQ's met regressie op het NLR komen voor op plekken met een lage maaiveldhoogte en met veel bodemdaling. PQ's op De Hon met lager maaiveld hebben vaker pionier en lage kwelder soorten (Figuur 3-8). In PQ's met hogere bodemdaling en een grotere afstand tot het wad komen de brakke soorten riet en zilte rus meer voor. PQ's met regressie hebben vooral een laag maaiveld met veel pioniersoorten.



Figuur 3-7 Resultaten van Canonical Correspondence Analyse (CCA) van de PQ's in het nieuwe meetnet op Neerlands Reid. De pijlen geven aan waar de omgevingsvariabelen het hoogst zijn. De locaties van de plantensoorten visualiseren waar ze dominant zijn. Voor de planten soorten zijn de wetenschappelijke namen gebruikt.



Figuur 3-8 Resultaten van Canonical Correspondence Analyse van de PQ's van het nieuwe meetnet op de Hon. De pijlen geven aan waar de omgevingsvariabelen het hoogst zijn. De locaties van de plantensoorten visualiseren waar ze dominant zijn. Hiervoor zijn de wetenschappelijke namen gebruikt.

3.3.2 Multivariate analyse abiotische factoren

Tabel 3-5 Canonical Correspondence Analysis (CCA) met het nieuwe meetnet waar de gebieden apart zijn geanalyseerd. Een anova met de abiotische omstandigheden. Getallen geven de t-waarden en de significantie weer, waarbij de significantie is uitgedrukt in p-waarden en aangegeven met sterretjes.

Factoren	Nieuw meetnet	
	NLR	Hon
Redox	0.66	0.49
Bulkdichtheid (kg/m ³)	0.91	1.25
Vochtgehalte (%)	0.92	0.52
EC mS/cm	1.95*	1.46
Organische stof (%)	0.93	2.57*
Dagen niet overstroomd	1.16	0.28
R ²	0.25	0.27
Df	32	26

p-waarde: * < 0.05, ** < 0.01, *** < 0.001

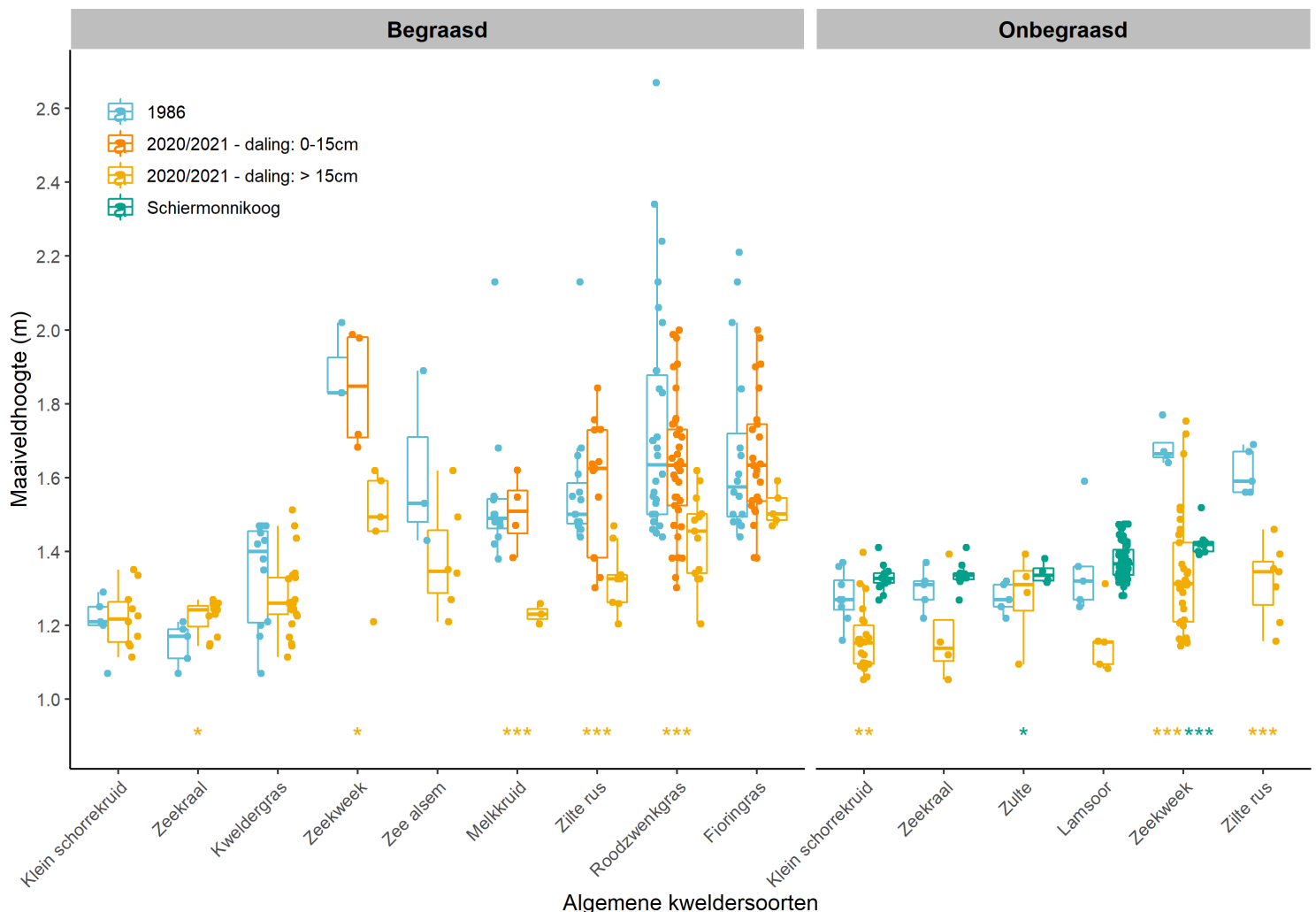
Uit de multivariate analyse met de abiotische variabelen blijkt dat op het Neerlands Reid het zoutgehalte (EC) de enige factor was die een significant effect had op de soortensamenstelling (Tabel 3-5).

Zouttolerante soorten kwamen vaker voor bij PQ's met een hoger zoutgehalte (Bijlage 5). De andere factoren waren niet significant. Op De Hon had alleen het percentage organische stof een significant effect op de soortensamenstelling. De organische stof was hoger op plekken met soorten als zilte rus, zeerus en riet, soorten die zorgen voor een dikkere organische toplaag in de bodem.

3.4 Individuele soorten

De verandering in maaiveldhoogte van de individuele soorten over tijd geeft aan in hoeverre deze zouden kunnen meedelen met een dalende bodem voordat de bedekking significant afneemt. Op het Neerlands Reid was er geen significant verschil tussen de maaiveldhoogte van 1986 en 2021 voor de soorten die groeiden in een gebied tussen 0 en 15 cm bodemdaling. In het gebied met meer dan 15 cm bodemdaling was er voor zeekweek, melkkruid, zilte rus en rood zwenkgras een significant verschil tussen de maaiveldhoogte van 1986 (voor bodemdaling) en 2020/2021 (Figuur 3-9). Alle vier de soorten hadden ook een significant verschil in de maaiveldhoogte tussen het gebied tot 15 cm bodemdaling en het gebied met meer dan 15 cm bodemdaling (zeekweek: $t = 3.36$, $p = 0.027$, melkkruid: $t = 5.15$, $p = 0.019$, zilte rus: $t = 4.45$, $p < 0.001$, rood zwenkgras: $t = 4.41$, $p < 0.001$). Opvallend genoeg was de maaiveldhoogte van zeekraal in 2020/2021 significant hoger dan in 1986.

Op De Hon was er voor klein schorrekruid, zeekweek en zilte rus een significant verschil in maaiveldhoogte tussen 1986 en 2021. Ook was er voor klein schorrekruid ($t = 7.94$, $p < 0.001$) en zeekweek ($t = 2.80$, $p = 0.008$) een significant verschil tussen Ameland (met bodemdaling) en Schiermonnikoog (zonder bodemdaling). Zulte groeide in Schiermonnikoog op een hoger maaiveld dan op Ameland in 1986, terwijl zeekweek op een significant lager maaiveld groeide op Schiermonnikoog dan op Ameland in 1986.



Figuur 3-9 Maaiveldhoogte voor negen soorten in de begraasde kwelder Neerlands Reid in 1986 en in 2021 voor de gebieden met 0 -15 cm bodemdaling en meer dan 15 cm bodemdaling. Maaiveldhoogte voor zes soorten op de Hon in 1986 en 2021, en voor Schiermonnikoog in 2009. De PQ's op Schiermonnikoog in 2009 hadden een vergelijkbare leeftijd als de PQ's op de Hon in 2021 en zijn allemaal onbegaasd. De asterisk geven weer of er een significant verschil is met de maaiveldhoogte in 1986. p-waarde: * < 0.05, ** < 0.01, *** < 0.001

4 Conclusies en aanbevelingen

In de voorliggende rapportage wordt het effect van bodemdaling op de kweldervegetatie op Ameland-Oost onderzocht. Dit is gedaan door het effect van abiotische factoren en de ruimtelijke ligging te relateren aan de bodemdaling en de vegetatieontwikkeling.

4.1 Abiotische omstandigheden

Een van de conclusies van de vorige jaarrapportages is dat op veel plekken de opslibbing niet hoog genoeg is om te corrigeren voor de bodemdaling (van Puijenbroek and Sonneveld 2021). Dat is in lijn met de bevindingen in deze rapportage. De gebieden met meer bodemdaling hebben een lager maaiveld en worden vaker overstroomd, waardoor het natter en zouter is. Deze gebieden hebben een lager redox-waarde wat een indicatie is voor zuurstofloze en stressvolle omstandigheden. Zoutgehalte en aanwezigheid van zuurstof zijn belangrijke indicatoren voor het voorkomen van kwelderplanten (Colmer and Flowers 2008b, Flowers and Colmer 2008, Davy et al. 2011, Cott et al. 2013).

Uit de vorige jaarrapportages bleek dat de opslibbing het hoogst was nabij de sedimentbron. Effecten van bodemdaling op de kwelder zullen hierdoor groter zijn verder weg van de sedimentbronnen (krek en wad). Naar verwachting zullen er lager gelegen kommen ontwikkelen achter de oeverwallen door een te lage sedimentatie (Hartig et al. 2002). De analyse in dit rapport laat zien dat de maaiveldhoogte juist hoger is op een grotere afstand tot de sedimentbron, waarschijnlijk komt dit doordat de delen bij de duinen hoger zijn dan bij het wad. Het vochtgehalte was daarentegen wel hoger op grotere afstand van de sedimentbron. Beide relaties hadden niet een hoge R^2 , wat aangeeft dat het effect van bodemdaling niet veel sterker is op een grotere afstand tot de sedimentbron.

Drainage (wegstromen) van vocht op de kwelder kan worden verminderd door het aanstampen van de bodem door grazers. Een kenmerk van een aangestampde bodem is dat de bulkdichtheid hoger is (Elschot et al. 2013). Tegen de verwachting in was er geen significant verschil tussen de begraasde kwelder het Neerlands Reid en de onbegraasde kwelder De Hon, behalve voor de redoxpotentiaal. Uit vergelijkbare metingen op Schiermonnikoog blijkt dat de bulkdichtheid afneemt met kwelderleeftijd; de bulkdichtheid op de 120 jaar oude begraasde kwelder is van dezelfde orde van grootte als de jongere onbegraasde kwelders tussen 25 en 55 jaar oud (Elschot et al. 2013). Daarnaast laat deze rapportage zien dat de bulkdichtheid afneemt met afstand tot sedimentbron en wad, factoren die belangrijker kunnen zijn dan begrazing of kwelderleeftijd en deze zijn niet meegenomen door Elschot et al. (2013). Bij een lagere bulkdichtheid was er significant meer vocht in de bodem en een hoger zoutgehalte, dit kan mogelijk verklaard worden doordat er meer ruimte in de bodem is voor indringing van zout water. Er is geen directe relatie gevonden tussen bulkdichtheid en zuurstofloze omstandigheden.

4.2 Regressie op de kwelder

De vegetatiekaarten laten zien dat het aandeel lage kwelder is toegenomen in de gebieden met meer bodemdaling. Deze toename komt vooral doordat voorheen hoge kwelder veranderde in lage kwelder. Er was nog geen toename zichtbaar van het aandeel pionier kwelder op beide locaties. Op het Neerlands Reid is het aandeel van de kwelder met kale grond toegenomen in het gebied met de hoogste bodemdaling. Bij de meeste PQ's waar regressie plaatsvond is hoge kwelder veranderd in lage kwelder. Dit komt doordat beide kwelders voornamelijk uit hoge kwelder bestonden toen de gaswinning en dit onderzoek startten. Het maaiveld is niet zo laag gedaald dat lage kweldersoorten niet meer kunnen vestigen en groeien.

Uit de analyse kwam dat maaiveldhoogte en het zoutgehalte de belangrijkste factoren waren voor het voorkomen van regressie van vegetatie. In PQ's met een lage maaiveldhoogte en hoger zoutgehalte

vindt vaker regressie plaats. De range in maaiveldhoogte van PQ's waar hoge kwelder veranderde in lage kwelder was ongeveer 40 cm. Deze range in maaiveldhoogtes waar regressie plaatsvindt is vrij groot en dat geeft aan dat het zoutgehalte ook erg belangrijk is. Het kan ook betekenen dat een andere factor belangrijk is die mogelijk niet goed is meegenomen in de analyse, zoals drainage en begrazing. Voor de oude PQ's was maaiveld hoogteverandering significant in de multivariate analyse, maar daar vond regressie vooral plaats waar het maaiveld stabiel of hoger werd. Dit resultaat is het tegenoverstelde van wat was verwacht, waarschijnlijk door de niet-representatieve ligging van het oude meetnet. Met het nieuwe meetnet waren er bij hogere bodemdaling wel meer PQ's met regressie in het Neerlands Reid. Voor De Hon was er geen effect van bodemdaling, maar daar is de bodemdaling in het hele gebied hoog en is er geen verschil te verwachten in respons.

4.3 Ligging op de kwelder

In de vorige integrale rapportage was de hypothese opgesteld dat regressie voorkomt op plekken met een laag maaiveld en slechte drainage. Deze plekken zouden vooral ontstaan verder weg van de sedimentbron omdat daar de opslibbing lager is en er netto meer maaiveld daling is. Op die plekken kunnen komen ontstaan waar het water minder makkelijk wegstroomt na een hoogtij, storm of zware regenval. Op deze plekken met slechte drainage is het erg vochtig en kunnen er zuurstofloze, stressvolle omstandigheden ontstaan (Crooks et al. 2002, Wilson et al. 2014). Lage kwelder en pioniersoorten zijn beter aangepast aan zuurstofloze omstandigheden dan hoge kweldersoorten en daardoor zou op die plekken regressie plaats kunnen vinden (Gray and Scott 1977, Castillo et al. 2000, Holmer et al. 2002). In onze analyse heeft de afstand van het wad wel een significant effect op de plantensamenstelling, maar geen significant effect op de aanwezigheid van regressie. De afstand tot de sedimentbron heeft ook geen significant effect. Verder waren PQ's met regressie niet significant natter en hadden ook geen significant lagere redoxwaardes, maar wel een significante hogere EC-waardes. Het is ook mogelijk dat de ligging op de kwelder wel een belangrijke factor is in combinatie met andere factoren zoals maaiveld en EC. In dit rapport is niet geanalyseerd of er ook significante interacties zijn tussen factoren, dit is iets wat mogelijk nog verder kan worden onderzocht.

4.4 Individuele soorten

Op het Neerlands Reid komen vooral soorten voor die begrazingstolerant zijn. In het noordwesten van het Neerlands Reid komen vooral soorten voor die op grazige brakke plekken groeien zoals: witte klaver, zilverschoon en fioringras. Meer naar het oosten wordt het zouter en komen de plantensoorten, zoals melkkruid, rood zwenkgras en zilte rus voor. Dichter bij het wad neemt kweldergras toe en op plekken met een laag maaiveld domineren zeekraal en klein schorrekruid. Aan de oostkant van de Oerdsloot is de begrazingsdruk lager en daar komen de begrazingsintolerante climaxsoorten zoutmelde en zeekweek meer voor. Op De Hon domineert het climaxstadium van hoge kwelder met zeekweek, en bedekt deze vrijwel de gehele kwelder tussen duinvoet en kwelderrand. Daarnaast komt er ook veel zoutmelde en spiesmelde voor. Op stukken kwelder die natter zijn domineert klein schorrekruid of, als het water brak is, riet met zilte rus (eigen observaties).

Een aantal plantensoorten die groeien op het gebied van de kwelder met meer dan 15 cm bodemdaling komen op een significant lager maaiveld in 2020/2021 voor dan in 1986. De soorten die op een lager maaiveld groeien met meer bodemdaling zijn vooral soorten van de hoge kwelder: zeekweek, melkkruid, zilte rus en rood zwenkgras. Van de twee eenjarige soorten, groeit alleen klein schorrekruid op de Hon lager in 2020/2021 dan in 1986. Zeekraal groeit zelfs iets hoger op het NLR in 2020/2021 dan in 1986.

Dat sommige soorten nu op een lager maaiveld groeien dan in 1986 geeft aan dat soorten ergens kunnen vestigen en eenmaal gevestigd bestendig zijn tegen slechtere omstandigheden. Van zeekweek is bekend dat het tijdens successie op een steeds lager maaiveld kan voorkomen (Veeneklaas et al. 2013). Op Schiermonnikoog is dat ook het geval, daar bevindt zeekweek ook al op een significant lager maaiveld in vergelijking met Ameland in 1986. Maar op Ameland in 2020/2021 bevindt zeekweek nog steeds een stuk lager dan op Schiermonnikoog. Of dit komt door successie of doordat de maaiveldhoogte is gedaald kan nog niet worden geconcludeerd, vooral omdat de range in maaiveldhoogte bij

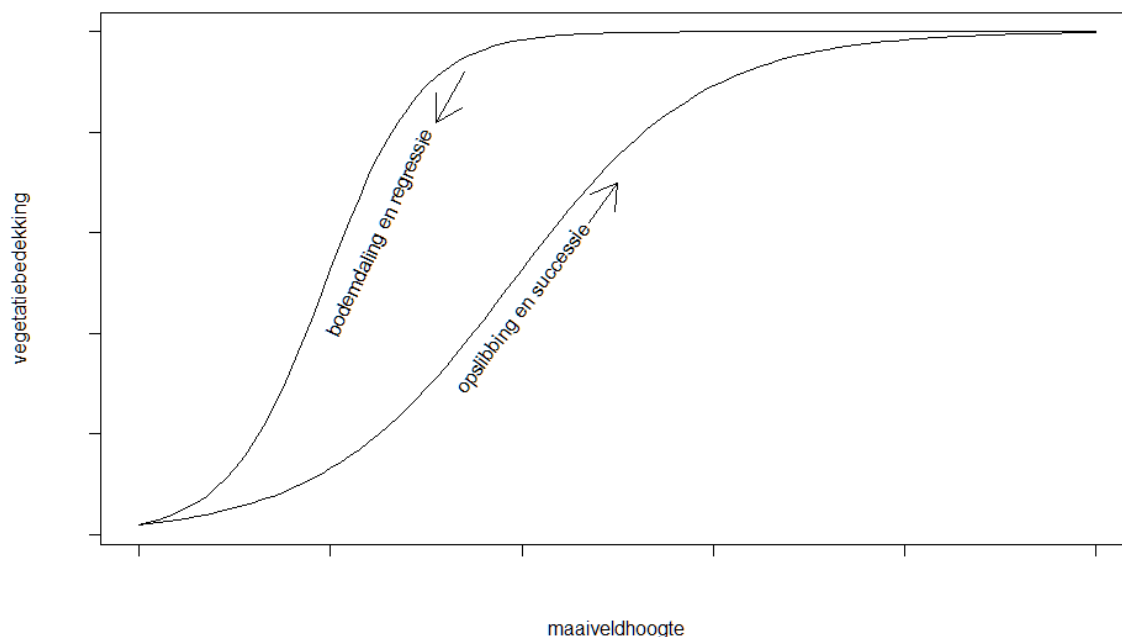
Schiermonnikoog klein is. Soorten die niet een- of tweejarig zijn, zoals zulte, zeekraal en klein schorrekruid, moeten zich regelmatig opnieuw vestigen. Tijdens kiemen is een plant het gevoeligst voor maaiveldhoogte en geschikte abiotische omstandigheden (Yuan et al. 2020). Deze planten kunnen daardoor minder makkelijk vestigen op lager maaiveld. Op Ameland komen deze soorten dan ook niet op een lager maaiveld voor in 2020/2021 in vergelijking met 1986. Op het Neerlands Reid komt zeekraal op een significant hoger maaiveld voor in vergelijking met 1986, de rede hiervoor zou een verandering in begrazingsregime kunnen zijn. Daarnaast komt klein schorrekruid nu op De Hon op lagere maaiveldhoogtes voor dan in 1986. Uit de analyse van de bedekking van klein schorrekruid kwam dat het vaak voorkomt op plekken waar regressie heeft plaatsgevonden. Waarschijnlijk kan het erg goed tegen zoute omstandigheden die optreden door bodemdaling (Tessier et al. 2000). Andere studies geven aan dat klein schorrekruid niet goed kan ontkiemen op natte zuurstofloze omstandigheden (Davy et al. 2011), dus het komt waarschijnlijk niet voor op te natte plekken. Bij de meerjarige soort kweldergras is de maaiveldhoogte niet significant lager dan in 1986, dat kan komen omdat het maaiveld niet zover is gedaald of omdat kweldergras niet lager kan groeien.

Deze conclusies zijn afhankelijk van de range in maaiveldhoogte van de PQ's. Er zijn 65 PQ's in 1986 gebruikt voor de maaiveldhoogte van de individuele soorten, waar de PQ's een range in maaiveldhoogte hebben van 1.10 m tot 2.20 m boven NAP. Voor het nieuwe meetnet zijn voor de analyse van individuele soorten 128 PQ's gebruikt, waarbij er een range in maaiveldhoogtes is van 1.05 m tot 2.00 m boven NAP. Verder worden in de zomer van 2022 nog 60 extra VQ's opgenomen waardoor de dataset nog groter zal zijn. Bij Schiermonnikoog is er geen goede range in maaiveldhoogtes van kwelderrand naar duinvoet, er zal moeten onderzocht of er een betere dataset beschikbaar is over de vegetatie. Verder zijn er ook een aantal soorten die in weinig PQ's voorkomen, waardoor de range in maaiveldhoogte niet heel nauwkeurig is. Het gaat om de volgende plantensoorten op het NLR: zeekweek, zeealsem, en melkkruid en op De Hon: zeekraal, zulte en lamsoor.

4.5 Effect bodemdaling op kweldervegetatie

De kwelder is verdeeld in verschillende zones met elk eigen plantengemeenschappen dat wordt bepaald door de overstromingsfrequentie tijdens hoogwater (Oloff et al. 1988, Van Wijnen et al. 2014). Zo kan de eerste pioniervegetatie vanaf 25 cm onder gemiddeld hoogwater vestigen (maaiveldhoogte van 0.81 m boven NAP). De lage kwelder zone zal zich vestigen vanaf ongeveer 5 cm boven gemiddeld hoogwater (maaiveldhoogte van 1.11 m boven NAP) en de hoge kwelder heeft een ondergrens van 30 cm boven gemiddeld hoogwater (maaiveldhoogte vanaf 1.36 m boven NAP) (Elschot et al. 2017). De zonehypothese ging ervan uit dat regressie door maaiveldddaling net zo verloopt als successie door maaiveldophoging. Maar in eerdere rapportages is al geconcludeerd dat de zonehypothese niet bruikbaar is voor Ameland, omdat veel soorten op Ameland voorkomen op lagere maaiveldhoogtes dan verwacht zou zijn gebaseerd op de ondergrens van de zone waar ze zouden moeten voorkomen. Er is op de kwelder waarschijnlijk eerder sprake van een hysteresis lus; de abiotische omstandigheden kunnen voor reeds gevestigde vegetatie veel slechter worden voordat de soort in bedekking weer afneemt (Válega et al. 2008, Duke et al. 2019, Figuur 4-1).

De hysteresis lus is ook onderdeel van de theorie alternatieve toestanden (Scheffer et al. 2001), waar bijvoorbeeld vegetatiebedekking opeens kan omslaan naar kale grond. Op Ameland lijken het eerder verschillende stappen te zijn, de hoge kwelder veranderd in de lage kwelder en de lage kwelder in de pionier kwelder etc. Direct van hoge kwelder naar kale grond is slechts een enkele keer voorgekomen in de PQ's.



Figuur 4-1 Conceptueel diagram van een hysteresis lus met een 'heenweg' en een 'terugweg'. Op de 'heenweg' neemt als gevolg van opslibbing de maaiveldhoogte toe en er vindt successie plaats waardoor de vegetatiebedekking van een bepaalde soort toeneemt. Bij bodemdaling op de 'terugweg' blijft de vegetatiebedekking van de reeds gevestigde soort hoger bij een lagere maaiveldhoogte.

Welke omstandigheden regressie veroorzaken van vegetatie is niet duidelijk. Maaiveldhoogte komt als de belangrijkste factor uit de analyse, maar de range in maaiveldhoogten van de PQ's die regressie laten zien is vrij groot. Dit geeft aan dat er niet een specifiek omslagpunt is van maaiveldhoogte waarop PQ's regressie vertonen. Van een aantal PQ's met regressie van hoge kwelder naar lage kwelder bevond het maaiveld zich nog boven de ondergrens van de hoge kwelderzone. Dat komt omdat niet alleen maaiveldhoogte bepalend is voor het voorkomen van regressie, PQ's met regressie hadden ook een hoger zoutgehalte. Verder is drainage ook aangegeven als een belangrijke factor voor de vegetatieontwikkeling. Ondanks de relatie van inundatievrije periode, vochtgehalte en redoxwaardes met bodemdaling, hadden deze factoren geen significant effect op de vegetatieontwikkeling. Dat deze abiotische factoren geen significant effect hadden zou kunnen komen omdat ze maar één keer zijn gemeten. Op het moment van meten was het redelijk droog en was de kwelder een tijd niet overstroomd geweest, een week later was er een storm over de kwelder geweest en was het gebied veel natter. Daarnaast was het groeiseizoen voorbij in september, de abiotische omstandigheden aan het begin van het groeiseizoen zijn belangrijker voor de vegetatieontwikkeling (Yuan et al. 2020). De inundatiefrequentiedata is gevoelig voor uitschieters en de afzonderlijke drukmeters kunnen een bias hebben. Daarnaast was er ook geen aparte barometer aanwezig op het eiland waardoor er voor gekozen is om inundaties mee te nemen als er een drukverschil is van 3 hPa (hoogteverschil van 3cm). Tot slot, aangezien de drukmeters een aantal centimeters boven de grond staan, kunnen inundaties met lage waterstanden niet worden meegenomen. Deze inundaties kunnen wel zorgen voor zuurstofloze omstandigheden.

Verder had de afstand tot de sedimentbron ook geen duidelijk effect op het voorkomen van vegetatieregressie. Dit komt waarschijnlijk omdat op grotere afstanden van de sedimentbron het maaiveld ook hoger kan zijn, daardoor is er geen duidelijk verband met de bodemdaling. Mogelijk zou een interactie tussen afstand sedimentbron en andere factoren zoals, maaiveldhoogte en afstand via kreek andere resultaten geven.

Het Neerlands Reid wordt begraasd, maar begrazingstype en druk verschilt over het gebied. Begrazing zorgt voor extra stress op de planten, zo verandert de vegetatie van de climax soort zeekweek naar het begrazingstolerante roodzwenkgras of kweldergras (Howison et al. 2015). Regressie kan eerder voorkomen, omdat door het lopen van het vee over de kwelder de bodem wordt aangestampd. Daardoor

zal er slechtere drainage kunnen zijn (van Klink et al. 2015). Het zou beter zijn om de begrazingsdruk mee te nemen in de analyse. Op het moment van schrijven is de begrazingsdruk nog niet beschikbaar, maar voor de integrale rapportage zal deze factor worden meegenomen.

4.6 Onderzoeksvragen van bodemdalingscommissie

Op Ameland vindt door de bodemdaling regressie van de vegetatie plaats waarbij voornamelijk hoge kweldervegetatie verandert in lage kweldervegetatie. Maaiveldhoogte en zoutgehalte waren de belangrijkste factoren voor regressie, maar het maaiveld van de PQ's die regressie vertoonde hadden een ruime range. Het blijft dus onduidelijk waarom er regressie plaatsvindt op sommige plekken en niet op vergelijkbare locaties met dezelfde maaiveldhoogte. Uit de analyse komt dat sommige soorten op veel lager maaiveld voorkomen dan in 1986, deze soorten zouden misschien tegen slechtere omstandigheden kunnen nu de soorten zijn gevestigd. Hieronder worden de vragen van de bodemdalingscommissie beantwoord.

- Wat is het effect van bodemdaling op de inundatiefrequentie, en welk effect heeft inundatiefrequentie op de kweldervegetatie?
 - o Door bodemdaling is de gemiddelde maaiveldhoogte en de maximale inundatie vrije periode significant lager op de kwelder. Er is geen significant direct effect van de maximale inundatievrije periode op het plaatsvinden van vegetatieregressie op de kwelder.
- Wat is het effect van bodemdaling op de drainage, en wat is het effect van drainage op de kweldervegetatie?
 - o In gebieden met meer bodemdaling is de kwelder vochtiger en is de redox waarde lager, wat een indicatie kan zijn voor slechtere drainage. Er is geen directe significante relatie tussen vocht en de redox waarden en de vegetatieontwikkeling gevonden.
- Neemt het komvolume toe door de bodemdaling, en heeft die eventuele toename in komvolume een effect op de vegetatie?
 - o Door de bodemdaling is de gemiddelde maaiveldhoogte lager, waardoor het komvolume toeneemt. In hoeverre komen zich hebben ontwikkeld achter een oeverwal is onduidelijk. Er was geen significante relatie met maaiveldhoogte en afstand tot de sedimentbron, maar dat is niet de beste manier om komvolume te bepalen. Daarnaast had de afstand tot de sedimentbron en de afstand tot het wad via de kreek ook geen direct effect op de vegetatieontwikkeling.

4.7 Aanbevelingen

- De vegetatiekaart 2020 van Ameland komt dit jaar beschikbaar. Met deze kaart kan vlakdekkend de vegetatieontwikkeling worden weergegeven. Als deze vegetatiekaart wordt gecombineerd met de kleidiktekaart kan worden geanalyseerd in hoeverre de vegetatieontwikkeling afhankelijk is van de ruimtelijke ligging in de kwelder. Aangezien deze data een betere spreiding heeft dan het nieuwe meetnet kan dat nieuwe inzichten opleveren.
- Voor het Neerlands Reid is het belangrijk om de vegetatiedruk mee te nemen als factor. De begrazingsdruk kan het effect van de bodemdaling versterken.
- Plaats extra VQ's op Ameland om een betere range te krijgen van maaiveldhoogte van de individuele soorten. Daarnaast is een betere dataset van vegetatievoorkomens op Schiermonnikoog met een grotere range in maaiveldhoogtes gewenst.
- Vegetatieregressie wordt waarschijnlijk bepaald door een combinatie van verschillende factoren. Verdere analyse waarbij interacties tussen verschillende factoren worden meegenomen in de modellen zou de effecten van bodemdaling beter kunnen beschrijven.
- Onderzoek wat het effect is van bodemdaling op komvolume. Dit zou kunnen worden onderzocht door de hoogte te bepalen langs een transect van oeverwal naar het achterliggende kweldergebied.

-
- De abiotische factoren zijn eenmalig gemeten aan het eind van het groeiseizoen. Daardoor zijn ze misschien niet representatief voor de condities die de planten ondervinden in het begin van het groeiseizoen. In hoeverre abiotische omstandigheden regressie van de vegetatie kunnen veroorzaken zou beter kunnen worden getest als de abiotische factoren jaarrond meer frequent en in ieder geval aan het begin van het groeiseizoen worden gemeten.

5 Kwaliteitsborging

Wageningen Marine Research beschikt over een ISO 9001:2015 gecertificeerd kwaliteitsmanagementsysteem. De organisatie is gecertificeerd sinds 27 februari 2001. De certificering is uitgevoerd door DNV.

Literatuur

- Castillo, J. M., L. Fernández-Baco, E. M. Castellanos, C. J. Luque, M. E. Figueroa, and A. J. Davy. 2000. Lower limits of *Spartina densiflora* and *S. maritima* in a Mediterranean salt marsh determined by different ecophysiological tolerances. *Journal of Ecology* 88:801–812.
- Colmer, T. D., and T. J. Flowers. 2008a. Flooding tolerance in halophytes. *The New phytologist* 179:964–974.
- Colmer, T. D., and T. J. Flowers. 2008b. Flooding tolerance in halophytes. *The New phytologist* 179:964–974.
- Cott, G. M., D. T. Reidy, D. V. Chapman, and M. A. K. Jansen. 2013. Waterlogging affects the distribution of the saltmarsh plant *Atriplex portulacoides* (L.) Aellen. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants* 208:336–342.
- Crooks, S., J. Schutten, G. D. Sheern, K. Pye, and A. J. Davy. 2002. Drainage and Elevation as Factors in the Restoration of Salt Marsh in Britain. *Restoration Ecology* 10:591–602.
- Dankers, N., K. S. Dijkema, G. Londo, and P. A. Slim. 1987. De ecologische effecten van bodemdaling op Ameland. RIN-rapport 87/14. Texel.
- Davy, A. J., M. J. H. Brown, H. L. Mossman, and A. Grant. 2011. Colonization of a newly developing salt marsh: disentangling independent effects of elevation and redox potential on halophytes. *Journal of Ecology* 99:1350–1357.
- van Dobben, H. F., A. V. de Groot, and J. P. Bakker. 2022. Salt Marsh Accretion With and Without Deep Soil Subsidence as a Proxy for Sea-Level Rise. *Estuaries and Coasts*.
- Duke, N. C., C. Field, J. R. Mackenzie, J. O. Meynecke, and A. L. Wood. 2019. Rainfall and its possible hysteresis effect on the proportional cover of tropical tidal-wetland mangroves and saltmarsh–saltpans. *Marine and Freshwater Research* 70:1047–1055.
- Elschot, K., T. J. Bouma, S. Temmerman, and J. P. Bakker. 2013. Effects of long-term grazing on sediment deposition and salt-marsh accretion rates. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 133:109–115.
- Elschot, K., A. de Groot, C. Sonneveld, J. T. van der Wal, P. de Vries, A. G. Brinkman, W. van Duin, W. Molenaar, J. Krol, A. T. Kuiters, D. de Vries, R. M. A. Wegman, P. A. Slim, E. C. Koppelaar, and J. de Vlas. 2017. Ontwikkeling kwelder Ameland-Oost: Evaluatie bodemdalingsonderzoek 1986–2016. Pages 185–328 in J. de Vlas, editor. Monitoring effecten van bodemdaling op Oost-Ameland.
- Flowers, T. J., and T. D. Colmer. 2008. Salinity tolerance in halophytes. *The New phytologist* 179:945–63.
- Gray, A. J., and R. Scott. 1977. The Ecology of Morecambe Bay. VII. The Distribution of *Puccinellia maritima*, *Festuca rubra* and *Agrostis stolonifera* in the Salt Marshes. *Journal of Applied Ecology* 14:229–241.
- Hartig, E. K., V. Gornitz, A. Kolker, F. Mushacke, and D. Fallon. 2002. ANTHROPOGENIC AND CLIMATE-CHANGE IMPACTS ON SALT MARSHES OF JAMAICA BAY, NEW YORK CITY. *WETLANDS* 22:71–89.
- Holmer, M., B. Gribsholt, and E. Kristensen. 2002. Effects of sea level rise on growth of *Spartina anglica* and oxygen dynamics in rhizosphere and salt marsh sediments. *Marine Ecology Progress Series* 225:197–204.
- Howison, R. A., H. Olf, R. Steever, and C. Smit. 2015. Large herbivores change the direction of interactions within plant communities along a salt marsh stress gradient. *Journal of Vegetation Science* 26:1159–1170.
- Justin, S. H. F. W., and W. Armstrong. 1987. the Anatomical Characteristics of Roots and Plant Response To Soil Flooding. *New Phytologist* 106:465–495.
- Kirwan, M. L., and J. P. Megonigal. 2013. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature* 2013 504:7478 504:53–60.
- van Klink, R., M. Schrama, S. Nolte, J. P. Bakker, M. F. WallisDeVries, and M. P. Berg. 2015. Defoliation and Soil Compaction Jointly Drive Large-Herbivore Grazing Effects on Plants and Soil Arthropods on Clay Soil. *Ecosystems* 18:671–685.
- Nolte, S., E. C. Koppelaar, P. Esselink, K. S. Dijkema, M. Schuerch, A. V. De Groot, J. P. Bakker, and S. Temmerman. 2013. Measuring sedimentation in tidal marshes: A review on methods and their applicability in biogeomorphological studies. *Journal of Coastal Conservation* 17:301–325.
- Olf, H., J. P. Bakker, and L. F. M. Fresco. 1988. The Effect of Fluctuations in Tidal Inundation Frequency on a Salt-Marsh Vegetation. *Vegetatio* 78:13–19.
- Olf, H., J. De Leeuw, J. P. Bakker, R. J. Platerink, and H. J. van Wijnen. 1997. Vegetation Succession and Herbivory in a Salt Marsh: Changes Induced by Sea Level Rise and Silt Deposition Along an Elevational Gradient. *Journal of Ecology* 85:799–814.
- Petersen, J., B. Kers, and M. Stock. 2014. TMAP Typology of Coastal Vegetation in the Wadden Sea Area WADDEN SEA ECOSYSTEM No. 32 - 2014. Wilhelmshaven, Germany.

-
- Piening, H., W. van der Veen, and R. van Eijs. 2017. Bodemdaling. Pages 9–25 in J. de Vlas, editor. Monitoring effecten van bodemdaling op Oost-Ameland.
- van Puijenbroek, M. E. B., and C. Sonneveld. 2021. Opslibbing en kleilaagdikte op Ameland Oost. Den Helder.
- Rijkswaterstaat. 2022. Vegetatiekartering VEGWAD vlakken.
<https://maps.rijkswaterstaat.nl/dataregister/srv/dut/catalog.search#/metadata/0bb7f390-7761-41da-b341-828c1bc74b5c>.
- Scheffer, M., S. Carpenter, J. A. Foley, C. Folke, and B. Walker. 2001, October 11. Catastrophic shifts in ecosystems. Nature Publishing Group.
- Schrama, M., P. Heijning, J. P. Bakker, H. J. van Wijnen, M. P. Berg, and H. Olff. 2013. Herbivore trampling as an alternative pathway for explaining differences in nitrogen mineralization in moist grasslands. *Oecologia* 172:231–243.
- Schuerch, M., T. Spencer, S. Temmerman, M. L. Kirwan, C. Wolff, D. Lincke, C. J. McOwen, M. D. Pickering, R. Reef, A. T. Vafeidis, J. Hinkel, R. J. Nicholls, and S. Brown. 2018. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise. *Nature* 561:231–234.
- Silvestri, S., A. Defina, and M. Marani. 2005. Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 62:119–130.
- Tessier, M., J. C. Gloaguen, and J. C. Lefeuvre. 2000. Factors affecting the population dynamics of *Suaeda maritima* at initial stages of development. *Plant Ecology* 2000 147:2 147:193–203.
- Válega, M., A. I. Lillebø, M. E. Pereira, A. C. Duarte, and M. A. Pardal. 2008. Long-term effects of mercury in a salt marsh: Hysteresis in the distribution of vegetation following recovery from contamination. *Chemosphere* 71:765–772.
- Veeneklaas, R. M., K. S. Dijkema, N. Hecker, and J. P. Bakker. 2013. Spatio-temporal dynamics of the invasive plant species *Elytrigia atherica* on natural salt marshes. *Applied Vegetation Science* 16:205–216.
- Van Wijnen, H. J., and J. P. Bakker. 2001. Long-term surface elevation change in salt marshes: A prediction of marsh response to future sea-level rise. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 52:381–390.
- Van Wijnen, H. J., J. P. Bakker, and Y. De Vries. 2014. Twenty years of salt marsh succession on a Dutch coastal barrier island. *Journal of Coastal Conservation* 1997 3:1 3:9–18.
- Wilson, C. A., Z. J. Hughes, D. M. FitzGerald, C. S. Hopkinson, V. Valentine, and A. S. Kolker. 2014. Saltmarsh pool and tidal creek morphodynamics: Dynamic equilibrium of northern latitude saltmarshes? *Geomorphology* 213:99–115.
- Yuan, L., Y. H. Chen, H. Wang, H. B. Cao, Z. Y. Zhao, C. D. Tang, and L. Q. Zhang. 2020. Windows of opportunity for salt marsh establishment: the importance for salt marsh restoration in the Yangtze Estuary. *Ecosphere* 11.

Verantwoording

Rapport C040/22040/22
Projectnummer: 4312100083

Dit rapport is met grote zorgvuldigheid tot stand gekomen. De wetenschappelijke kwaliteit is intern getoetst door een collega-onderzoeker en het verantwoordelijk lid van het managementteam van Wageningen Marine Research

Akkoord: Dr.ir. MJ Baptist
Senior Onderzoeker Mariene Ecologie

Handtekening:



Datum: 19 juli 2022

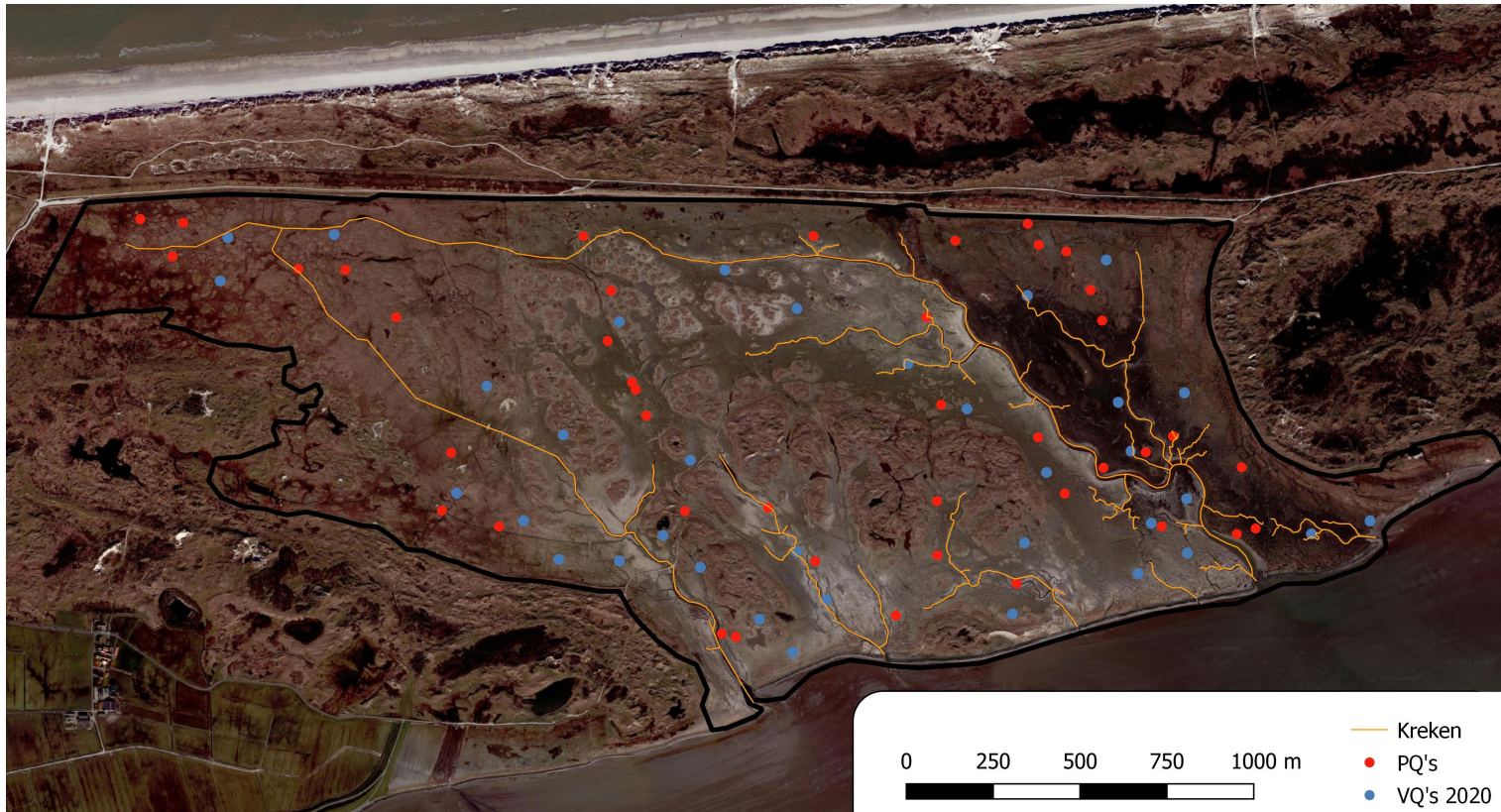
Akkoord: Drs. J. Asjes
Manager Integratie

Handtekening:



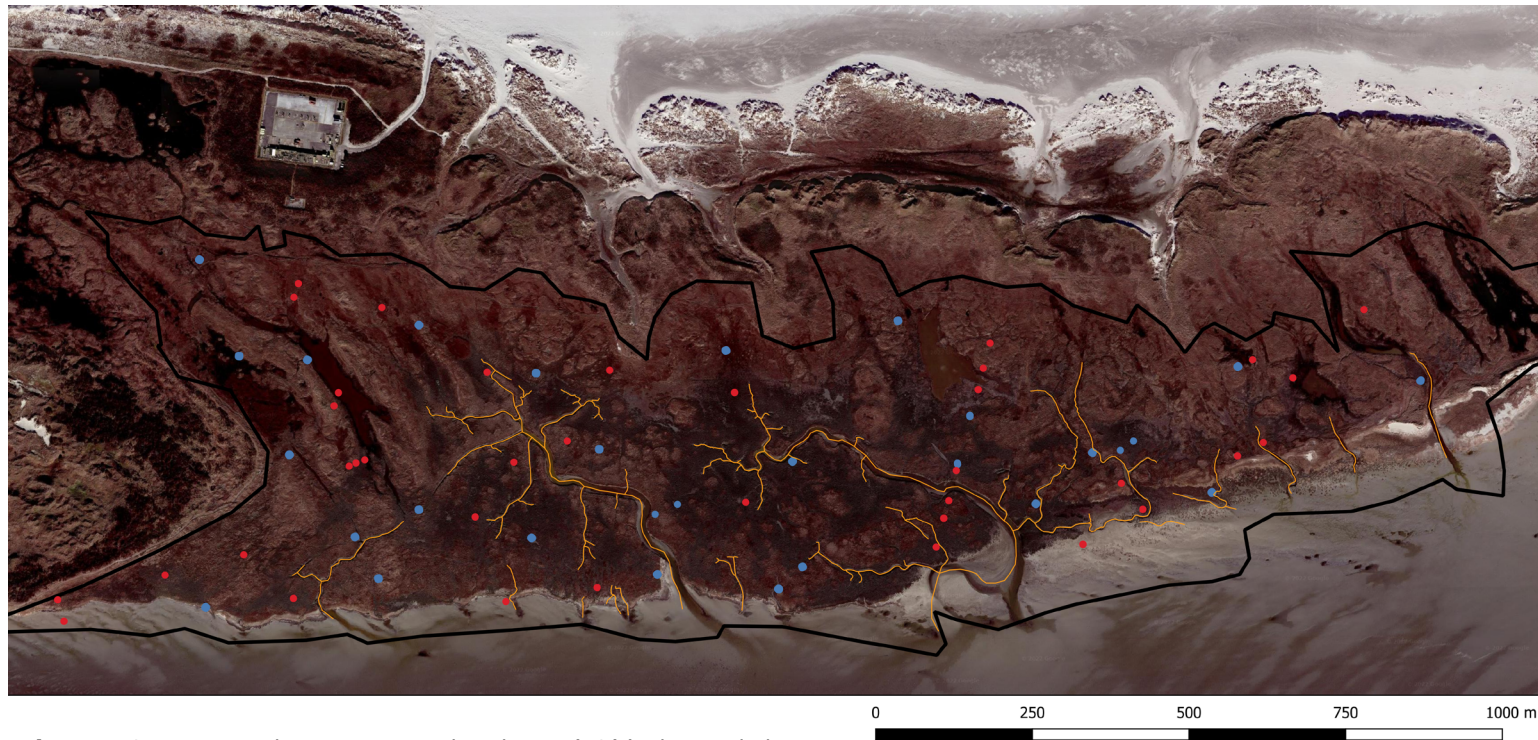
Datum: 19 juli 2022

Bijlage 1 Meetnet PQ's & VQ's NLR



Figuur B 2 Kaart met de permanente kwadraten (PQ's), variabelen kwadraten (VQ's) en de belangrijkste kreken van Neerlands Reid.

Bijlage 2 Meetnet PQ's en VQ's de Hon



Figuur B 3 Kaart met de permanenten kwadraten (PQ's), de variabele kwadraten (VQ's) en de belangrijkste kreken van de Hon

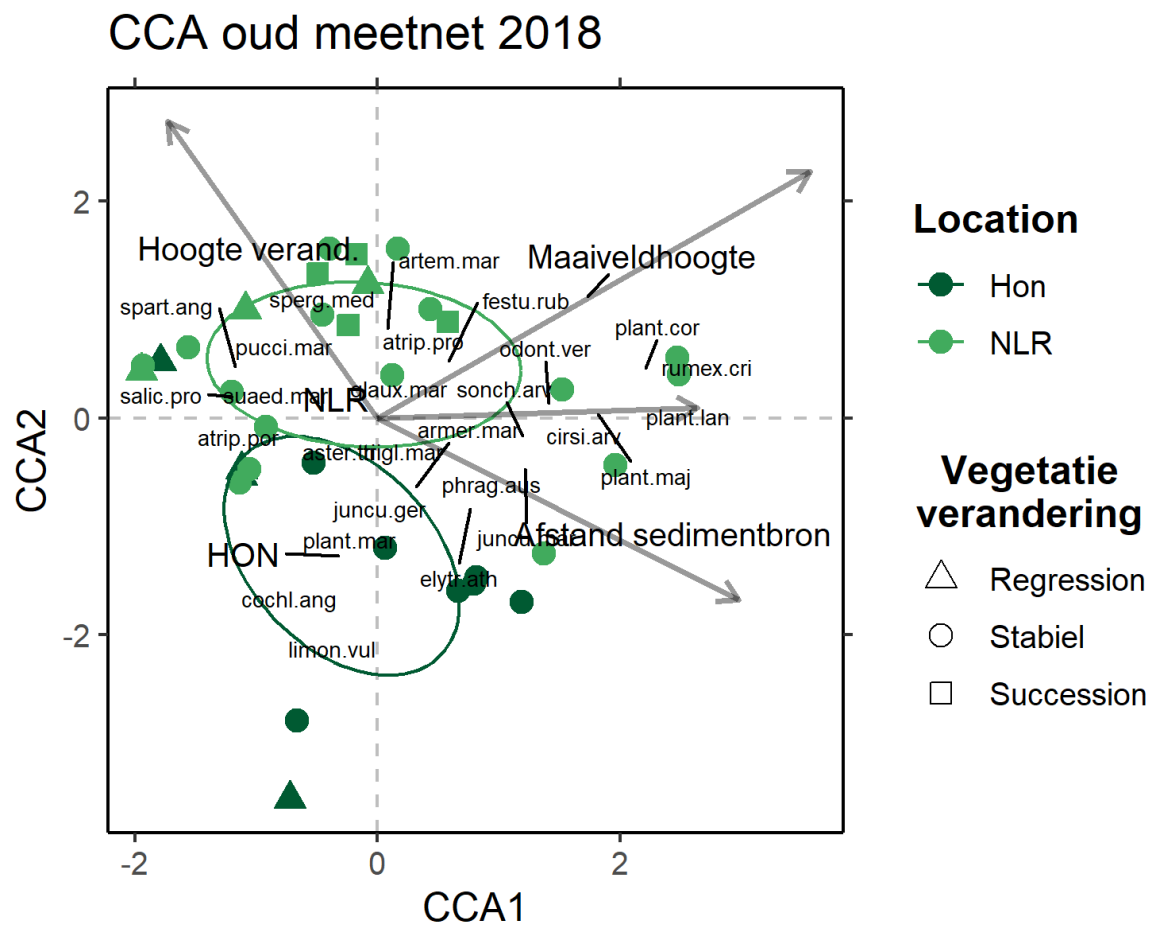
- Kreken
- PQ's
- VQ's 2020

Bijlage 3 Successie/regressie TMAP types

Tabel B 1 Wanneer er successie of regressie plaats vindt afhankelijk van de tmap typologie. -1 is regressie, 0 stabiel 1 successie.

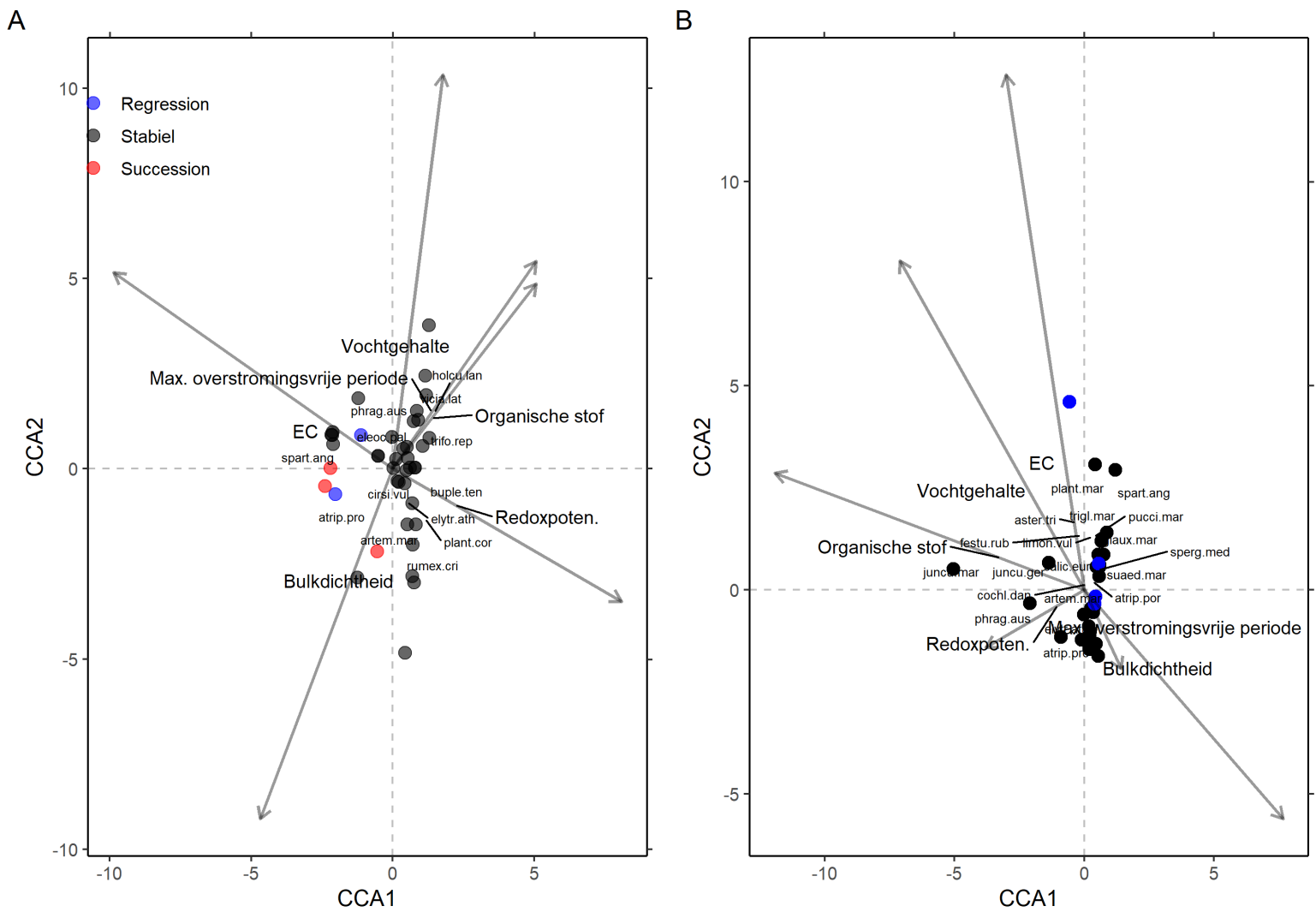
Jaar 1	Jaar 2	Bare ground	Water	Pioneer zone	Low marsh	High marsh	Brackish marsh	Fresh grasslands	Intertidal brackish reed beds	Grassland	Dike	Tidal creek	Dunes
Bare ground		0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Open water		0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Pioneer zone		-1	-1	0	1	1	1	0	1	0	0	-1	0
Low marsh		-1	-1	-1	0	1	1	0	1	0	0	-1	0
High marsh		-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0
Brackish marsh		-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0
Fresh grasslands		-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
Intertidal brackish reed beds		-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0
Grassland		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dike		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tidal creek		0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
Dunes		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bijlage 4 CCA oud meetnet



Figuur B 4 Resultaten van Canonical Correspondence Analyse van de PQ's van het oude meetnet. De pijlen geven aan waar de omgevingsvariabelen het hoogst zijn. De locaties van de plantensoorten visualiseren waar ze dominant zijn. Voor de planten soorten zijn de Latijnse namen gebruikt.

Bijlage 5 CCA nieuw meetnet abiotische factoren



Figuur B 5 Resultaten van Canonical Correspondence Analyse van de PQ's van het nieuwe meetnet op A) het Neerlands Reid en B) de Hon. De pijlen geven aan waar de abiotische variabelen het hoogst zijn. De locaties van de plantensoorten visualiseren waar ze dominant zijn. Voor de planten soorten zijn de Latijnse namen gebruikt.

Wageningen Marine Research
T: +31 (0)317 48 70 00
E: marine-research@wur.nl
www.wur.nl/marine-research

Bezoekers adres:

- Ankerpark 27 1781 AG Den Helder
- Korringaweg 7, 4401 NT Yerseke
- Haringkade 1, 1976 CP IJmuiden

Wageningen Marine Research levert met kennis, onafhankelijk wetenschappelijk onderzoek en advies een wezenlijke bijdrage aan een duurzamer, zorgvuldiger beheer, gebruik en bescherming van de natuurlijke rijkdommen in zee-, kust- en zoetwatergebieden.



Wageningen Marine Research is onderdeel van Wageningen University & Research. Wageningen University & Research is het samenwerkingsverband tussen Wageningen University en Stichting Wageningen Research en heeft als **missie**: 'To explore the potential of nature to improve the quality of life'
