



---

# Ontwikkeling kwelders Oost-Ameland tijdens 35 jaar gaswinning

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

Wageningen University &  
Research rapport C015/24

---

# Ontwikkeling kwelders Oost-Ameland tijdens 35 jaar gaswinning



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

Wageningen Marine Research  
Den Helder, maart 2024

---

Wageningen Marine Research rapport C015/24

---

Keywords: salt marsh, soil subsidence, gas extraction, vegetation, sedimentation.

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/10.18174/653049>  
Wageningen Marine Research verstrekt *geen* gedrukte exemplaren van rapporten.

Wageningen Marine Research is ISO 9001:2015 gecertificeerd.

Foto omslag: Marinka van Puijenbroek

© 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  
gevolg schade, 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.

# Inhoud

<b>Samenvatting</b>	<b>5</b>
<b>1 Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1 Achtergrond	7
<b>2 Onderzoeksvragen</b>	<b>10</b>
2.1 Doel van deze rapportage	10
<b>3 Methoden</b>	<b>12</b>
3.1 Gebiedsbeschrijving	12
3.2 Monitoringsnetwerken	14
3.2.1 Meetpunten oorspronkelijke meetnet 1986 – 2018	14
3.2.2 Meetpunten 'nieuwe' meetnet: 2019 – heden	14
3.3 Maaiveldhoogteverandering	17
3.3.1 Sedimentatie-Erosie-Balk(SEB)-meting	17
3.3.2 Sedimentatieplaat	17
3.3.3 Kleidikte	17
3.3.4 Bodemdaling & maaiveldhoogtes	18
3.4 Vegetatie	18
3.4.1 Vegetatiekaarten Rijkswaterstaat	18
3.4.2 Puntmetingen – PQ's	19
3.4.3 Successie / regressie	19
3.5 Hydromorfologie	20
3.5.1 Waterstanden	20
3.5.2 Afstand tot sedimentbron	21
3.6 Abiotische factoren bodem	22
3.7 Statistische analyse	22
3.7.1 Kleidikte en maaiveldverandering (nieuwe meetnet)	22
3.7.2 Relaties abiotische variabelen	23
3.7.3 Vegetatiekaarten Rijkswaterstaat	23
3.7.4 Vegetatie PQ's en EQ's (nieuwe meetnet)	24
<b>4 Resultaten</b>	<b>25</b>
4.1 Opslibbing	25
4.1.1 Nieuw meetnet	25
4.1.2 Oorspronkelijke meetnet	28
4.2 Kleidikte NLR en De Hon	29
4.3 Maaiveldverandering Neerlands Reid en De Hon	31
4.4 Hydromorfologie	32
4.5 Abiotische factoren	35
4.6 Vegetatie	36
4.6.1 Natura 2000	36
4.6.2 Vegetatiekaarten	38
4.7 Permanente en eenmalige kwadraten	45
4.7.1 Oorspronkelijke meetnet	45
4.7.2 Nieuwe meetnet	45
4.7.3 Individuele soorten	48
<b>5 Evaluatie en discussie</b>	<b>49</b>

---

5.1	Maaiveldhoogteveranderingen 1986 – 2022	49
5.2	Abiotiek 2021	51
5.3	Vegetatieveranderingen 1986 – 2020	51
5.3.1	Vlakdekkende vegetatiekaarten	51
5.3.2	Permanente quadranten	52
5.4	Effect bodemdaling op kweldervegetatie	54
5.4.1	Regressie van de kweldervegetatie	54
5.4.2	Oorzaken regressie	55
5.4.3	Morfologie kwelders	56
5.5	Prognose maaiveld- en vegetatieontwikkeling	56
5.6	Conclusie	57
5.7	Kennishiaten	59
<b>6</b>	<b>Kwaliteitsborging</b>	<b>61</b>
	<b>Literatuur</b>	<b>62</b>
	<b>Verantwoording</b>	<b>67</b>
<b>Bijlage 1</b>	<b>Vergelijking SEB methode - opslibbingsplaat</b>	<b>68</b>
<b>Bijlage 2</b>	<b>Vergelijking SEB methode - opslibbingsplaat</b>	<b>69</b>
<b>Bijlage 3</b>	<b>Abiotische factoren</b>	<b>70</b>
<b>Bijlage 4</b>	<b>Vegetatiekaarten</b>	<b>73</b>
<b>Bijlage 5</b>	<b>Statistische tabel vegetatieverandering</b>	<b>78</b>
<b>Bijlage 6</b>	<b>Resultaten PQ + EQ oorspronkelijk en nieuw meetnet</b>	<b>79</b>

# Samenvatting

Op het Waddeneiland Ameland vindt sinds 1986 diepe bodemdaling plaats als gevolg van gaswinning. Vanaf 1993 vindt er langlopende monitoring plaats naar de mogelijke effecten van de bodemdaling op Oost-Ameland. 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 ervoor zorgen dat, wanneer sedimentbeschikbaarheid en transportcapaciteit voldoende zijn, de opslibbing de bodemdaling compenseert. Als de bodemdaling niet wordt gecompenseerd door opslibbing vindt er maaiveldddaling plaatst. Door maaiveldddaling kan er regressie van vegetatie 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. Zowel regressie als successie kan onwenselijk zijn, door regressie kan het gewenste areaal aan Natura 2000 habitattypen verminderen en successie kan leiden tot een lagere biodiversiteit doordat een climaxvegetatie dominant wordt. De laatste integrale rapportage (2017) concludeerde dat de opslibbing hoog genoeg is op de kwelderrand en op de oeverwallen om te compenseren voor de bodemdaling. Daarnaast werd er geconcludeerd dat vegetatieregressie voor kan komen op plekken met een laag maaiveld waar slechte drainage is (kommen). De verwachting is dat dit meer voorkomt op plekken verder weg van de sedimentbron, waar de opslibbingssnelheid lager is. Daarnaast werd geconcludeerd dat het huidige monitoringsnetwerk niet representatief was voor de gehele 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 beweide kwelder ten westen van het Oerd genaamd Neerlands Reid en de onbeweide kwelder ten oosten van het Oerd genaamd De Hon. In deze PQ's wordt elk jaar de opslibbing gemeten met de SEB-methode en eens per twee jaar de vegetatiesamenstelling bepaald. Het tweede onderdeel omvat 60 extra vegetatieopnames om het jaar uitgevoerd op verschillende locaties (eenmalige kwadranten EQ's). In 2020 en 2022 zijn 60 EQ's opgenomen verspreid over de kwelders, daarvan is de vegetatiesamenstelling, kleidikte en maaiveldhoogte gemeten. In 2021 zijn bodemmonsters verzameld van de PQ's om de volgende abiotische factoren te kunnen meten: vochtgehalte, elektrische conductiviteit, bulkdichtheid en organische stofgehalte. Daarnaast is ook op verschillende dieptes de redox-waarde gemeten. De ruimtelijke ligging van elk PQ en EQ is bepaald door de afstand tot de sedimentbron en afstand wad via kreek te berekenen. Verder zijn er ook 6-jaarlijkse vlakdekkende vegetatiekaarten van Rijkswaterstaat, waarmee de ontwikkeling van de vegetatie vanaf 1993 kan worden gevolgd.

In deze rapportage wordt bepaald of de opslibbing hoog genoeg is om te compenseren voor bodemdaling en zeespiegelstijging. En of, door te lage opslibbing, er kommen zijn gevormd. Dit is bepaald door de opslibbingbalans van het oude en nieuwe meetnet te berekenen en de kleidikte te analyseren. Daarnaast is het effect van bodemdaling op inundatiefrequentie bepaald, door de ruimtelijke variatie van de overstromingen te analyseren. Verder is onderzocht in hoeverre de abiotische omstandigheden zijn veranderd door bodemdaling en hoe bodemdaling de vegetatieontwikkeling beïnvloedt.

De belangrijkste conclusies zijn dat de opslibbing alleen hoog genoeg is op de kwelderrand en oeverwallen om voor de opgetelde bodemdaling, zeespiegelstijging en inklinking te compenseren. Op het Neerlands Reid is de opslibbing lager dan op De Hon doordat er meer inklinking is door vertrapping door vee. Doordat de opslibbing niet hoog genoeg is verder van de kwelderrand en oeverwal, heeft er een netto maaiveldddaling plaatsgevonden en zijn er kommen gevormd. Op De Hon hebben kwelderdelen nu een lagere maaiveldhoogte dan tijdens de start van de kwelderontwikkeling. Deze kommen overstromen minder vaak, maar als ze overstromen is de inundatieduur langer. Op die plekken is het daardoor vochtiger, zouter en zuurstofarmer.

Ondanks de aanwezige veranderingen in vegetatie verschuiven deze zich vooral binnen en tussen zones die allemaal tot hetzelfde habitattypen behoren, namelijk H1330A. Op basis van de vegetatiekaarten uit

---

2020 kan gesteld worden dat aan de kwaliteitseisen van Natura 2000 voor de drie dominante kwelderhabitattypen wordt voldaan.

Op beide kwelders op Oost-Ameland is een deel van de kwelders stabiel, maar er vindt ook regressie van de vegetatie plaats waarbij brakke kweldervegetatie verandert in hoge kweldervegetatie en hoge kweldervegetatie verandert in lage kweldervegetatie. De afname van de maaiveldhoogte, doordat de opslibbing de bodemdaling niet kan bijhouden, is de belangrijkste verklarende factor voor regressie, maar er is geen duidelijke ondergrens voor de maaiveldhoogte aan te geven waarop het plaatsvindt. Ook blijkt regressie niet beperkt tot de kommen, maar vindt ook plaats op oeverwallen en de wadrand. Naast bodemdaling zijn echter nog meer factoren die voor regressie hebben gezorgd, zoals slechte drainage en beweiding. Het feit dat door de combinatie van maaiveldddaling en beweiding er op het Neerlands Reid meer regressie heeft plaatsgevonden dan op De Hon, wijst ook in die richting. De lokale plantengemeenschappen bepalen mede wanneer er regressie plaatsvindt, aangezien sommige plantensoorten op een lagere maaiveldhoogte kunnen standhouden ondanks de verslechtering in groeiomstandigheden.

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Eind 1986 is gestart met gaswinning op Oost-Ameland. 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 Oost-Ameland en de omliggende wadplaten (Dankers et al. 1987). Op basis daarvan is in 1986 begonnen met de 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 ten opzichte van zeeniveau (figuur 1.1). 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 ervoor zorgen dat, wanneer sedimentbeschikbaarheid en transportcapaciteit voldoende zijn, de opslibbing de bodemdaling compenseert (Van Wijnen & Bakker 2001, Kirwan & Megonigal 2013, Schuerch et al. 2018).

Als de opslibbing niet hoog genoeg is en er netto maaiveld daling plaatsvindt blijkt de ruimtelijke ligging en ontwatering bepalend voor de verdere vegetatieontwikkeling. Plekken vlak bij een kreek of kwelderrand hebben meestal een hoge opslibbingssnelheid en na verloop van tijd kan er op die plekken een oeverwal ontstaan (van Dobben et al. 2022). De plekken achter oeverwallen hebben meestal een lagere opslibbingssnelheid, en daar kan dan een kom ontstaan. In geval van slechte drainage in deze kommen kan het water na overstroming of hevige regenval moeilijker weer wegstromen (Silvestri et al. 2005). Als de bodem daardoor verzadigd raakt met water leidt dat tot zuurstofloze en stressvolle omstandigheden waar veel kwelderplanten niet tegen kunnen (Justin & Armstrong 1987, Colmer & Flowers 2008). Pioniersoorten, zoals zeekraal en Engels slijkgras, kunnen hier wel tegen (Holmer et al. 2002), en kunnen zich daardoor op deze locaties vestigen en uitbreiden. De verandering van plantensoorten hangt wel af van welke kweldersoorten al op deze plekken gevestigd zijn. Sommige soorten kunnen als ze eenmaal zijn gevestigd, erg goed tegen verslechterde condities, zoals een nattere standplaats, en kunnen zich handhaven.

Naast netto bodemdaling kan ook beweiding door vee een verandering in vegetatiesamenstelling veroorzaken. Vee vertrapt de bodem, waardoor er compactie plaatsvindt (Elschot et al. 2023). Door deze extra compactie neemt de maaiveldhoogte af. Daarnaast kan vertrapping de bodem verdichten, wat kan leiden tot slechtere drainage (Howison et al. 2015). Bovendien zijn sommige plantensoorten niet bestand tegen beweiding en de daardoor veroorzaakte vertrapping (Bakker 1985), zodat de bedekkingsgraad van die soorten zal afnemen of laag zal zijn in geval van beweiding.

In 1986 is een eerste voorspelling van de mogelijke veranderingen in de opslibbing en vegetatiesamenstelling op de kwelders van Oost-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.

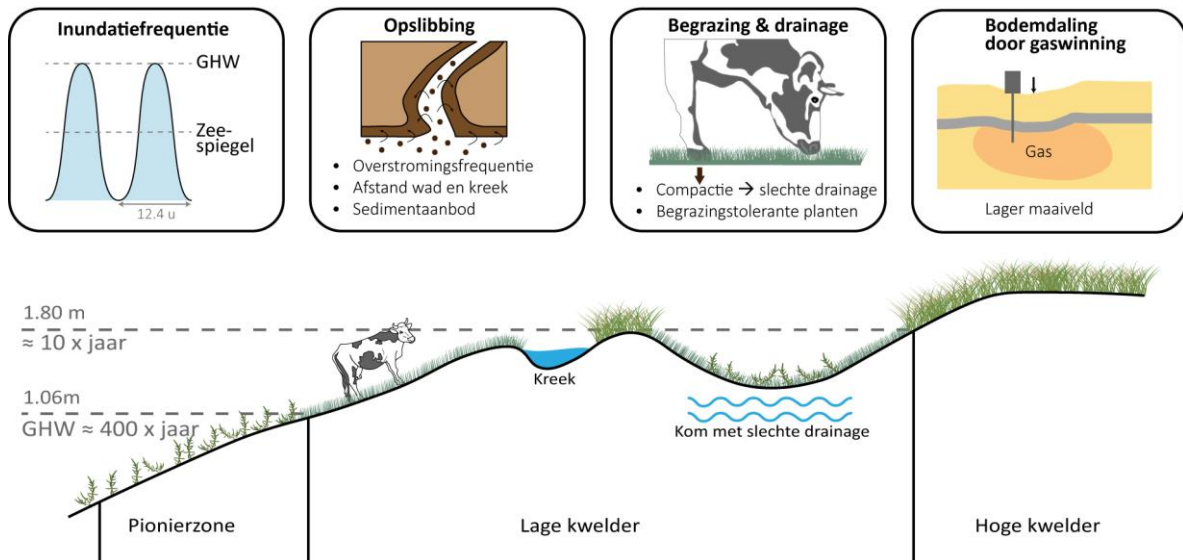
Op basis van deze prognose is een monitoringsprogramma opgesteld en een meetnet ingericht in 1986, in 1993 is aangepast. Over de resultaten is jaarlijks aan de Begeleidingscommissie Monitoring



Bodemdaling Ameland gerapporteerd, en elke vijf tot zes jaar is een uitgebreide integrale rapportage opgesteld. De meest recente (integrale) evaluatie is van Elschot et al. (2017). Deze evaluaties hebben geleid tot een bijstelling van de zonehypothese, omdat niet uitsluitend een negatieve opslibningsbalans bepalend bleek voor het veroorzaken van regressie van de vegetatie. Het is de combinatie van netto-daling van het maaiveld, lage initiële maaiveldhoogte én slechte drainage die lijkt te resulteren in regressie van de vegetatie.

Bij de laatste evaluatie (Elschot et al. 2017) is vastgesteld dat het van 1986/1993 tot en met van 2018 gebruikte meetnet niet representatief was voor de gehele kwelder op Oost-Ameland. Een groot deel van de PQ's ligt namelijk op een oeverwal vlak bij een kreek, waar een relatief hoge opslibbing plaatsvindt. Hierdoor werd te snel de conclusie getrokken dat op een groot deel van de kwelder de bodemdaling (vrijwel) geheel werd gecompenseerd door de opslibbing. Doordat er netto nauwelijks maaiveld daling plaatsvond vertoonde de vegetatie in de naastgelegen PQ ook geen regressie, terwijl een analyse van vlakdekkende vegetatiekaarten weergaf dat er op grote delen van de kwelder wel degelijk regressie plaatsvond. In overleg met de bodemdalingscommissie zijn daaropvolgend drie nieuwe onderzoeksvragen geformuleerd en is besloten om een nieuw monitoringsplan te ontwikkelen. Hierbij is als doel gesteld om een representatief monitoringsmeetnet voor beide kwelders op Oost-Ameland 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 nieuwe monitoringsmeetnet is in 2019 gerealiseerd.

### Factoren van kwelderontwikkeling op Ameland



**Figuur 1-1** Een infographic over verschillende factoren die een effect kunnen hebben op de kwelderontwikkeling. De kweldervegetatiesamenstelling wordt in eerste instantie bepaald door de inundatiefrequentie. Opslibbing zorgt voor een hoger maaiveld waardoor de inundatiefrequentie afneemt. Daarnaast hebben beweiding en drainage een invloed op de soortensamenstelling. Als het maaiveld daalt door bodemdaling kan dit een effect hebben op zowel de inundatiefrequentie, opslibbing als drainage en daardoor op de kweldervegetatie.

## Definities

Kwelders ontstaan op een zandbank (**de onderliggende zandlaag**), waar de pioniervegetatie zich op vestigt (**ontstaansjaar van de kwelder**) waarna geleidelijk sediment neerslaat op de zandlaag. Hoe meer sediment neerslaat, hoe hoger de opslibbingsnelheid van de kwelder. Als de kwelder zich ontwikkelt wordt de **kleilaag** (bestaand uit fijn-organisch sediment) dikker, hoogt het kweldermaaiveld op, neemt de nutriëntenhoeveelheid toe en vindt er successie plaats van de kweldervegetatie.

SEB-metingen geven een indicatie van de jaarlijkse maaiveldverandering in millimeters nauwkeurigheid. De **maaiveldverandering** is het netto-effect van opslibbing (of sedimentatie) (mm), erosie, inklinking (mm) en diepe bodemdaling. **Opslibbing** is het proces dat sediment neerslaat op de kwelder tijdens hoogwaters en stormen waarmee de het maaiveld ophoogt (erosie of inklinking worden daarin niet meegerekend). De **opslibbingsnelheid** is de gemiddelde opslibbing over verschillende jaren weergegeven in mm/jr. Inklinking en erosie zorgen voor een daling van het maaiveld (mm). **Autocompactie** is een natuurlijk proces onder invloed van het gewicht van de kleilaag en droogte en hoge temperaturen in de zomer. Op beweide kwelders is er extra compactie door het gewicht van de grazers, hier wordt naar gerefereerd als **vertrapping** (mm). Door te middelen over meerdere jaren kan een gemiddelde erosie- en inklinkingsnelheid worden berekend (mm/j). **Diepe bodemdaling** (mm) is daling van de diepere lagen in de bodem door bijvoorbeeld gaswinning. In dit rapport wordt met bodemdaling de diepe bodemdaling bedoeld. Dit is niet gelijk aan de maaiveldverandering, want door opslibbing kan de diepe bodemdaling worden gecompenseerd. In de kwelder is de opslibbing vaak het hoogst nabij de wad en kreek, waar er een **oeverwal** ontstaat, verder van de wad en kreek is de opslibbing lager waardoor er een **kom** wordt gevormd. Als in deze kom na overstroming het water minder makkelijk kan wegstromen, betekent dit dat er een slechte **drainage** op die plek is. Bij langdurige stagnatie van water kan zich een poel of plas ontwikkelen.

**Successie** is een natuurlijk proces waarbij op de kwelder door maaiveldophoging en/of een (bijbehorende) afname van abiotische stress de bedekking van meer competitieve soorten toeneemt en de soortensamenstelling geleidelijk veranderd in die van een later successiestadium. Op de kwelder vindt er successie plaats van pionierkwelder, naar lage kwelder en naar hoge kwelder. In de hoge kwelder vindt successie plaats naar de climax vegetatie zeekweek, deze climaxvegetatie heeft een lagere plantendiversiteit. Als de kwelder over tijd zoeter wordt kan er successie plaatsvinden naar brakke kwelder, wat het laatste successiestadium is van de kwelder. Begrazing zorgt ervoor dat plantensoorten die begrazing of vertrapping niet tolereren, zoals zeekweek en zoutmelde, zullen verdwijnen, begrazingstolerante soorten zullen daarvoor in de plaats komen. **Regressie** is het proces dat door een toename van abiotische stress, bijvoorbeeld door maaiveldddaling, slechte drainage of vertrapping van de bodem, de vegetatie verandert naar een vroeger successiestadium.

---

## 2 Onderzoeksvragen

Naar aanleiding van de resultaten en conclusies getrokken in de laatste integrale rapportage (Elschot et al. 2017) heeft de bodemdalingscommissie de volgende nieuwe onderzoeksvragen opgesteld:

1. Neemt het komvolume toe door de bodemdaling, en heeft die eventuele toename in komvolume een effect op de vegetatie?
2. Wat is het effect van bodemdaling op de inundatiefrequentie (onderzoeksvraag 2a), en welk effect heeft inundatiefrequentie op de kweldervegetatie (onderzoeksvraag 2b)?
3. Wat is het effect van bodemdaling op de drainage (onderzoeksvraag 3a), en wat is het effect van drainage op de kweldervegetatie (onderzoeksvraag 3b)?

Als vervolgstap hebben we vraag 1 gedefinieerd tot drie deel vragen:

- 1a. Vormen er nieuwe kommen achter de oeverwal?
- 1b. Neemt het totale volume toe van de kommen?
- 1c. Verandert de vegetatiesamenstelling in de kommen anders dan bijvoorbeeld hoger gelegen oeverwallen?

Deze onderzoeksvragen worden behandeld in de voorliggende integrale rapportage.

Een onderzoeksvraag over het effect van bodemdaling op de erosie van de onbeschermdede kwelderrand op De Hon, is al in een eerdere fase van de monitoring in detail behandeld door Kuiters en Wegman (2020). De belangrijkste resultaten uit dat onderzoek worden meegenomen in de discussie van deze rapportage.

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

### 2.1 Doel van deze rapportage

Het doel van deze rapportage is om de ontwikkeling van de kwelders op Oost-Ameland vanaf het moment dat gestart is met gaswinning te evalueren. In deze rapportage zullen resultaten uit het nieuwe meetnet, langjarige resultaten van het oorspronkelijke meetnet en de vlakdekkende VEGWAD-vegetatiekaarten van Rijkswaterstaat worden gebruikt. In het rapport worden de volgende onderdelen behandeld:

De aanwezigheid en het volume van de kommen is afhankelijk van de opslibbing en drainage. Als de opslibbing hoog genoeg is om de opgetelde bodemdaling, zeespiegelstijging en inklinking te compenseren zal het aantal kommen en het komvolume gelijk blijven of afnemen. Te lage opslibbing leidt tot maaiveldddaling en het ontstaan en groter worden van kommen. Hieronder staan de stappen waarmee de aanwezigheid en de veranderingen van kommen zijn bepaald (onderzoeksvraag 1a + 1b):

- De opslibbingsbalans van het oorspronkelijke en nieuwe meetnet geeft aan of de opslibbing compenseert voor de opgetelde bodemdaling, zeespiegelstijging en inklinking (§4.1).
- De opslibbingsbalans is vervolgens gerelateerd aan de jaarlijkse verschillen in inundatie en de ruimtelijke verschillen in afstand tot de sedimentbron (§4.1).
- De kleidikte geeft de algehele opslibbing op de kwelder sinds het ontstaansjaar en geeft daarmee lange-termijn informatie over de ruimtelijke variatie in opslibbing. De variatie in kleidikte is gerelateerd aan de maaiveldhoogte, afstand sedimentbron en leeftijd van de kwelder (§4.2).
- De maaiveldverandering op De Hon is bepaald door de kleidikte te vergelijken met de bodemdaling, als de kleidikte lager is dan de bodemdaling dan heeft de opslibbing niet kunnen compenseren voor de bodemdaling (§4.3).

Het effect van bodemdaling op inundatiefrequentie (onderzoeksvraag 2a) is afhankelijk van de maaiveldontwikkeling door opslibbing, als de opslibbing niet hoog genoeg is om te compenseren voor de bodemdaling zal de inundatiefrequentie toenemen. De ruimtelijke variatie van de inundatiefrequentie, inundatieduur, gemiddelde waterhoogte en aantal dagen dat de kwelder niet overstroomt op de kwelders bij Oost-Ameland zijn bepaald (§4.4).

In kommen kan de drainage slecht zijn doordat het water minder snel wegstroomt. In hoeverre de drainage wordt verslechterd door bodemdaling (onderzoeksvraag 3a) is bepaald door het effect van bodemdaling, maaiveldhoogte en de maximale inundatievrije periode te relateren aan abiotische variabelen, die een proxy zijn voor de drainage (§4.5).

Het effect van de eventuele verandering in komvolume, inundatiefrequentie en drainage op de kweldervegetatie (onderzoeksvraag 1c, 2b en 3b) is bepaald door de veranderingen in de oppervlaktes van vegetatietypes te bepalen en het voorkomen van individuele plantensoorten in kaart te brengen. Dit leidde tot de volgende analyses:

- De oppervlaktes van de Natura2000 habitat typen zijn vergeleken over de verschillende jaren (§4.6.1).
- De veranderingen in de oppervlaktes van vegetatietypes zijn bepaald met de vegetatiekaarten van Rijkswaterstaat en gerelateerd aan de maaiveldhoogte en ruimtelijke ligging in de kwelder (§4.6.2).
- De soortensamenstelling van de PQ's is geanalyseerd met ruimtelijke ligging van de kwelder en abiotische factoren (§4.7).
- De maaiveldhoogte van karakteristieke kweldersoorten is vergeleken tussen 1986 en 2020/2021 (§4.7.1).

---

## 3 Methoden

### 3.1 Gebiedsbeschrijving

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 (NAM 2021), varieert de mate van bodemdaling over het gebied met de afstand tot het middelpunt van de schotel. In september 2020, het moment van de laatste waterpassing, was op Neerlands Reid de cumulatieve bodemdaling sinds 1986, de start van de gaswinning, 4 - 26 cm (gemiddeld 7 mm/jaar) en op De Hon 26 - 38 cm (gemiddeld 10 mm/jaar) (NAM 2023). Dichter bij de gaswinlocatie is de bodemdaling hoger.

#### **Kwelderontwikkeling**

De kwelders Neerlands Reid en De Hon kennen een ontwikkeling die vergelijkbaar is met andere eilandkwelders achter stuifdijken (Bakker et al. 1997, Dijkema 1997). Deze kwelders zijn gevormd op een hoge zandplaat met een gradiënt in hoogte vanaf het wad naar hoger gelegen geïsoleerde duintjes. Deze gradiënt is in tegenstelling tot vastelandskwelders geen afspiegeling van de successie, maar al op de ondergrond (een zandplaat) aanwezig. Het zijn "plaatkwelders achter kunstmatige stuifdijken" die gekenmerkt worden door een snelle successie.

Neerlands Reid is gevormd na de aanleg van een stuifdijk tussen de Kooiduinen en de Oerderduinen in de periode 1882-1893 (Ehlers 1988). Op de zandplaat lagen toen al duintjes uit de periode 1800- 1880. De kwelder wordt beweid. Kliferosie wordt sinds 1999 vanaf het westen tot even voorbij de Oerdsloot tegengegaan door een steenglooiing, ten oosten van de Oerdsloot vindt kliferosie plaats. De monding van de Oerdsloot is jarenlang grotendeels geblokkeerd geweest met betonplaten. Eind jaren 90 zijn die verwijderd, zodat water en sediment via deze aan de oostkant gelegen hoofdkreek weer vrij het gebied kunnen in- en uitstromen. De Zinkesloot, die aan de westkant van het Neerlands Reid ligt, is halverwege vrijwel geheel afgedamd (op enkele drainagebuizen na) om als oversteekplaats voor het vee dienst te doen.

De Hon is van recentere datum. In 1960 werd begonnen om oostelijk van de Oerderduinen een stuifdijk aan te leggen op de zandplaat waarbij al gevormde duincomplexen met elkaar verbonden werden. In 1962 was deze stuifdijk gevorderd tot paal 23, net voorbij de huidige NAM-locatie. De Hon was toen nog een kale zandplaat, maar langs de noordzijde vormden zich jonge duintjes waarvoor zich de kwelder ontwikkelde. Voor de kwelder van De Hon zal de stuifdijk waarschijnlijk hooguit een heel beperkte invloed hebben gehad en zeker niet zoals stuifdijken op andere eilandstaarten (Groot et al. 2016). Wageningen Environmental Research heeft de leeftijd van De Hon bepaald door middel van oude luchtfoto's. Daarmee is bepaald dat De Hon is ontwikkeld tussen 1950 en 1990 (Kuiters & Wegman 2020). Aan de zuidwestzijde van De Hon vindt kliferosie plaats, maar aan de zuidoostzijde vindt aangroei plaats.

#### **Beweiding en natuurlijke begrazing**

Delen van het Neerlands Reid worden beweid met schapen, koeien en/of paarden met een variërende begrazingsdruk (Elschot et al. 2017). Deze begrazing zorgt ervoor dat plantensoorten die begrazing of vertrapping niet tolereren, zoals zeekweek en zoutmelde, zullen verdwijnen (Olff et al. 1997). Andere soorten zoals rood zwenkgras en kweldergras zijn begrazingstolerant en zullen zich vestigen. Verder vertrappen begrazers de bodem waardoor de kleibodem een hogere bulkdichtheid krijgt (Schrama et al. 2013, van Klink et al. 2015, Elschot et al. 2023). Met een hogere bulkdichtheid kan het water minder makkelijk draineren en kan het dus ook natter worden. Op deze natte plekken is er vaak zuurstofloosheid en ontstaan er zwavelverbindingen, wat negatief kan zijn voor de planten. Daardoor kan beweiding het effect van bodemdaling mogelijk versterken doordat beiden mogelijk een negatief effect hebben op de lokale drainage. Op De Hon vindt geen beweiding plaats.

Op zowel Neerlands Reid als De Hon vindt natuurlijke begrazing plaats door konijnen, ganzen en hazen. In niet door vee beweide kwelders neemt met de kwelderleeftijd de intensiteit van natuurlijke begrazing

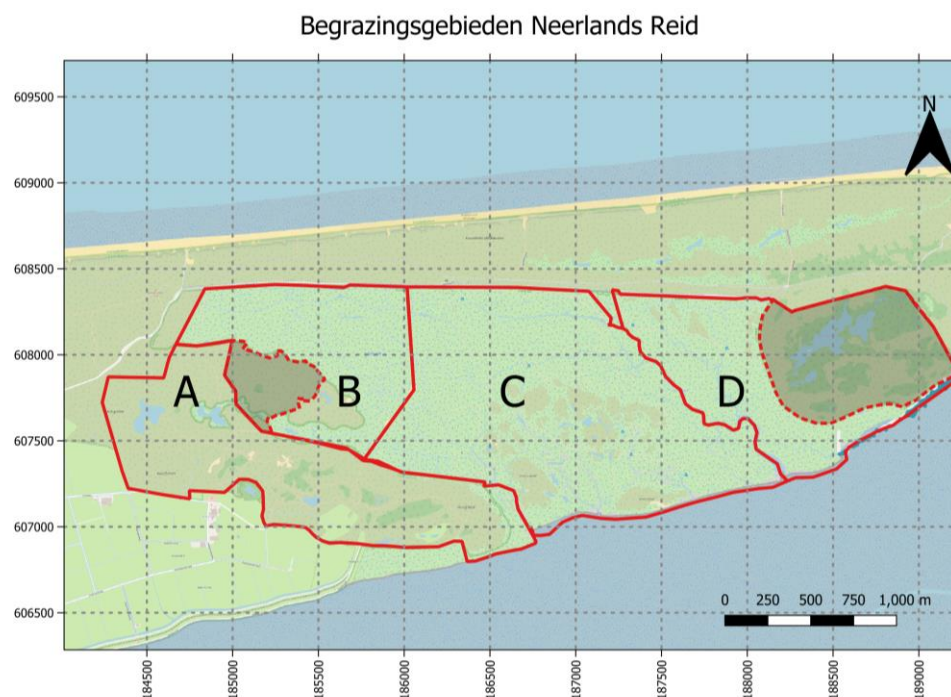
door hazen en ganzen toe tot een optimum, waarna successie van de vegetatie resulteert in een afname van begrazingsintensiteit door deze soorten (van de Koppel et al. 1996). Pas na beweiding met vee op deze oudere kwelderdelen wordt dat de vegetatie weer geschikt voor de kleine grazers.

Het Neerlands Reid kent vier beweidingsgebieden, waarvan er drie behandeld worden in deze rapportage, namelijk gebieden B, C en D (Figuur 3-1). Gebied A bevat met name duinvegetatie en is daarom niet meegenomen. Gebieden B, C en D worden begraasd door koeien, paarden en/of schapen (Krol & Saathof 2023). De begrenzing van de gebieden en het type beweiding is veranderd in het verleden, maar is in de laatste vijf jaren gelijk gebleven. In het meest westelijke gebied "B" graasden jonge koeien en paarden. Deze werden tussen 2016 – 2022 ingeschaard vanaf 8 juni tot 1 december. Het gebied "C", ten westen van de Oerdsloot werd in 2016 tot 2022 tussen 1 mei en 15 oktober begraasd door 600 – 800 schapen. In november werden gebieden B en C gecombineerd en graasden de jonge koeien en paarden ook in C. In gebied "D" graasden in 2021 tot 2022 van 1 mei tot 1 november volwassen koeien. Naast het vee grazen er in de winter en het voorjaar rond de 2000 rotganzen en 400 brandganzen op Neerlands Reid (Krol & Saathof 2023).

Om voor de drie gebieden de jaarlijkse begrazingsdruk door het vee te berekenen per hectare en per jaar, zijn de aantallen omgerekend naar een grootvee-eenheid (GVE). De eenheid van grootvee is voor volwassen koeien = 1 GVE/ha/j, jonge koeien (pinken) = 0.6, paarden = 1 en schapen = 0.12 (Davidson et al. 2017). Het effect van begrazing op vegetatie duurt meestal meerdere jaren en daarom is er een gemiddelde begrazingsdruk berekend van de vijf voorgaande jaren, de jaren die overeenkomen met de vegetatiekaart 2016 - 2020. De gemiddelde begrazingsdruk is voor B = 0.28 GVE/ha/j, C = 0.22 GVE/ha/j, D = 0.21 GVE/ha/j.

Het vee verdeelt zich niet gelijkmatig over het gebied, maar zal zich concentreren nabij drinkwaterputten en op locaties met bij voorkeurvoedsel, d.w.z. nutriëntrijke planten, zoals fioringras, zulte, kweek en kweldergras (Nolte et al. 2017).

Naast verschillen in beweiding, is er ook een verschil in bodemdaling, gebied B heeft de minste bodemdaling tussen 4 – 10 cm (gem. 6 cm bodemdaling), gebied C tussen de 6 – 18 cm bodemdaling (gem. 12 cm) en gebied D tussen de 14 – 26 cm bodemdaling (gem. 20 cm).



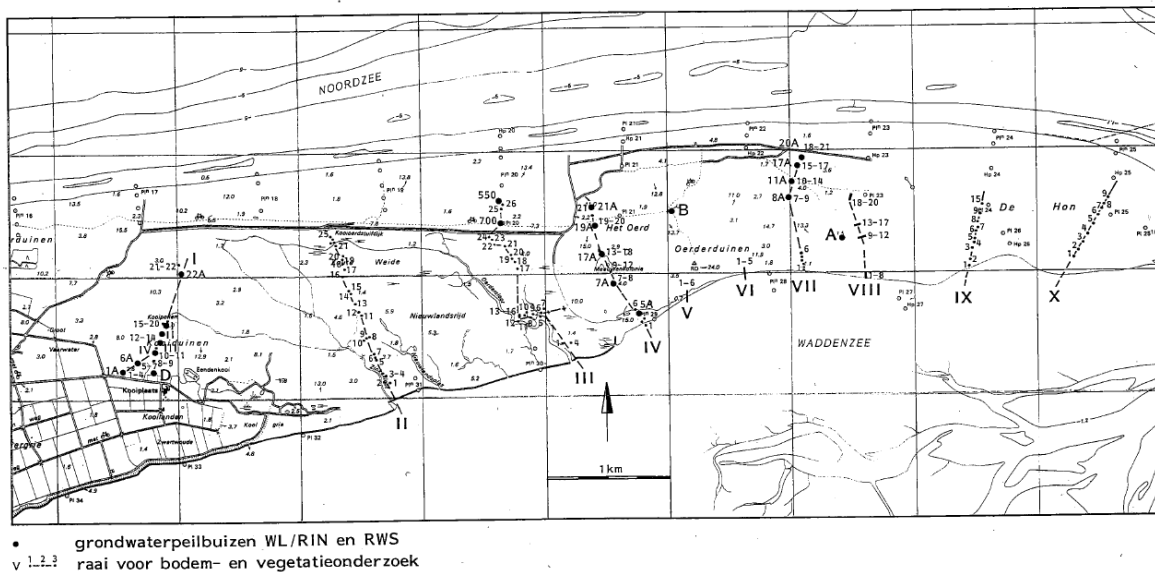
**Figuur 3-1** Begrazingsgebieden bij het Neerlands Reid voor de laatste 5 jaar. Gebied A heeft alleen duin vegetatie en is niet meegenomen in de analyses. Van gebieden B en D zijn alleen de delen die behoren tot het Neerlands Reid meegenomen in de analyses. De duingebieden in B en D hebben een doorbroken lijn en zijn gearceerd met grijs.

## 3.2 Monitoringsnetwerken

### 3.2.1 Meetpunten oorspronkelijke meetnet 1986 – 2018

In 1986 is er een meetnet opgezet met 10 meettraaien die de kwelders en duinen van Oost-Ameland omvatten (Figuur 3-2). Deze meettraaien bevatten meerdere PQ's van 2x2 m. In 1986 is van alle PQ's in deze meettraaien de vegetatie, maaiveldhoogte en kleidikte gemeten. Vanaf 1989 is besloten om de monitoring te focussen op de 24 meetpunten van transect 3 (III, Neerlands Reid) en 14 meetpunten van transect 9 (IX, De Hon). De vegetatie is gemonitord in 1989, 1991, 1993, 1995, 1997 en vanaf 2000 elk jaar. De maaiveldhoogte is in die jaren gemeten tot 1993 (Neerlands Reid) of 1995 (De Hon). Vanaf 1993 wordt bij de PQ's langs transect 3 elk jaar de maaiveldverandering gemeten met de SEB-methode en bij transect 9 op De Hon vanaf 1995.

Transect 3 bevindt zich in het gebied dat voornamelijk door koeien wordt begraaasd en heeft een iets lagere begrazingsdruk dan transect 2 dat door schapen wordt begraaasd (0.21 versus 0.22 GVE/ha/j respectievelijk).



**Figuur 3-2.** Oorspronkelijke meettraaien voor maaiveldhoogte en vegetatie in de kwelders en duinen van Ameland uit 1986 (Dankers et al. 1987). Uiteindelijk werden vanaf 1993/1995 tot 2018, in het kader van de kweldermonitoring, alleen nog metingen verricht langs raai III (3) en IX (9).

### 3.2.2 Meetpunten 'nieuwe' meetnet: 2019 – heden

Het nieuwe meetnet heeft 80 PQ's van 2x2 m op het Neerlands Reid en De Hon samen en deze liggen ruimtelijk verspreid over de gehele kwelder. Daardoor heeft het nieuwe monitoringsmeetnet een goede dekking over het hele gebied. In delen die minder dan eens in de twee jaar worden overstroomd, zoals duinkopjes zijn geen PQ's uitgezet.

Om geschikte locaties voor de PQ's te vinden zijn de kwelders eerst opgedeeld in deelgebieden op basis van gemodelleerde inundatiefrequenties. De inundatiefrequenties zijn bepaald met het sedimentatiemodel ontwikkeld door Brinkman et al. (2017), waarin naast de maaiveldhoogte als belangrijkste factor ook de stroomsnelheid van het water en de afstand tot de krekken zijn meegenomen. Voor Neerlands Reid en De Hon leidde dit respectievelijk tot 15 en 10 deelgebieden. Op basis van een vlakdekkende vegetatiekaart zijn per deelgebied 3-4 PQ's uitgezet in verschillende vegetatietypes. In totaal zijn er 80 PQ's voor de hele kwelder op Ameland opgenomen in het nieuwe monitoringsmeetnet, waarvan 45 nieuwe PQ's en 35 PQ's uit het 'oude' meetnet uit 1986.

18 'oude' PQ's van meetraai 3 en 9 zijn in het nieuwe monitoringsmeetnet opgenomen waar in 2019 ook de opslibbingsnelheid t.o.v. 2018 kon worden gemeten. Daarnaast zijn er 17 SEB's geplaatst bij PQ's van de 'oude' meetraaien 2, 7 en 8. In 2019 zijn 62 x 2 nieuwe Sedimentatie-Erosie-Balk (SEB)-palen geplaatst. In 2021 zijn van twee PQ's (701, 901) de SEB-palen verdwenen door ijsgang. Omdat deze PQ's op het wad bevonden is er besloten om deze PQ's niet te herplaatsen. Daarnaast moesten bij één PQ de SEB-palen recht gezet worden, na verstoring door ijsgang. 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 kan extra inklinking geven, waardoor op deze locaties de opslibbingsmetingen mogelijk niet representatief kunnen zijn voor de gehele kwelder. Na een grafische check zijn deze punten wel meegenomen in de analyse, omdat de opslibbing niet veel afweek van de niet vertrapte punten. Om de palen minder aantrekkelijk te maken als schuurobject zijn in maart 2021 de SEB-palen afgezaagd tot 5 – 10 cm boven het maaiveld.

### Veldmetingen 2019 – 2022

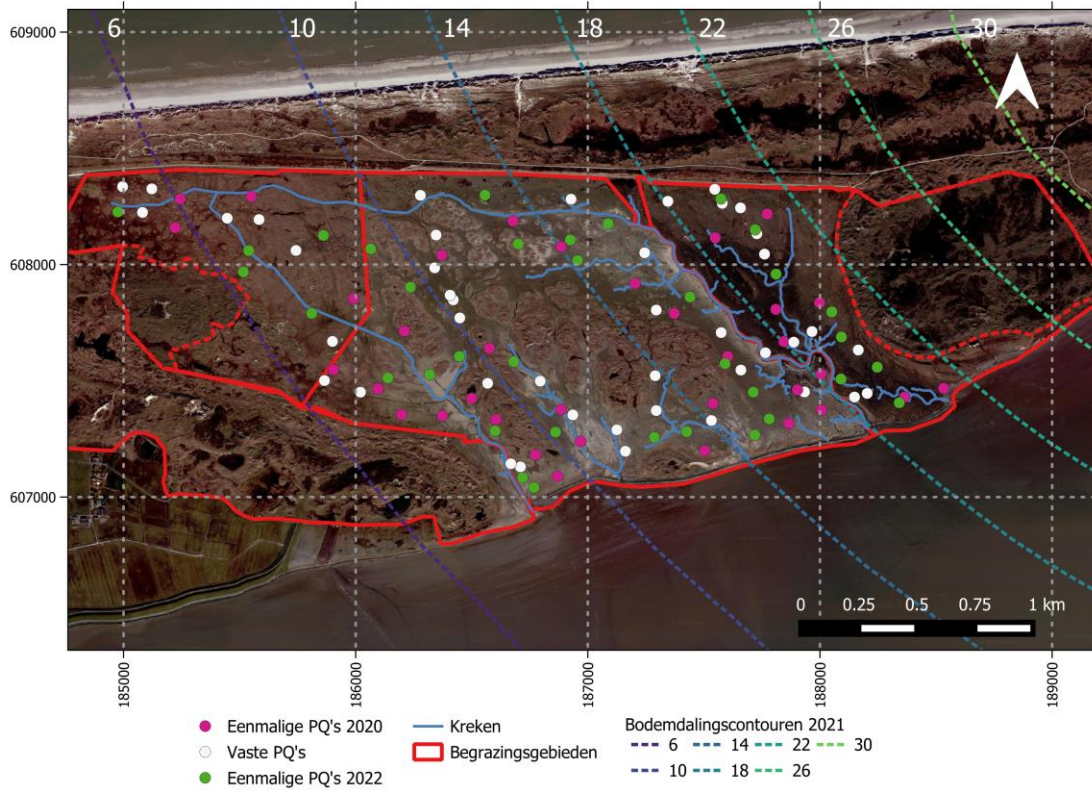
Bij deze 80 PQ's wordt elk jaar de opslibbingsnelheid en eens in de twee jaar de vegetatiesamenstelling gemeten. Voor een betere dekkingsgraad worden er eens per twee jaar ook 60 eenmalige kwadranten (EQ's) van 2x2 m uitgezet, verdeeld over de deelgebieden, waar kleidikte, maaiveldhoogte en vegetatiesamenstelling worden gemeten (Figuur 3-3 & Figuur 3-4). Een EQ wordt dus slechts éénmaal opgenomen.

In 2019 zijn van de 80 PQ's, de vegetatiesamenstelling, kleidikte en maaiveldhoogte gemeten (Tabel 3-1). In 2020 en 2022 is de opslibbing gemeten van de 80 PQ's, en is van 60 eenmalige EQ's de vegetatiesamenstelling, kleidikte en maaiveldhoogte gemeten. In 2021 zijn van de 80 PQ's de opslibbing en vegetatiesamenstelling gemeten en bodemonsters genomen bij om verschillende abiotische variabelen te meten, zoals redoxpotentiaal, vochtgehalte, elektronische conductiviteit, bulkdichtheid en organische stofgehalte. In totaal zijn er voor 200 kwadranten (80 PQ's en 2x60 EQ's) de vegetatiesamenstelling bepaald. Twee kwadranten zijn niet mee genomen in de analyse: PQ 701 is verloren gegaan door ijsgang en een EQ waar door technische limitaties het onmogelijk bleek om de maaiveldhoogte te meten. Voor de vegetatieanalyse zijn dus in totaal 198 PQ's en EQ's gebruikt.

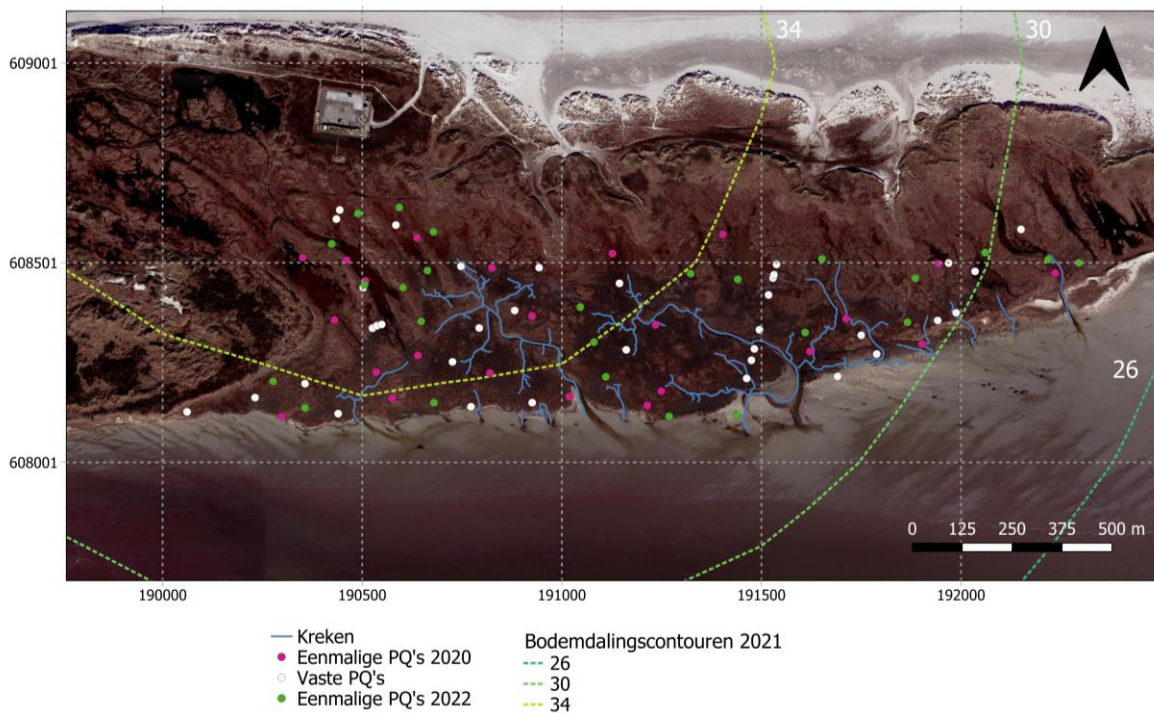
**Tabel 3-1** Overzicht van de metingen bij de PQ's en de EQ's vanaf 2019. Voor 2019 werd twee keer per jaar de sedimentatie gemeten en een keer per jaar de vegetatie opgenomen van het oude meetnet (transecten 3 en 9).

	2019	2020	2021	2022
<b>80 permante kwadraten (PQ's)</b>				
Vegetatie	x		x	
Opslibbing (SEB)	x	x	x	X
Kleidikte			x	
Maaiveldhoogte	x			
Abiotiek bodem			x	
<b>60 eenmalige kwadraten (EQ's)</b>				
Vegetatie		x		x
Kleidikte		x		x
Maaiveldhoogte		x		x





**Figuur 3-3** Locaties van de vaste PQ's en de EQ's in 2020 en 2022. De locaties van de kreken, de beweidinggebieden en bodemdalingcontouren (de diepe daling in cm) zijn ook weergegeven.

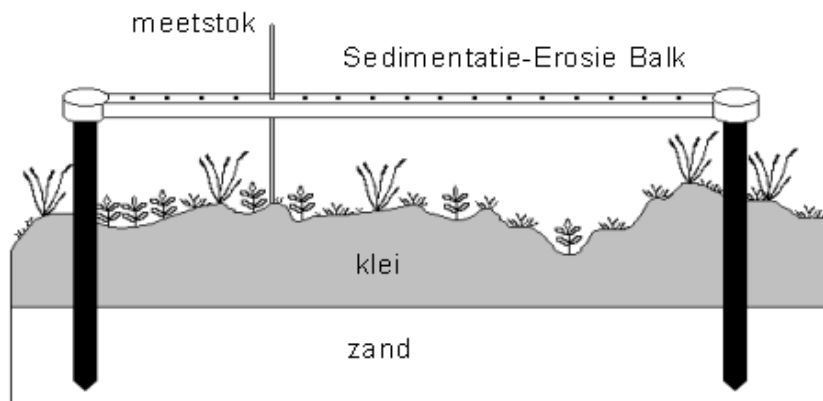


**Figuur 3-4** Locaties van de vaste PQ's en de EQ's in 2020 en 2022. De locaties van de kreken en de bomdalingscontouren (de diepe daling in cm) zijn ook weergegeven.

## 3.3 Maaiveldhoogteverandering

### 3.3.1 Sedimentatie-Erosie-Balk (SEB)-meting

De opslibbing wordt jaarlijks gemeten met de Sedimentatie-Erosie-Balk methode (Figuur 3-5, (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 in de statistische modelberekeningen vooral gemiddelde opslibbingssnelheden per jaar wordt gebruikt, heeft WMR gekozen om vanaf 2019 de opslibbing alleen nog in september van elk jaar te meten. Een nadeel is wel dat hierdoor niet langer onderscheid kan worden gemaakt tussen winter-opslibbing en zomer-compactie (Elschot et al. 2023).



**Figuur 3-5** 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).

### 3.3.2 Sedimentatieplaat

Naast de opslibbingmetingen met behulp van de SEB's wordt bij negen PQ's de opslibbing ook gemeten door middel van een sedimentatieplaat (Nolte et al. 2013). Op Neerlands Reid liggen deze platen op transect 3 naast PQ's 301, 304, 307, 317, 321 en 323 en op De Hon liggen ze naast de PQ's 9.04, 9.06 en 9.08. In het nieuwe meetnet zijn bij PQ's 323 en 908 geen SEB-metingen gedaan, voor opslibbinggegevens 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 door het Natuurcentrum Ameland (NCA). Dit geeft 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).

### 3.3.3 Kleidikte

Aan de rand van elk PQ en EQ van het nieuwe meetnet is in 2019 (PQ's) of 2020 en 2022 (EQ's) de kleidikte gemeten, met een nauwkeurigheid van 0.5 cm. Deze dikte geeft de totale netto opslibbing vanaf het ontstaan van de kwelder weer. Door dit te delen door de kwelderleeftijd kan een 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 in een vlakdekkend raster met een celgrootte van 50 m. Naast de kleidikte is ook de maaiveldhoogte van elk punt gemeten. Voor het Neerlands Reid was de kleidikte al in een vlakdekkend raster gemeten in 2016.

---

### 3.3.4 Bodemdaling & maaiveldhoogtes

De bodemdalingsgegevens zijn berekend met het bodemdalingsmodel van de NAM (NAM 2023). Dit model bepaalt de bodemdaling voor elk x en y coördinaat op de Amelandse kwelders. Daarnaast is er ook een shapefile gebruikt met contouren van de bodemdaling in 2021 om voor de individuele polygoenen, waaruit de vegetatiekaart wordt opgebouwd (zie sectie 3.4.1), de bodemdaling te bepalen.

Na 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-GNSS, waarmee vervolgens de maaiveldhoogte kan worden berekend. Na het afzagen van de SEB-palen om vertrapping van schapen te verminderen zijn de palen opnieuw ingemeten met een RTK-GNSS. In 2020 en 2022 is de maaiveldhoogte van de eenmalige EQ's gemeten met een RTK-GNSS.

Voor het oude meetnet kan de maaiveldverandering worden berekend vanaf de start van de gaswinning, omdat de maaiveldhoogte in 1986 bekend is en voor 2018 kan worden berekend met de SEB-data. Dat is niet mogelijk voor het nieuwe meetnet. Daarom wordt voor deze PQ's de bruto bodemdaling gebruikt die is berekend met het bodemdalingsmodel van de NAM. De maaiveldverandering kan eventueel worden berekend door een opslibbingsmodel te gebruiken, maar dat is in deze rapportage niet gedaan, omdat het bodemdalingsmodel niet op tijd beschikbaar was.

De maaiveldverandering vanaf het begin van de kwelderontwikkeling kan worden bepaald op basis van de kleidikte. Als de kleidikte lager is dan de gemodelleerde bodemdaling van de NAM, dan is het maaiveld gedaald. Deze methode vooral bruikbaar om een inzicht te krijgen in de maaiveldveranderingen van De Hon. Deze kwelder is namelijk veel jonger dan het Neerlands Reid, waardoor de kleilaag ook minder dik is.

## 3.4 Vegetatie

### 3.4.1 Vegetatiekaarten Rijkswaterstaat

De VEGWAD-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, 2003, 2008, 2014 en 2020 (Gutter et al. 1998, Dort & Kers 2007, Jage 2010, Pranger & Tolman 2016). In 1993 was er nog nauwelijks bodemdaling, dus de vegetatiekaart van 1993 zou als kaart van de uitgangssituatie kunnen dienen. De vegetatiekaarten worden opgeleverd met de SALT08 typologie (voor de kaarten van 1993-2006 is de SALT97-typologie gebruikt, maar nu omgezet door Rijkswaterstaat naar SALT08), deze worden geconverteerd naar TMAP-typologie met de conversietabel van Rijkswaterstaat. De methode van het maken van vegetatiekaarten is over de jaren veranderend en de vegetatiekaarten werden door verschillende waarnemers gemaakt, waardoor er kleine verschillen kunnen ontstaan tussen de vegetatiekaarten van de verschillende jaren. De veranderingen in de vegetatie op de kaarten uit verschillende jaren zijn grafisch weergegeven en statistisch geanalyseerd.

Om de vegetatieveranderingen tussen de vegetatiekaarten van 1993 en 2020 statistisch te analyseren zijn de punten of locaties waar de kleidiktemetingen zijn uitgevoerd gebruikt. De kleidikte is gemeten op het Neerlands Reid in 2016 en op De Hon in 2020. Voor elk punt is naast de kleidikte ook de maaiveldhoogte gemeten en de afstand tot de sedimentbron en de afstand wad via kreek berekend. Aangezien de punten waar kleidikten zijn gemeten relatief dicht bij elkaar liggen, zijn de punten ruimtelijk aan elkaar gecorreleerd. Om daarvoor te corrigeren is het Neerlands Reid en De Hon opgedeeld in blokken doormiddel van een grid. De afmetingen van de blokken waren voor het Neerlands Reid 200x200 m en voor De Hon 150x150 m. Voor De Hon zijn de blokken kleiner, omdat De Hon heterogener is en de afstand tussen de metingen kleiner is. Binnen elk blok zijn de maaiveldhoogtes, afstand tot de sedimentbron, afstand wad via kreek en de vegetatieverandering gemiddeld. Er zijn alleen blokken geselecteerd waarin zich minstens 3 kleidiktemetingen bevonden.

Door de vegetatiekaart van 1993 te vergelijken met de vegetatiekaart van 2020 is voor elk punt bepaald of regressie of successie van de vegetatie heeft plaatsgevonden of dat de vegetatie stabiel was. Waarbij -1 regressie betekent, 0 stabiel en 1 successie. De kleidikte en maaiveldhoogte van het Neerlands Reid

zijn vier jaar voor de vegetatiekaartopname gemeten. De gebruikte, gemeten maaiveldhoogte in 2016 zal daardoor iets afwijken van de werkelijke maaiveldhoogte in 2020, maar aangezien het verschil in maaiveldhoogte klein zal zijn, heeft dat geen groot effect op de analyse.

### 3.4.2 Puntmetingen – PQ's

In september 2019 en 2021 zijn bij alle 80 PQ's vegetatieopnames gemaakt, waarbij de bedekking van plantensoorten is bepaald met de Londo opnameschaal (Londo 1976). De hoogte van de vegetatie, drainage (slecht, matig of goed) en mate van begrazing (konijnen/hazen/ganzen en beweidingstype en intensiteit) zijn geschat. Dezelfde metingen zijn gedaan in 2020 en 2022 bij 60 EQ's. Bij de 80 PQ's zijn er in 2021 ook twee bodemmonsters genomen.

Met de bedekking van de plantensoorten kan het TMAP-vegetatietype worden bepaald (Petersen et al. 2014). In vorige rapportages werd gebruik gemaakt van de SALT97 vegetatietypologie, maar sinds dit jaar is WMR overgestapt naar de TMAP-typologie. De TMAP-typologie is ontwikkeld in samenwerking met Duitse en Deense kwelderbeheerders en -onderzoekers en wordt Waddenzee-breed toegepast. Daarmee zijn deze data beter te vergelijken met data van andere delen van de Waddenzee. De SALT97-typologie is vergelijkbaar met de TMAP-typologie waardoor deze overstap geen grote veranderingen tot gevolg kan hebben voor de interpretatie van de vegetatieontwikkeling. Een wel relevant verschil tussen SALT97-typologie en TMAP-typologie is dat TMAP de middenkwelder niet als aparte vegetatiezone onderscheidt. Dit onderscheid wordt in wetenschappelijke studies ook niet wordt gemaakt. Op basis van de geschatte bedekkingspercentages van de aanwezige kweldersoorten wordt het TMAP-type bepaald voor elk PQ/ EQ.

### 3.4.3 Successie / regressie

Door het analyseren van de veranderingen in vegetatiesamenstelling kan worden bepaald of er bij een bepaalde PQ-successie, regressie of geen verandering heeft plaatsgevonden. Bijvoorbeeld een overgang van lage kwelder naar hoge kweldervegetatie is successie, terwijl een verandering van hoge kwelder naar lage kwelder regressie inhoudt. Voor de PQ's van het oude meetnet is naar de verandering in vegetatiesamenstelling tussen 1986 en 2018 gekeken. Voor de nieuwe PQ's zou de vegetatiekaart van 1993 kunnen worden gebruikt om de vegetatieverandering te bepalen vanaf 1993. Alleen zorgt de conversie van de vegetatiekaarten van SALT08 naar TMAP-typologie voor kleine verschillen tussen de het TMAP-type van PQ's en de vegetatiekaart. Daarom is besloten om voor deze PQ's niet de vegetatieverandering te bepalen.

**Tabel 3-2** Overzicht van mogelijke verschuivingen tussen vegetatiezones bij gebruik van de TMAP-typologie. -1 is regressie, 0 stabiel en 1 successie.

Jaar 1	Kale grond	Water	Pionierzone	Lage kwelder	Hoge kwelder	Brakke kwelder	Zoete graslanden	Duinen	Duinvalleien
Kale grond	0	0	1	1	1	1	1	0	0
Water	0	0	1	1	1	1	1	0	0
Pionierzone	-1	-1	0	1	1	1	1	0	0
Lage kwelder	-1	-1	-1	0	1	1	1	0	0
Hoge kwelder	-1	-1	-1	-1	0	1	1	0	0
Brakke kwelder	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	0	0
Zoete graslanden	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	0
Duinen	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0
Duinvallei	0	0	-1	-1	-1	-1	0	0	0

In de vorige integrale rapportage werd de SALT97 typologie gebruikt. Omdat er nu voor gekozen is de TMAP-typologie (Petersen et al. 2014) te gebruiken, worden regressie en successie op een iets andere manier bepaald (Tabel 3-2). Het belangrijkste verschil is dat er nu geen aparte middenkwelderzone meer wordt onderscheiden tussen de hoge en lage kwelderzone in. Omdat de range van deze twee

---

vegetatiezones hierdoor groter is, vinden veranderingen in vegetatiesamenstelling vaker plaats binnen een vegetatiezone en worden minder vaak als successie of regressie gekenmerkt (verschuiving van de een vegetatie zone naar een andere).

In de jaarrapportage van 2021 werd een verandering van brakke kwelder naar hoge kwelder niet geassocieerd als regressie. Omdat bleek dat die verandering regelmatig voorkomt, en in de vorige integrale rapportage het wel als regressie werd geassocieerd, is besloten dat in de voorliggende integrale rapportage deze verandering van brakke kwelder naar hoge kwelder ook als regressie wordt meegenomen. Bij een verandering van hoge naar brakke kwelder is meestal een verandering in de bedekking van de al aanwezige soorten, waardoor de verandering minder groot is dan een verandering van lage kwelder naar hoge kwelder waar een omslag plaatsvindt in de soortensamenstelling. Het climax stadium zeekweek valt onder de hoge kwelder, een verandering van bijv. riet vegetatietype naar zeekweek wordt als regressie gedefinieerd in deze rapportage. Als de vegetatie verandert van duinvegetatie naar kweldervegetatie wordt dat gedefinieerd als regressie omdat het gebied zouter wordt. Een verandering van hoge kwelder naar duin wordt niet als successie of regressie gedefinieerd, omdat dit vaak voorkomt door overstuiving van zand.

## 3.5 Hydromorfologie

### 3.5.1 Waterstanden

Tijdens inundaties brengt het water slib mee dat geleidelijk neerslaat op de kwelderbodem. Een hogere inundatiefrequentie, inundatieduur of tijlhoogte zorgt doorgaans dan ook voor een hogere sedimentatie op de kwelder. Voor de waterstanden kan gebruik gemaakt worden van de metingen van Rijkswaterstaat meetstation Nes, waar de gemiddelde waterstand per 10 minuten wordt gemeten. Door lokale geomorfologie op de kwelder kan het water echter worden opgehouden en/of opgestuwd (vooral tijdens eb). Hierdoor kan de kwelder langer onderwater staan dan verwacht zou worden op basis van de 10-minuten waterstanden van het Rijkswaterstaat meetnet. Daarom is door de bodemdalingscommissie besloten om drukmeters op de kwelder te plaatsen om de werkelijke lokale waterstand te meten.

In de winter van 2019 zijn er 50 drukmeters geplaatst bij 50 PQ's door Sovon. Deze drukmeters slaan de gemiddelde omgevingsdruk per 5 minuten op. 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 zijn 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 meting. Als de variatie rondom een meetpunt onrealistisch hoog was werd het meetpunt verwijderd. De vastgestelde drempel voor de variatie was 500 hPa. Als 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 referentiedrukmeter 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 referentiedrukmeter niet altijd een hoogwater event was. Om daarvoor te compenseren zijn alleen drukverschillen hoger dan 2 hPa meegerekend.
4. Als extra check zijn de hoogwater events, die berekend zijn op basis van de drukmetergegevens, vergeleken met de gemeten waterstanden door Rijkswaterstaat bij Nes. Als er bij een berekend hoogwater event 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.

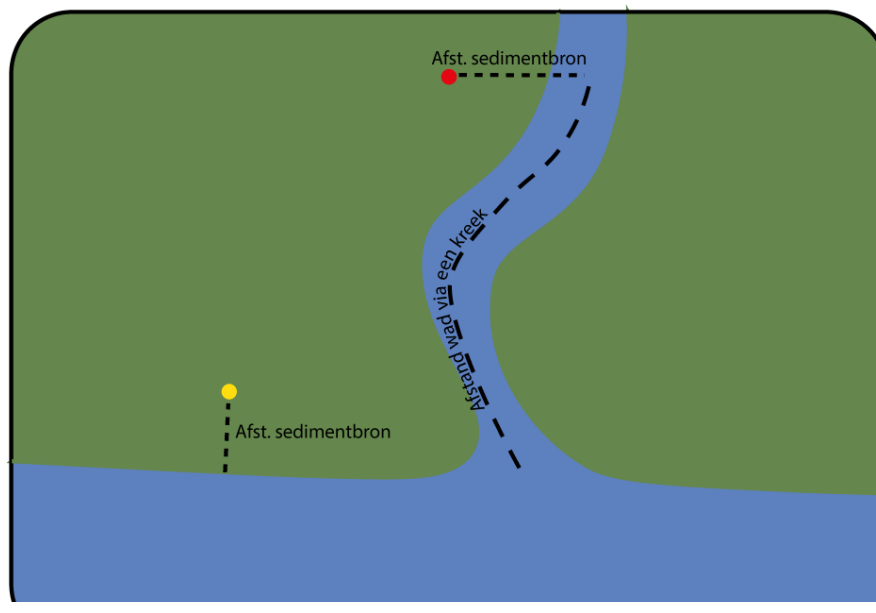
Voor PQ's waar geen drukmeters zijn geplaatst zijn de hoogwaterevents van het dichtstbijzijnde lagergelegen PQ gebruikt, en dan gecorrigeerd voor het verschil in maaiveldhoogte tussen beide PQ's. Voor de PQ's is de inundatiefrequentie, gemiddelde inundatieduur, en de gemiddelde hoogte van de waterkolom berekend tussen twee opeenvolgende metingen. Daarnaast is het aantal dagen berekend dat de PQ onafgebroken droogstaat in de groeiperiode (1 april – 31 augustus). Voor de analyse is het maximale aantal dagen dat een PQ onafgebroken droogstond meegenomen als factor.

Plassen die zijn ontstaan door neerslag of stagnerend water kunnen een groot effect hebben op de vegetatieontwikkeling, bijvoorbeeld doordat vegetatie afsterft er een verschuiving in soortensamenstelling optreedt of 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 kunnen nauwkeuriger worden als er een referentiedrukmeter op Ameland wordt geplaatst.

De drukmeters zijn geplaatst in december 2019, omdat de metingen van de maaiveldveranderingen van het nieuwe meetnet zijn begonnen in september 2019, missen herfststormen in de periode september – december dat jaar. Om een complete waterstanden dataset te hebben is er besloten om de waterstanden bij Nes van het Rijkswaterstaat meetnet te gebruiken voor de analyse van de maaiveldhoogteverandering. Aangezien de inundatiefrequentie en hoogte van de waterkolom tijdens een overstroming vergelijkbaar zijn met de RWS-data heeft dat geen effect op de analyse. Voor de vegetatieanalyse zijn wel de data van de drukmeters gebruikt.

### 3.5.2 Afstand tot sedimentbron

De wadrand en (primaire) krekens zijn de belangrijkste sedimentbronnen op een kwelder (Temmerman et al. 2003b, van Dobben et al. 2022). De afstand tot de sedimentbron verklaart voor een groot deel de lokale opslibbing. Wageningen Environmental Research heeft databestanden met de locaties van de krekens tot de 3<sup>de</sup> orde op NLR en de ontwikkeling en ouderdom van de kwelder op De Hon aangeleverd (Kuiters & Wegman 2020). De locatie van de kwelderrand van NLR was al door WMR bepaald. WMR heeft ook de locatie van de krekens op De Hon bepaald met behulp van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN3 2014). Door de maaiveldhoogte op basis van het AHN te corrigeren met de gemiddelde maaiveldhoogte van de omliggende 5 meter, konden de lagere delen in het landschap worden geïdentificeerd. Daarmee kon de ligging en omvang van de voornaamste krekens tot de 3<sup>de</sup> orde worden bepaald.



**Figuur 3-6** Schematische weergave hoe de afstand tot de sedimentbron en vervolgens de afstand van het wad via de kreek wordt berekend. Voor het rode meetpunt is de afstand tot de sedimentbron de afstand naar de dichtstbijzijnde kreek. Voor het gele meetpunt is de afstand tot de sedimentbron de afstand naar het wad. De afstand naar het wad via de kreek is bij het gele meetpunt 0 m.

---

Vervolgens is voor elk PQ 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 3-6). Als tweede variabele is de afstand tussen de respectievelijke sedimentbron via de kreek naar het wad meegenomen (Figuur 3-6). Als een PQ dicht bij het wad lag dan een kreek is deze afstand op 0 m gezet (zie als voorbeeld het gele meetpunt in figuur 3-6).

## 3.6 Abiotische factoren bodem

De lokale abiotiek heeft een groot effect op de vegetatiesamenstelling in een kwelder (Davy et al. 2011). Daarom is in het veld bij elk PQ van het nieuwe meetnet de redoxpotential van de bodem gemeten en zijn bodemmonsters verzameld (zomer 2021), waarvan in het lab vochtgehalte, bulkdichtheid, zoutgehalte en percentage organische stof is bepaald. De abiotische factoren zijn wel zeer variabel en sterk afhankelijk van het weer. Deze metingen zijn gedaan in een droge zomer en kunnen alleen worden gebruikt om de lokale verschillen te analyseren.

Om de redoxpotential te meten is bij elk PQ met een schep een bodemprofiel gestoken tot 30 cm diep. Op elke 3 cm van dat bodemprofiel is de redoxwaarde gemeten (mVolt), wat een indicatie geeft 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). Een gereduceerde staat kan een indicatie zijn dat de bodem is verzadigd met water en slecht draineert. Voor de analyses is het gemiddelde van de redoxwaardes tot 15 cm diepte gemiddeld genomen, omdat wortels meestal tot ongeveer 15 cm diepte groeien. Daarnaast hadden de redox waardes een trendbreuk vanaf 15 cm.

Voor de bepaling van vochtgehalte, bulkdichtheid, zoutgehalte en organische stofgehalte zijn bodemmonsters met een inhoud van 200 cc genomen van 0 - 10 cm diepte bij 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 werd gemeten door twee sub-monsters te nemen van elk 10 gram, die werden verdund met 40 ml 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 gedroogde grond 24 uur in de oven te plaatsen bij 560 °C. Vervolgens werden de monsters weer gewogen en het gewicht dat was verloren na het verbranden is de hoeveelheid organische stof in de bodem.

## 3.7 Statistische analyse

Alle statistische analyses zijn uitgevoerd met het statistisch programma R (R Core team 2022). De resultaten zijn, afwijkend van het Nederlandse Stelsel van eenheden, gerapporteerd met een decimale punt in plaats van een komma.

### 3.7.1 Kleidikte en maaiveldverandering (nieuwe meetnet)

Omdat maaiveldverandering meestal geen lineaire relatie heeft met de inundatie frequentie of de afstand tot de kwelderrand, is ervoor gekozen om een generaal additief model (GAM) te gebruiken voor de statistische analyse (Wood 2017). Een GAM gebruikt een non-parametrische smoothing functie waarmee de data beter kunnen worden beschreven dan met een lineaire regressie functie. Dit voordeel weegt op tegen het nadeel dat een GAM lastiger te interpreteren is door een grotere invloed van uitschieters in de data.

Voor de analyse van de opslibingsdata van het nieuwe meetnet wordt de opslibingssnelheid gerelateerd aan de volgende variabelen: locatie (NLR of De Hon), inundatiefrequentie, gemiddelde hoogte waterkolom, afstand tot de sedimentbron, afstand sedimentbron tot kreek, vegetatiebedekking, percentage bedekking eenjarige soorten en gemiddelde vegetatiehoogte. In het generaal additief model is de inundatiefrequentie gerelateerd met een parametrische smoothing functie, de andere factoren zijn

gerelateerd met een lineaire functie. De opslibbingsdata van het oorspronkelijke meetnet zijn eerder uitgebreid geanalyseerd door van Dobben et al. (2021). Deze analyse is vergelijkbaar met de bovenstaande analyse van het nieuwe meetnet.

Eerst is in een model (full model) de kleidikte gerelateerd aan de volgende variabelen: locatie (NLR of De Hon), hoogte onderliggende zandlaag, afstand tot de kwelderrand, afstand kreek en leeftijd van de kwelder. De hoogteligging van de onderliggende zandlaag is berekend door de kleidikte af te trekken van de maaiveldhoogte (Oiff et al. 1997). De "afstand tot de kwelderrand" is niet gecorrigeerd voor het feit dat de kwelderrand in het verleden op een andere afstand kon liggen dan nu. Als tweede stap zijn de analyses uitgevoerd voor het NLR en De Hon apart. Gebied en leeftijd van de kwelder zijn in het generaal additief model meegenomen als een lineaire relatie. Voor de kleidikte is een aantal punten niet meegenomen in de analyse. Dat zijn plekken waar geen kwelder was tijdens de meting of waar het maaiveld in 2016 (NLR) of 2020 (De Hon) lager was dan 0.7 m NAP. Verder zijn plekken verwijderd die boven de 4.0 m+ NAP liggen, omdat dit geen kwelders maar duinen zijn.

### 3.7.2 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 3-3). Alle abiotische factoren, behalve de maximale inundatievrije-periode zijn normaal verdeeld. De inundatievrije-periode is getransformeerd met een log10 transformatie.

**Tabel 3-3** Overzicht van de verklarende factoren voor de verschillende lineaire modellen per abiotische factor.

Abiotische factor	Verklarende variabelen
Redoxmeting	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. inundatievrije-periode, bodemdaling, organische stof, bulkdichtheid, EC, vochtgehalte en locatie
Organische stof	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. inundatievrije-periode, bodemdaling, bulkdichtheid, EC, vochtgehalte en locatie
Elektrische conductiviteit	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. inundatievrije-periode, bodemdaling, bulkdichtheid, organische stof, vochtgehalte en locatie
Vochtgehalte	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. inundatievrije-periode, bodemdaling, bulkdichtheid, organische stof, EC en locatie
Bulkdichtheid	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, max. inundatievrije-periode, bodemdaling, en locatie
Maaiveldhoogte	Afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, bodemdaling, en locatie
max. inundatievrije-periode	Maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand wad via de kreek, bodemdaling, en locatie

### 3.7.3 Vegetatiekaarten Rijkswaterstaat

Met een lineair model is de gemiddelde vegetatieverandering tussen de kaarten uit 1993 en 2020 gerelateerd aan maaiveldhoogte, afstand sedimentbron, afstand sedimentbron tot wad en voor Neerlands Reid ook de beweidingsgebieden. Daarnaast is in het model de interacties tussen maaiveldhoogte en afstand sedimentbron, afstand sedimentbron tot wad, en gebied meegenomen in het model.



---

### 3.7.4 Vegetatie PQ's en EQ's

Het voorkomen van regressie is statistisch getest met een binominaal model met de data van het oorspronkelijke meetnet, met maaiveldhoogte, verandering in maaiveldhoogte, afstand tot de sedimentbron, afstand sedimentbron tot het wad en de locaties als verklarende variabelen.

Met de data van de PQ's en EQ's is de bedekking van kale grond, zeekraal en klein schorrekruid geanalyseerd met een lineair model. De verklarende variabelen voor deze modellen waren maaiveldhoogte, bodemdaling, afstand tot de sedimentbron, afstand wad via kreek en locatie (De 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 inundatievrije-periode).

Om het effect van abiotische omstandigheden te bepalen op de soortensamenstelling van PQ's is een multivariate analyse uitgevoerd. De data zijn 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.

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 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 EQ's samen zijn meegenomen. Een tweede CCA is gebaseerd op de abiotische factoren (redoxwaarde, elektrische conductiviteit, vochtgehalte, bulkdichtheid, organische stof, inundatievrije-periode) met alleen de PQ's.

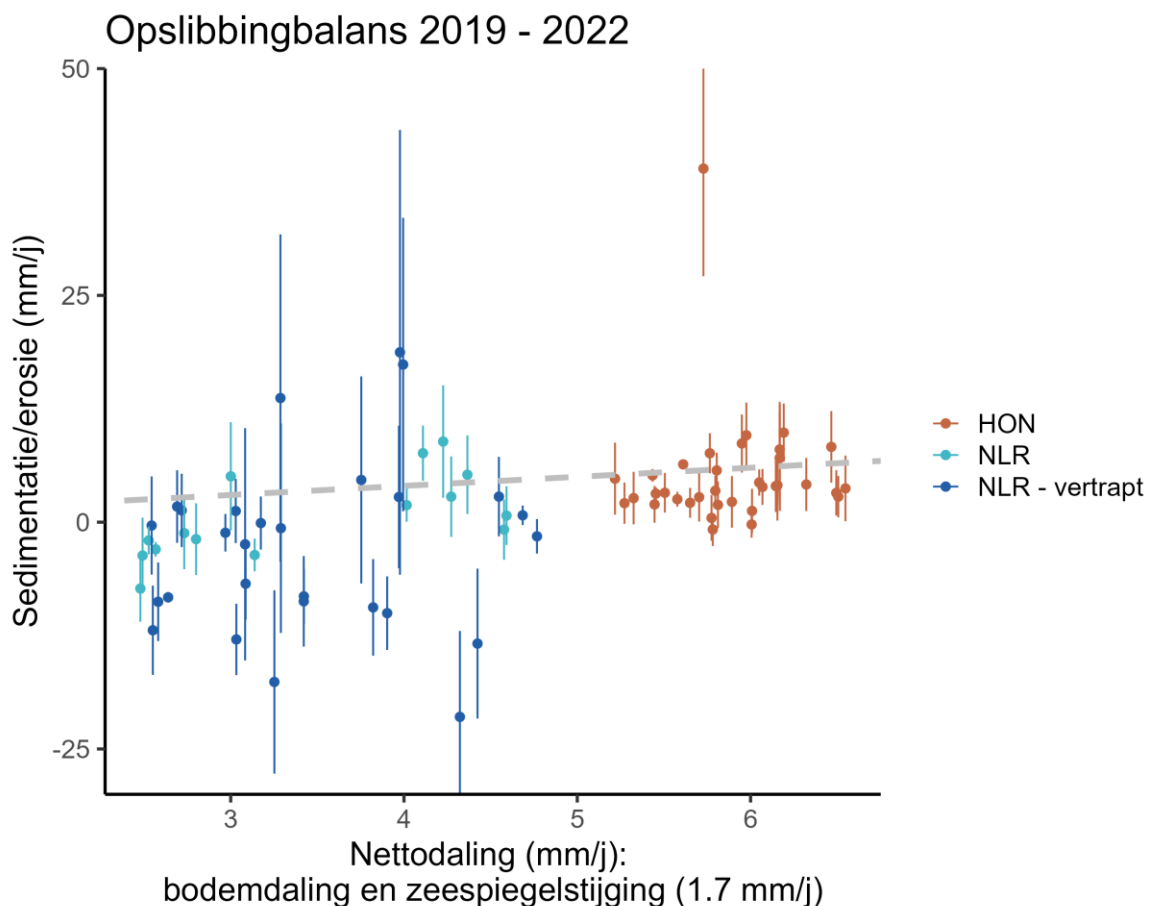
Om te bepalen hoe kwelderplanten zich aanpassen aan maaivelddaling is geanalyseerd hoe de range in maaiveldhoogte van specifieke kweldersoorten is veranderd ten opzichte van 1986. De data van de PQ's in 1986 van het oorspronkelijke meetnet is hiervoor gebruikt. Er zijn alleen soorten geselecteerd die in minimaal 3 PQ's voorkwamen met meer dan 5% bedekking. Voor het Neerlands Reid zijn er voor de PQ's en EQ's in 2020 - 2022 twee groepen gemaakt afhankelijk van de bruto bodemdaling (0 - 15 cm of 15 - 30 cm bodemdaling), voor deze twee groepen is gekozen om zoveel mogelijk data per groep te hebben. Met een t-test is vergeleken of de maaiveldhoogte van specifieke kweldersoorten significant verschilde met de maaiveldhoogte van 1986.

# 4 Resultaten

## 4.1 Opslibbing

### 4.1.1 Nieuw meetnet

Met de opslibbingmetingen kan worden bepaald of de bodemdaling wordt gecompenseerd door de opslibbing. Het nieuwe meetnet is jaarlijks gemeten tussen 2019 – 2022. Voor 68% van de PQ's was de netto-opslibbing niet hoog genoeg om te compenseren voor de bodemdaling. De gemiddelde opslibbing voor het Neerlands Reid en De Hon was significant lager dan de bodemdaling en zeespiegelstijging (NLR: t-test:  $t_{132} = 20.4$ ,  $p = <0.001$ ; Hon: t-test:  $t_{114} = 19.8$ ,  $p = <0.001$ ). Bij de meeste PQ's was onvoldoende opslibbing om de bodemdaling volledig te compenseren (Figuur 4-1). Daarnaast is een aantal PQ's op de het Neerlands Reid erg vertrappt, waardoor er waarschijnlijk meer inklinking heeft plaats gevonden. Vooral PQ's dicht bij de kwelderrand hebben veel variatie in opslibbing, dat komt vooral omdat er in 2022 veel opslibbing heeft plaatsgevonden (Tabel 4-1). In februari van 2022 waren er drie-op-een-volgende stormen in vijf dagen tijd, waardoor er waarschijnlijk veel meer sediment op de kwelder is bezonken in vergelijking tot andere jaren. Het nieuwe meetnet loopt nog maar relatief kort, waardoor de variatie tussen jaren een vrij groot effect heeft op de gemiddelde opslibbing. Naarmate meer jaren zijn gemeten zal dit effect afnemen en zal het gemiddelde nauwkeuriger worden.



**Figuur 4-1** De gemiddelde sedimentatie of erosie (mm/j) ten opzichte van de gemiddelde bodemdaling (mm/j) + zeespiegelstijging voor het Neerlands Reid (NLR) en De Hon voor de jaren 2019 – 2022. PQ's vertrappt door schapen, koeien of paarden zijn een aparte groep (NLR-vertrappt). PQ's boven de grijze gestreepte lijn hebben een hogere opslibbing dan de jaarlijkse bodemdaling en zeespiegelstijging, zodat bij deze plekken de maaiveldhoogte toeneemt. Bij PQ's onder de grijze lijn daalt het maaiveld. In deze grafiek is rekening gehouden met een gemiddelde zeespiegelstijging van 1.7 mm per jaar. 4 PQ's langs de kwelderrand van De Hon met hoge erosie zijn niet meegenomen in deze grafiek.

Op het Neerlands Reid was er gemiddeld meer inklinking en/of erosie in vergelijking met De Hon (Tabel 4-1). Als er naar de verschillende beweidingsgebieden wordt gekeken is het duidelijk dat het westelijke gebied B, dat zich op een grote afstand van de kwelderrand bevindt de minste opslibbing heeft. In gebied C ten westen van de Oerdsloot vond veel vertrapping plaats. Daarnaast schuurden schapen graag tegen de SEB-palen aan. Desondanks heeft gebied C minder inklinking dan gebied B, waarschijnlijk omdat delen van C lager en dichter bij de kwelderrand liggen en daardoor hogere opslibbing hebben. Het oostelijke gebied D heeft de hoogste opslibbing op het Neerlands Reid, maar wel met een hoge variatie. De Hon heeft gemiddeld een hogere opslibbing dan het Neerlands Reid, maar dat is niet in alle jaren genoeg om voor de bodemdaling te compenseren.

**Tabel 4-1** Gemiddelde opslibbing (mm/j ± SE) voor het Neerlands Reid en De Hon. Binnen het Neerlands Reid is ook onderscheid gemaakt tussen de verschillende begrazingsgebieden. De bodemdaling is de gemiddelde bodemdaling van de PQ's over de periode 2016 – 2022.

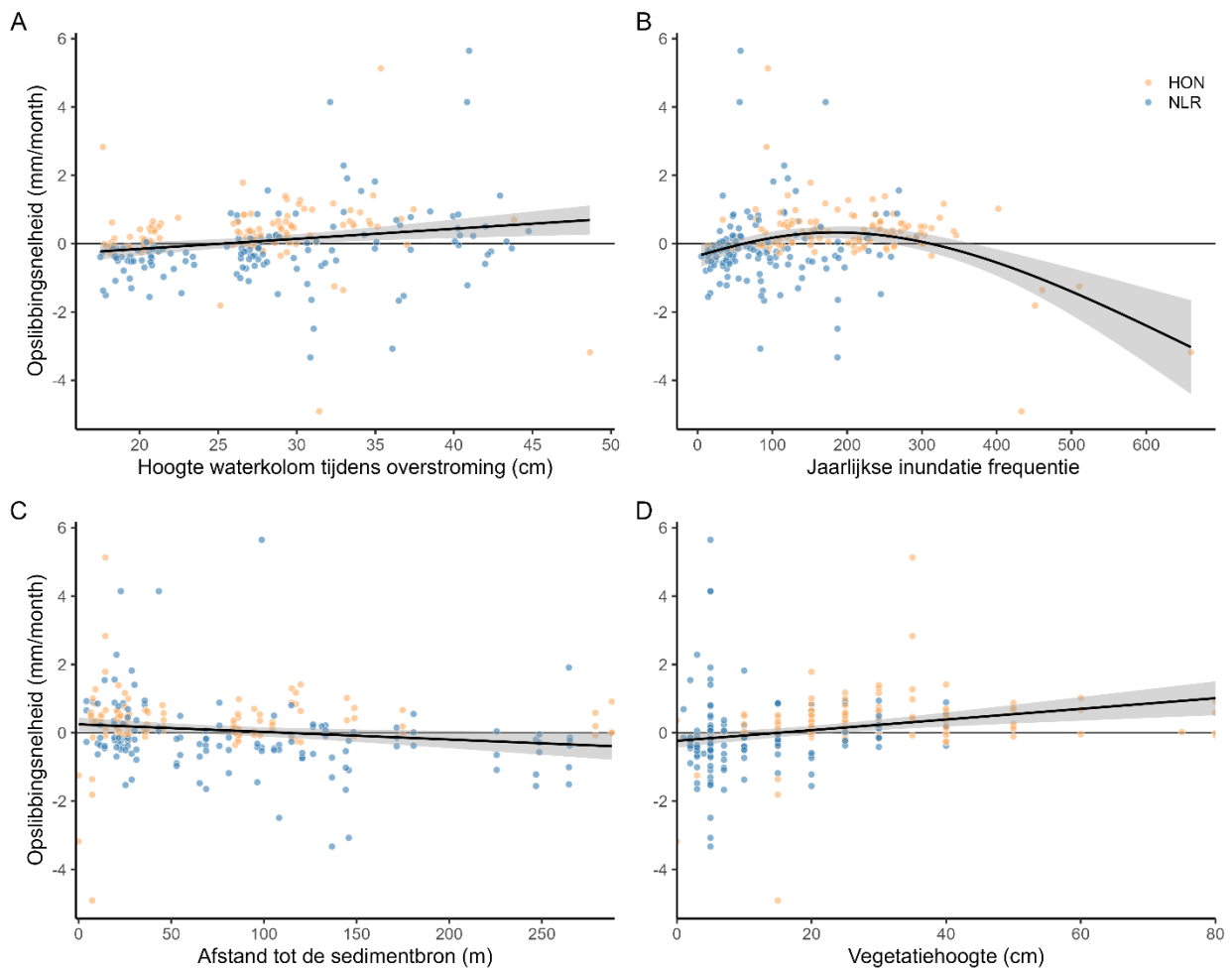
Jaar	NLR-gebied B	NLR-gebied C	NLR-gebied D	De Hon
	1.1 mm/j daling	1.8 mm/j daling	3.7 mm/j daling	4.8 mm/j daling
<b>Nieuw meetnet</b>				
2019 - 2020	-6.51±1.49	-4.85±0.79	4.46±1.97	3.48±0.82
2020 - 2021	-8.58±1.61	-6.69±1.12	-4.59±1.22	2.80±1.07
2021 - 2022	1.25±2.28	7.64±5.01	-0.66±4.08	9.19±1.70
Gem. 2019 - 2022	-4.61±1.38	-1.30±1.87	-0.16±1.71	5.16±0.77

Uit het statistisch model volgt dat de maaiveldophoging met een hogere inundatie frequentie toeneemt en bij 200 inundaties per jaar afvlakt. Er is meer opslibbing met een hogere waterkolom, wat een indicatie geeft dat bij zwaardere stormen er meer sediment neerslaat. Daarnaast is er een lineair verband tussen de afstand van de sedimentbron en de opslibbingsnelheid, verder van de sedimentbron is de opslibbing lager (Tabel 4-2, Figuur 4-2). De vegetatiehoogte had een significant positief effect op de opslibbing, bij hogere vegetatie bezonk meer sediment. Verder had de fractie bedekking eenjarige soorten ook een significant positief effect op de opslibbing. Er was een negatieve relatie verwacht, aangezien de eenjarige soorten in de winter afsterven. De verwachting was dan ook dat met meer eenjarige soorten de opslibbing lager zou zijn, omdat de vegetatie minder sediment kan vasthouden in de winter. Dat er een positieve relatie was komt waarschijnlijk doordat de eenjarige soorten (Zeekraal en klein schorrekruid) vooral voorkomen op de pionierzone en lage kwelder. Deze plantensoorten bevonden zich relatief vaker dicht bij de kwelderrand waar een hogere opslibbing was. Ook was er een significant verschil tussen het Neerlands Reid en De Hon. De Hon heeft een hogere positieve maaiveldverandering, waarschijnlijk door een combinatie van meer opslibbing en minder inklinking door de afwezigheid van vertrapping door vee.

**Tabel 4-2** *Generaal additief model voor de opslibbing van het nieuwe meetnet. Inundatie frequentie is geanalyseerd met een smoothing factor. De andere factoren zijn in het model meegenomen als een lineaire relatie. De t-waardes met bijbehorende p-waardes voor de factoren zijn weergegeven.*

Factoren	Estimates
Intercept	0.28*
Afstand sedimentbron	-0.24***
Afstand sedimentbron via kreek naar wad	-0.04
Vegetatiebedekking	-0.01
Vegetatiehoogte	0.21**
Bedekking eenjarige soorten	0.18*
Hoogte waterkolom	0.32***
Neerslagtekort	-0.04
Locatie	-0.39*
<b>Smoothed fit</b>	
S(Indundatiefreq.)	3.66***
Aantal observaties	245
R <sup>2</sup>	0.29

Note: p-waardes \* $>0.05$ , \*\* $p > 0.01$ , \*\*\*  $p > 0.001$

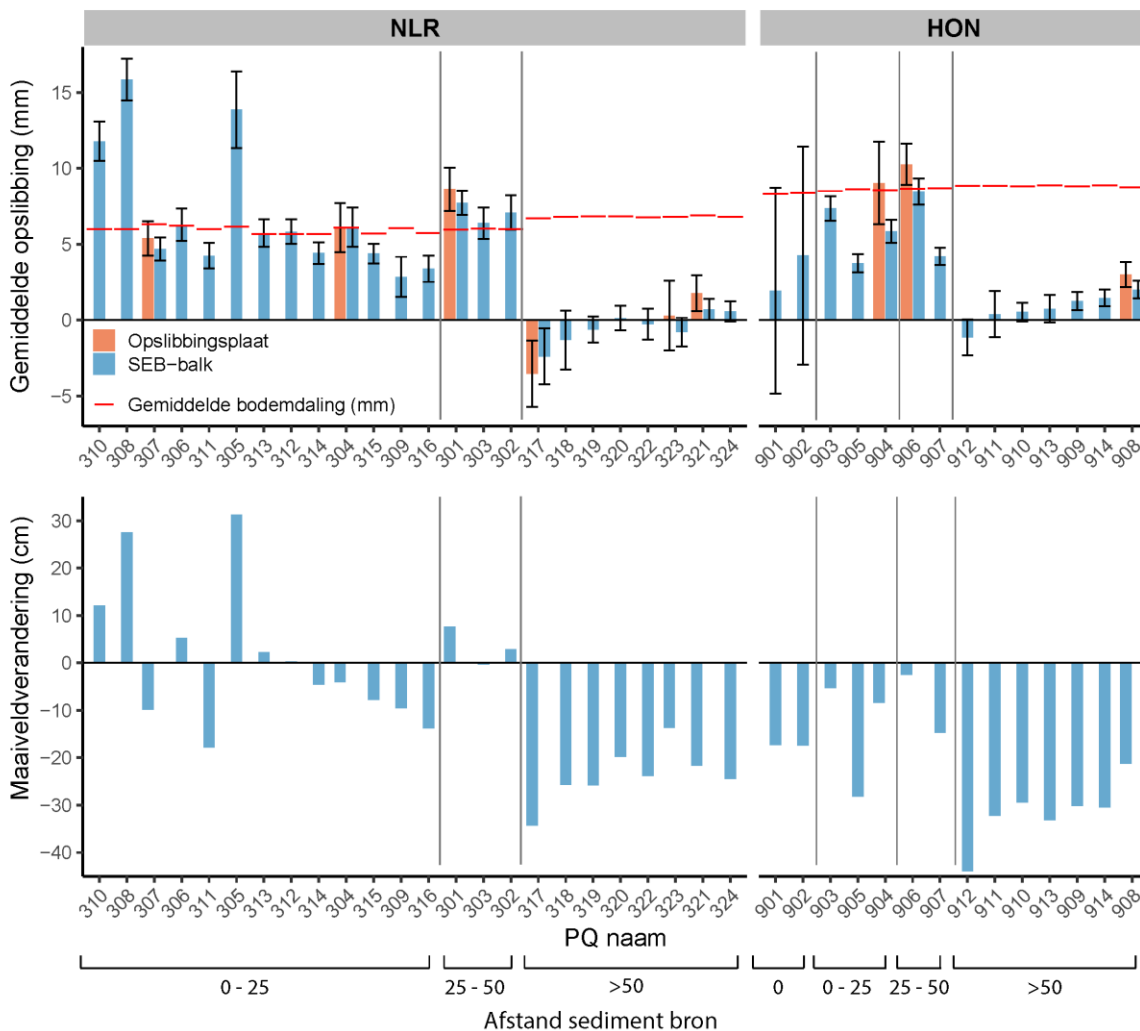


**Figuur 4-2** *De opslibbing van het nieuwe monitoringsmeetnet gerelateerd aan hoogte van de waterkolom, inundatie frequentie, afstand tot de sedimentbron en vegetatiehoogte. De verschillende kleuren geven de twee locaties aan. Voor de hoogte van de waterkolom, afstand tot de sedimentbron en de vegetatiehoogte is een lineaire functie geplot en voor de inundatiefrequentie een smoothing functie geplot, het grijze gebied is de variatie van het gemiddelde.*

#### 4.1.2 Oorspronkelijke meetnet

De PQ's van het oorspronkelijke meetnet zijn niet representatief voor de gehele kwelder op Ameland, maar het is wel een lange meetreeks waardoor het wel inzicht kan geven in de opslibbing en maaiveldverandering over een langere termijn. Voor het Neerlands Reid was de opslibbing gemiddeld lager dan de bodemdaling en zeespiegelstijging (NLR: t-test:  $t_{995} = 62.1$ ,  $p = <0.001$ ). De lange termijn laat zien dat voor het Neerlands Reid, tot een afstand van ongeveer 50 meter van een sedimentbron de opslibbing hoog genoeg is om te compenseren voor de bodemdaling (Figuur 4-3). Op een grotere afstand van de sedimentbron is de opslibbing te laag, en daalt het maaiveld. De gemiddelde opslibbing op De Hon was significant lager dan de bodemdaling en de zeespiegelstijging (t-test:  $t_{307} = 6.4$ ,  $p = <0.001$ ). Op De Hon is de opslibbing ook hoger vlak bij de sedimentbron, maar door de grotere bodemdaling dan het Neerlands Reid, is de opslibbing niet hoog genoeg om te compenseren voor de bodemdaling. Verder van de sedimentbron is de opslibbing ook lager.

Van Dobben et al. (2022) hebben de opslibbing van het oorspronkelijke meetnet geanalyseerd samen met SEB-metingen van Terschelling en Schiermonnikoog. Uit hun analyse volgt dat de belangrijkste parameters voor opslibbing de waterdiepte tijdens een overstroming en de totale gemiddelde waterdiepte zijn, maar ook dat opslibbing sterk afnam met toenemende afstand tot de sedimentbron. De waterdiepte tijdens een overstroming kan worden gezien als een proxy voor stormintensiteit, terwijl



**Figuur 4-3** De gemiddelde opslibbing met standard error voor elk PQ van het oude meetnet gemeten met de SEB-balk of opslibbingsplaat en de gemodelleerde diepe bodemdaling door de NAM. De maaiveldverandering voor elk PQ. De PQ's zijn geordend van laag naar hoge afstand sedimentbron. Onderaan staat de afstand tot de sedimentbron. PQ's 901 en 902 liggen op het wad. De opslibbingmeting is gestart in 1993 (NLR) of 1995 (Hon) De laatste opslibbingsmeting van de PQ's was in de volgende jaren; 2018: 302, 303, 305, 306, 308, 310, 312, 313, 315, 316, 318, 901, 911, 912, 914; 2020: 311, 907; 2022: 301, 304, 307, 309, 314, 317, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 902, 903, 904, 905, 906, 908, 909, 910, 913. De maaiveldmeting is vanaf 1986 tot de laatste opslibbingsmeting.

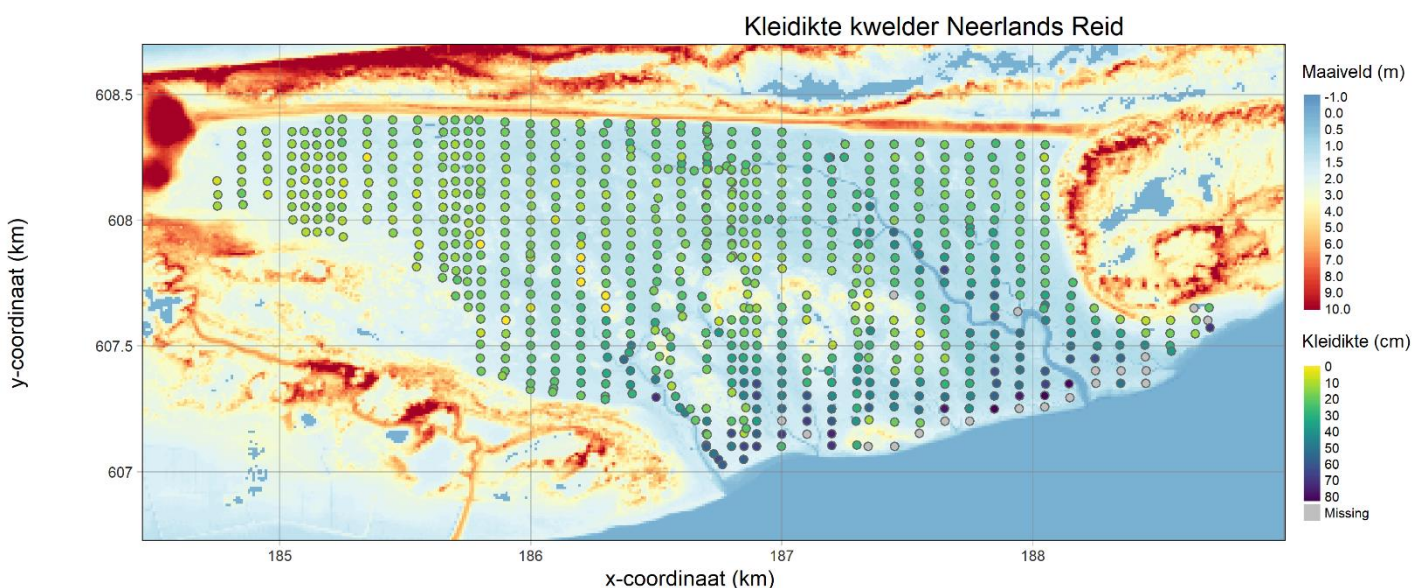
de totale gemiddelde waterdiepte een proxy is voor stormfrequentie. Opslibbing blijkt vooral voor te komen tijdens stormen. Verder vond van Dobben et al. (2022) geen effect van beweiding op de opslibbing. Waarschijnlijk doordat het de beweidde SEB-metingen op het Neerlands Reid vooral op een oeverwal lagen en er weinig beweidde SEB -metingen zijn in Schiermonnikoog.

Bij een aantal PQ's van het oorspronkelijke meetnet wordt de opslibbing ook gemeten met opslibbingsplaten. Deze platen ondervinden mogelijk minder vertrapping en daardoor inklinking omdat er geen palen zijn waar grazers tot aangetrokken worden. Een belangrijk verschil tussen SEB's en platen is dat een opslibbingsplaat niet de diepere inklinking meet onder de opslibbingsplaat, aangezien de plaat meebeweegt met de diepere laag. De opslibbingsplaten meten daardoor vaak een hogere opslibbing. Als de opslibbingsplaten worden vergeleken met de SEB-methode zijn er redelijk grote jaar verschillen (Bijlage 1). Deze verschillen kunnen deels verklaard worden doordat de platen niet op hetzelfde moment gemeten worden. Onder invloed van weersomstandigheden en temperatuur vindt er natuurlijke inklinking en opzwellings plaats (Cahoon et al. 2011, van Dobben et al. 2022). De gemiddelde opslibbing is daarentegen goed vergelijkbaar tussen de opslibbingsplaten en de SEB-methode.

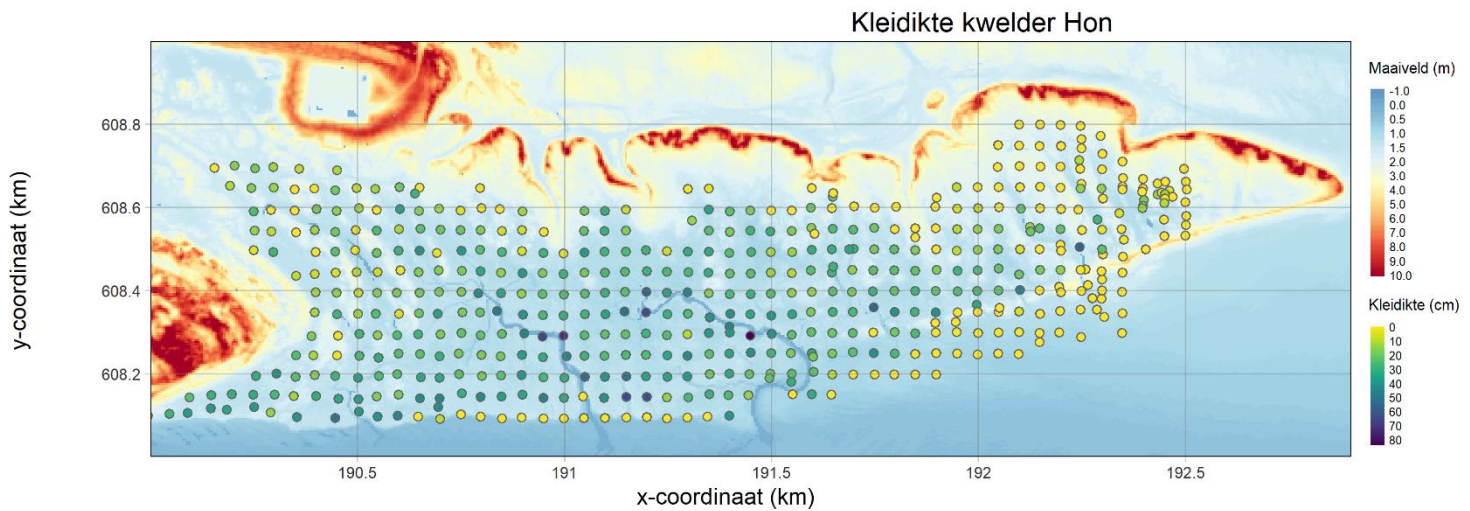
## 4.2 Kleidikte NLR en De Hon

Met de kleidikte kan worden bepaald waar de meeste opslibbing heeft plaatsgevonden tijdens de gehele leeftijd van de kwelder. De kleidikte is gemeten op het NLR in 2016. In een raster is elke 50 tot 100 m de kleidikte gemeten, in totaal 787 punten min of meer evenwijdige raaien verspreid over de kwelder van NLR (Figuur 4-4). Op De Hon is op vergelijkbare wijze de kleidikte gemeten op 5 maart 2020. Daar is in totaal is op 521 punten de kleidikte gemeten met ongeveer elke 50 meter een punt (Figuur 4-5). Op De Hon lagen tijdens de meting een aantal grote plassen met een dikke laag organisch materiaal, waardoor op die plekken de metingen daardoor minder nauwkeurig zijn.

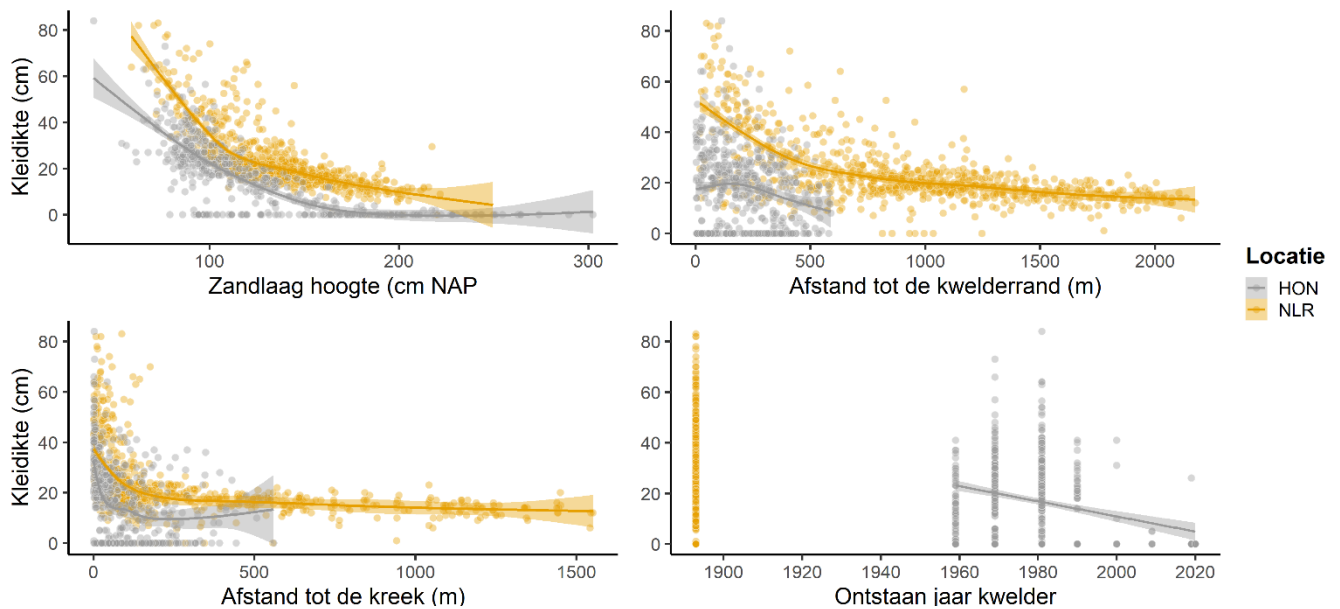
Uit het volledige model bleek dat alle variabelen een significante relatie hadden met kleidikte (Bijlage 2). In de aparte modellen per locatie wordt een groot deel van de variatie verklaard, voor het Neerlands Reid 84% en voor De Hon 79%. De Hon heeft een significant lagere kleidikte dan Neerlands Reid. In beide gebieden neemt de kleidikte significant af met een toenemende hoogte t.o.v. de NAP hoogte van de onderliggende zandlaag en de afstand tot het wad (Figuur 4-6). Variatie in kwelderleeftijd binnen De Hon correleert significant met de kleidikte; de klei is minder dik in de jongere (meest oostelijke) kwelderdelen dan in de oudere (meest westelijke) delen. Het verschil in kleidikte tussen het Neerlands Reid en De Hon is niet heel groot. Dit komt mogelijk door lagere opslibbingssnelheid en/of meer inklinking/erosie door bijvoorbeeld vertrapping door vee van de kwelderbodem op het Neerlands Reid.



**Figuur 4-4** Kleidikte Neerlands Reid voor een raster van 50x100 m, geprojecteerd op AHN3.



**Figuur 4-5** Kleidikte De Hon voor een raster van 50x50 meter, geprojecteerd op AHN3.



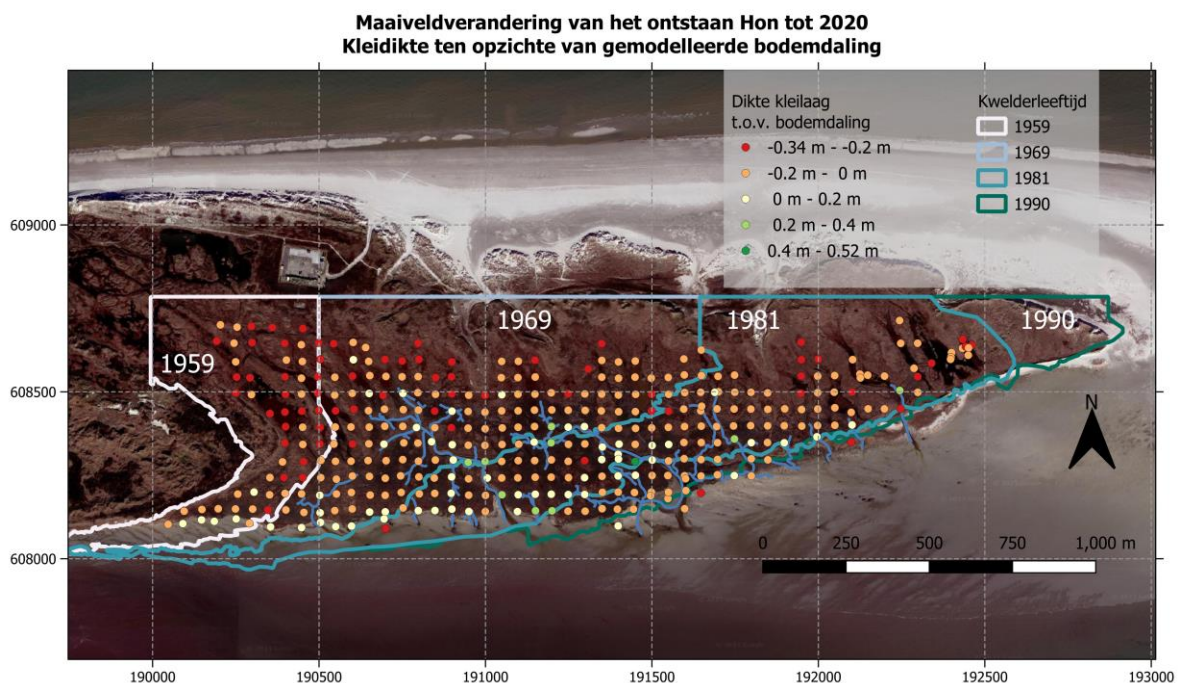
**Figuur 4-6** De kleidikte op De Hon en Neerlands Reid gerelateerd aan de zandlaaghoogte, afstand tot de kwelderrand, afstand tot de dichtstbijzijnde kreek en het ontstaan jaar van de kwelder, de data is uitgesplitst tussen de twee kwelders. Voor de zandlaaghoogte, afstand tot de kwelderrand en afstand tot de kreek is een smoothed functie geplot, terwijl voor ontstaansjaar van de kwelder een lineaire functie is geplot.

## 4.3 Maaiveldverandering Neerlands Reid en De Hon

De maaiveldverandering vanaf de start van de gaswinning tot op heden is lastig te bepalen omdat voor de start van de gaswinning van maar weinig punten de maaiveldhoogte is gemeten. Als alternatief zijn de AHN-metingen gebruikt maar deze bleken niet nauwkeurig genoeg om de maaiveldverandering van de kwelder te bepalen. Dit komt doordat kweldervegetatie vaak niet goed wordt weg gefilterd, wat resulteert in een hoger maaiveld dan in werkelijkheid. Daarnaast hebben AHN's ook een systematische fout wat vergelijking tussen de AHN's niet mogelijk maakt.

Door gebruik te maken van de kleidiktedata en te compenseren voor de (gemodelleerde) totale bodemdaling kan een schatting worden gemaakt van de maaiveldhoogte bij de start van de kwelderontwikkeling. Deze kan vervolgens worden vergeleken met de huidige maaiveldhoogte gemeten in het veld. Helaas blijkt deze methode onbruikbaar om de verandering in maaiveldhoogte voor het Neerlands Reid te bepalen. Dat komt omdat de kwelder vrij oud is, en daardoor is er al een dikke kleilaag afgezet voor de start van de gaswinning in 1986, waardoor de kleidikte groter is dan de bodemdaling. Aangezien het onbekend is wat de kleidikte was in 1986, kan er geen maaivelddaling worden berekend en alleen maaiveldstijging. Uit de opslibingsmetingen van het nieuwe monitoringsnetwerk blijkt dat de opslibing niet hoog genoeg is om te compenseren voor de diepe bodemdaling en de zeespiegelstijging, waardoor het aannemelijk is dat er maaivelddaling heeft plaatsgevonden op het Neerlands Reid.

Doordat De Hon jonger is, is de kleilaag hier dunner dan op het Neerlands Reid. Als de kleilaag dunner is dan de gemodelleerde bodemdaling (NAM bodemdalingsmodel), dan heeft opslibing niet gecompenseerd voor de bodemdaling en is het maaiveld in 2020 lager dan bij de start van de kwelderontwikkeling. Het maaiveld van De Hon is voor een groot deel van de kwelder in 2020 in hoogte gelijk gebleven of gedaald ten opzichte van de maaiveldhoogte bij de start van de kwelderontwikkeling (Figuur 4-7). Alleen aan de kwelderrand en dicht bij de kreken was de sedimentatie hoog genoeg om te compenseren voor de bodemdaling. Gemiddeld ligt De Hon 9 cm lager dan de initiële zandbank waarop de kwelder begon met ontwikkelen. Bij de start van de kwelderontwikkeling was de gemiddelde maaiveldhoogte 1.38 cm NAP, in 2020 1.29 cm NAP. Het gemiddeld hoogwater is 109 cm NAP.



**Figuur 4-7** Verschil in maaiveldhoogte tussen het ontstaansjaar van de kwelder en de maaiveldhoogte gemeten in 2020. De maaiveldhoogte van het ontstaansjaar is berekend door de totale dikte van de kleilaag van de maaiveldhoogte in 2020 af te trekken terwijl de berekende totale bodemdaling erbij is opgeteld. De kwelder is weergegeven per ontstaansjaar.



## 4.4 Hydromorfologie

De inundatiefrequentie, inundatieduur en de hoogte van de waterkolom zijn belangrijke parameters voor de sedimentatie, maar bepalen ook de vegetatiezone van de kwelder. Bij bepaalde PQ's zijn drukmeters geplaatst zodat kan worden bepaald hoe lang een PQ onder water stond. De inundatiefrequentie, duur en hoogte waterkolom varieert per jaar. Tussen september 2020 en september 2021 werd de kwelder vaker overstroomd dan tussen september 2021 en september 2022, maar de stormen waren tussen september 2021 en september 2022 heftiger met een langere inundatieduur en de hoogte van de waterkolom was ook aanzienlijk hoger (Tabel 4-4). De maximale inundatievrije-periode is het kortst in 2021, in dat jaar hebben de PQ's op De Hon de kleinste inundatievrije-periode. De range in de maximale inundatievrije-periode is vrij groot, maar op plekken die minder dan een maand inundatievrij zijn zal het moeilijker zijn voor de vegetatie om zich te vestigen of in stand te houden.

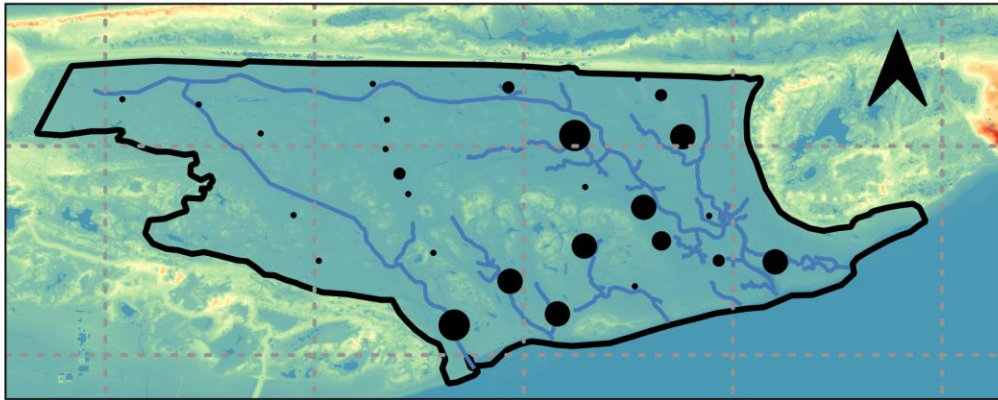
Het Neerlands Reid wordt minder vaak overstroomd dan De Hon, maar de inundatieduur en gemiddelde hoogte van de waterkolom is meestal wel hoger dan bij De Hon. De Hon heeft een lager maaiveld dan het Neerlands Reid, dus dat verklaart dat De Hon een hogere inundatiefrequentie heeft. Het verschil in de inundatieduur kan komen door een verschil in afwatering en de gemiddelde hoogte van de waterkolom is afhankelijk van de inundatiefrequentie. De maximale inundatie vrije periode is op het Neerlands Reid ook hoger dan op De Hon.

Ruimtelijk gezien overstroomden de PQ's dicht bij krekken en de wadrand het vaakst (Figuur 4-9 & Figuur 4-10). Deze PQ's hebben een lagere gemiddelde inundatieduur doordat ze een betere afwatering hebben. Ze overstroomden wel vaker en zullen ook korte hoogwater events meepakken, waardoor de gemiddelde hoogte van de waterkolom lager is dan, die van PQ's verder van de sedimentbron. Deze zullen voornamelijk overstroomden tijdens stormen, maar dan blijft het water wel langer staan en is de gemiddelde hoogte van de waterkolom ook hoog. De maximale inundatie vrije periode is het kortst op het Neerlands Reid rond de Oerdsloot. In 2020 stonden PQ's daar maximaal tussen de 25 – 50 dagen droog. Voor De Hon hadden de meeste PQ's dezelfde maximale inundatie vrije periode van 25 – 50 dagen. Deze periode kan lang genoeg zijn voor het ontkiemen en vestigen van planten, maar dan moet het wel droog zijn in de juiste periode. Daarnaast is het afhankelijk van het jaar, in 2021 hadden de meeste PQ's op De Hon een maximale inundatie vrije periode tussen de 0 – 25 dagen.

**Tabel 4-3** Inundatiefrequentie, inundatieduur, hoogte waterkolom en de maximale inundatie vrije periode voor elk gebied en jaar. Het jaar begint op 1 september in het voorgaande jaar. Aangezien de drukmeters eind 2020/begin 2021 zijn geplaatst zijn er geen data van de inundatiefrequentie, duur en hoogte voor 2020. De inundatie vrije periode is het maximaal aantal dagen dat de PQ niet geïnundeerd was tijdens het groeiseizoen 1 april – 31 augustus.

	Aantal PQ's	Inundatiefrequentie		Inundatieduur (dagen)		Hoogte waterkolom (m)		Max. inundatievrije-periode (dagen)	
		Gem.	Range	Gem.	Range	Gem.	Range	Gem.	Range
NLR									
2020	29	-	-	-	-	-	-	89±7.9	16 – 152
2021	29	17±3.0	1 – 64	13±4.4	0.04 – 124	0.27±0.02	0.12 – 0.71	87±8.8	3 – 152
2022	27	11±2.7	1 – 54	67±12.4	0.08 – 194	0.74±0.10	0.18 – 1.68	106±10	27 – 152
HON									
2020	19	-	-	-	-	-	-	49±8.3	12 – 152
2021	18	27±5.8	4 – 110	11±9.9	0.4 – 34	0.32±0.03	0.17 – 0.63	28±9.0	3 – 147
2022	16	24±4.5	1 – 52	29±9.6	0.5 – 127	0.49±0.07	0.21 – 1.26	48±10	26 – 152

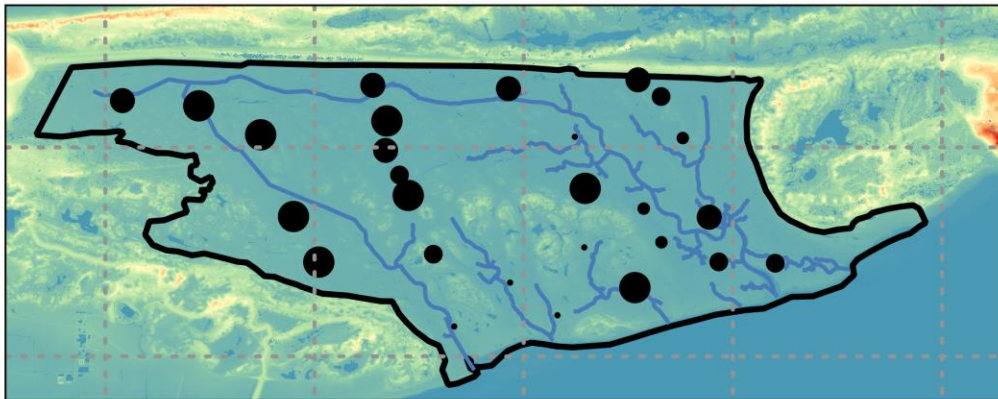
### Inundatie frequentie 2022



Inundatie freq.

- 1 - 4
- 4 - 8
- 8 - 16
- 16 - 32
- 32 - 64

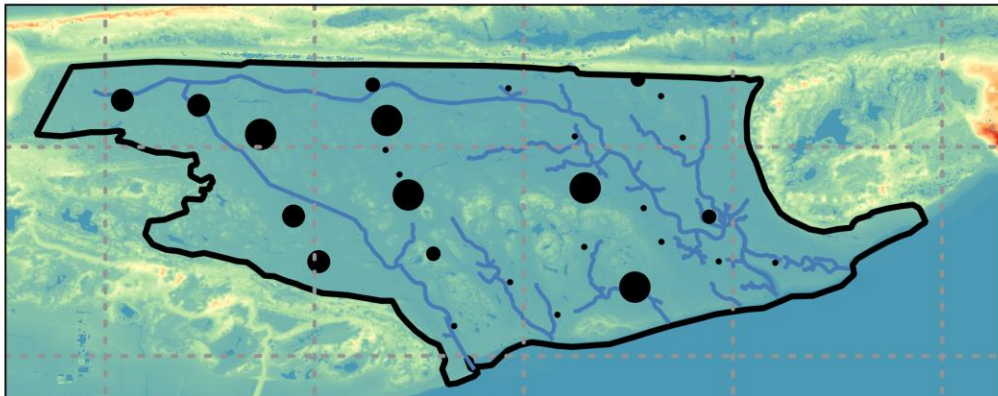
### Gemiddelde inundatie duur 2022



Gem. inundatie duur

- 0 - 1 dag
- 1 - 4 dagen
- 4 - 8 dagen
- 8 - 20 dagen
- 20 - 124 dagen

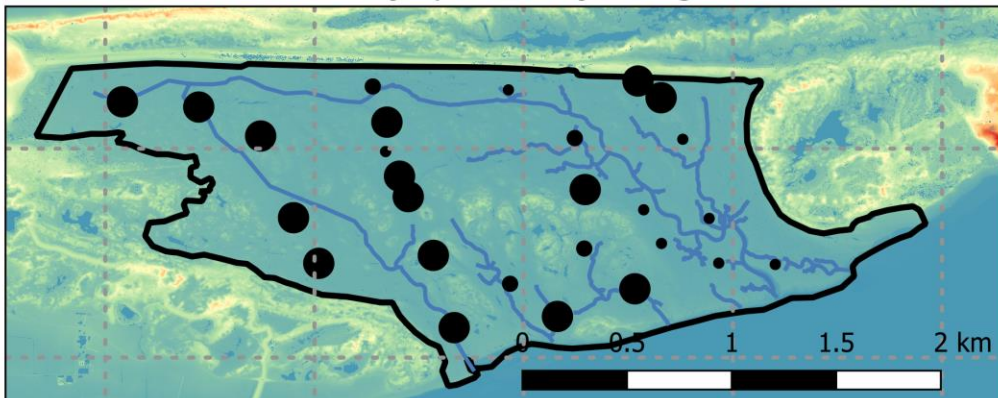
### Gemiddelde inundatie hoogte 2022



Gem. hoogte waterkolor tijdens overstroming

- 0.2 - 0.4 m
- 0.4 - 0.4 m
- 0.4 - 0.6 m
- 0.6 - 1.3 m

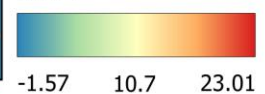
### Maximale inundatievrije-periode tijdens groeiseizoen 2022



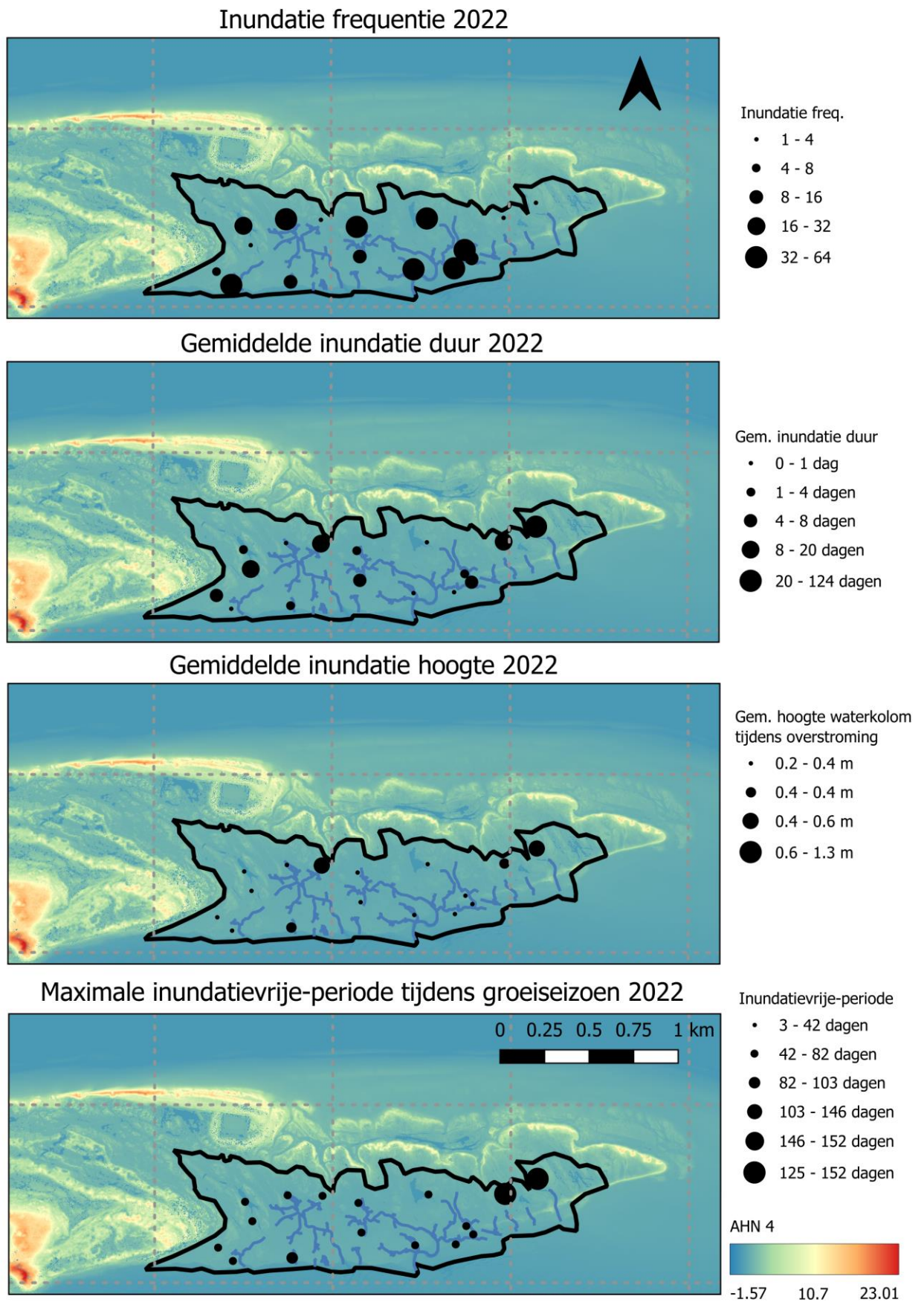
Inundatievrije-periode

- 3 - 42 dagen
- 42 - 82 dagen
- 82 - 103 dagen
- 103 - 146 dagen
- 146 - 152 dagen
- 125 - 152 dagen

AHN 4



**Figuur 4-8** Inundatiefrequentie, duur, hoogte en de maximale inundatievrije-periode tijdens het groeiseizoen voor elk PQ met een drukmeter op het Neerlands Reid in 2022. De blauwe lijnen zijn de kreek en de achtergrond is de AHN44



**Figuur 4-9** Inundatiefrequentie, duur, hoogte en de maximale inundatievrije-periode tijdens het groeiseizoen voor elk PQ met een drukmeter op De Hon in 2022. De blauwe lijnen zijn de krekken en de achtergrond is de AHN4.

## 4.5 Abiotische factoren

De abiotische factoren in de bodem worden onder andere bepaald door de maaiveldhoogte, de inundatiefrequentie, en -duur en de inundatievrije-periode. Deze abiotische factoren bepalen deels of vegetatie zich kan vestigen en/of de vegetatie zich kan handhaven. Resultaten van de lineaire modellen voor abiotische factoren voor Neerlands Reid en De Hon gezamenlijk zijn weergegeven in Tabel 4-5, relaties tussen factoren voor de afzonderlijke gebieden zijn in grafiekvorm weergegeven in bijlage 3.

Tussen Neerlands Reid en De Hon verschilde alleen de redoxpotentiaal significant, alle andere abiotische factoren die gemeten zijn in deze studie waren niet significant verschillend tussen de twee locaties (Factor Locatie in Tabel 4-5). Gemiddeld had het Neerlands Reid een lagere redoxpotentiaal dan De Hon, maar dit was afhankelijk van de diepte. Op het Neerlands Reid was de redoxpotentiaal het hoogst in de toplaag. Tot 15 cm diepte nam de redoxpotentiaal af en dieper stabiliseert het. Bij De Hon had de redoxpotentiaal een kleine toename van 0 tot 15 cm. Tussen de 15 en 30 cm diepte nam de redoxpotentiaal af, maar bleef positief. Aangezien de worteldichtheid het hoogst is in de bovenste 15 cm is vervolgens de gemiddelde redoxpotentiaal van 0 tot 15 cm diepte per PQ berekend en meegenomen in de analyses. De gemiddelde redoxpotentiaal van 0 tot 15 cm diepte bij Neerlands Reid was significant gecorreleerd met de elektrische conductiviteit (EC); op plekken met hogere EC-waardes (en dus zouter) was de redoxpotentiaal lager. Daarnaast was de redoxpotentiaal lager op plekken met veel bodemdaling, maar deze relatie was niet heel sterk. Het statistische model verklaarde ongeveer 26% van de variatie van de redoxpotentiaal. Dit duidt erop dat er andere factoren zijn, die niet zijn meegenomen in dit model, die een belangrijk effect op de redoxpotentiaal hebben.

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. De bulkdichtheid was negatief gecorreleerd met de elektrische conductiviteit; bij toenemende bulkdichtheid was de elektrische conductiviteit lager.

**Tabel 4-4** Lineaire modellen voor redoxpotentiaal, EC, vochtgehalte, organische stofgehalte, bulkdichtheid, maximale inundatievrije dagen en maaiveldhoogte. Getallen geven de t-waarden weer, waarbij de significantie is uitgedrukt in p-waardes en aangegeven met asterisk. De hoeveelheid variatie die een model verklaart wordt uitgedrukt met  $R^2$ , waarbij deze is aangepast voor het aantal factoren in het model (Adj.  $R^2$ ).

Factor	Redox-potentiaal	EC	Vochtgehalte	Organische stofgehalte	Bulk-dichtheid	Max. Ind. vrije-periode	Maaiveld hoogte
Intercept	2.49*	4.46***	7.42***	-0.21	4.08***	2.56*	13.98***
Maaiveldhoogte	-0.91	-6.95***	--2.68**	1.00	-0.85	1.13	
Afstand sedimentbron	0.50	-0.04	-2.47*	1.90	-3.30**	1.62	3.54***
Afstand wad via kreek	-1.48	-2.16*	2.06*	-0.45	-5.91***	-2.62*	-0.33
Max. Inundatievrije-periode	-0.96	-0.23	-0.43	-1.05	-0.61		
Bodemdaling	-2.26*	0.79	-1.05	0.68	-1.54	-3.15**	-4.97***
Organische stof	-0.57	-0.53	1.74				
Bulkdichtheid	-1.62	-2.80**	-10.31***	-0.33			
EC	-3.31**		0.62	-0.53			
Vochtgehalte	-0.39	0.62		1.74			
Locatie	-2.66**	-0.03	-0.79	-0.51	1.07	-0.38	-1.78
Adj. $R^2$	0.26	0.76	0.91	0.47	0.51	0.44	0.51
F-statistics	3.41**	24.96***	73.86***	7.70***	12.68***	11.48***	18.89***
AIC	754	320	412	400	915	206	-65
BIC	781	345	435	425	933	221	-52
DF residual	58	59	59	59	62	63	64

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

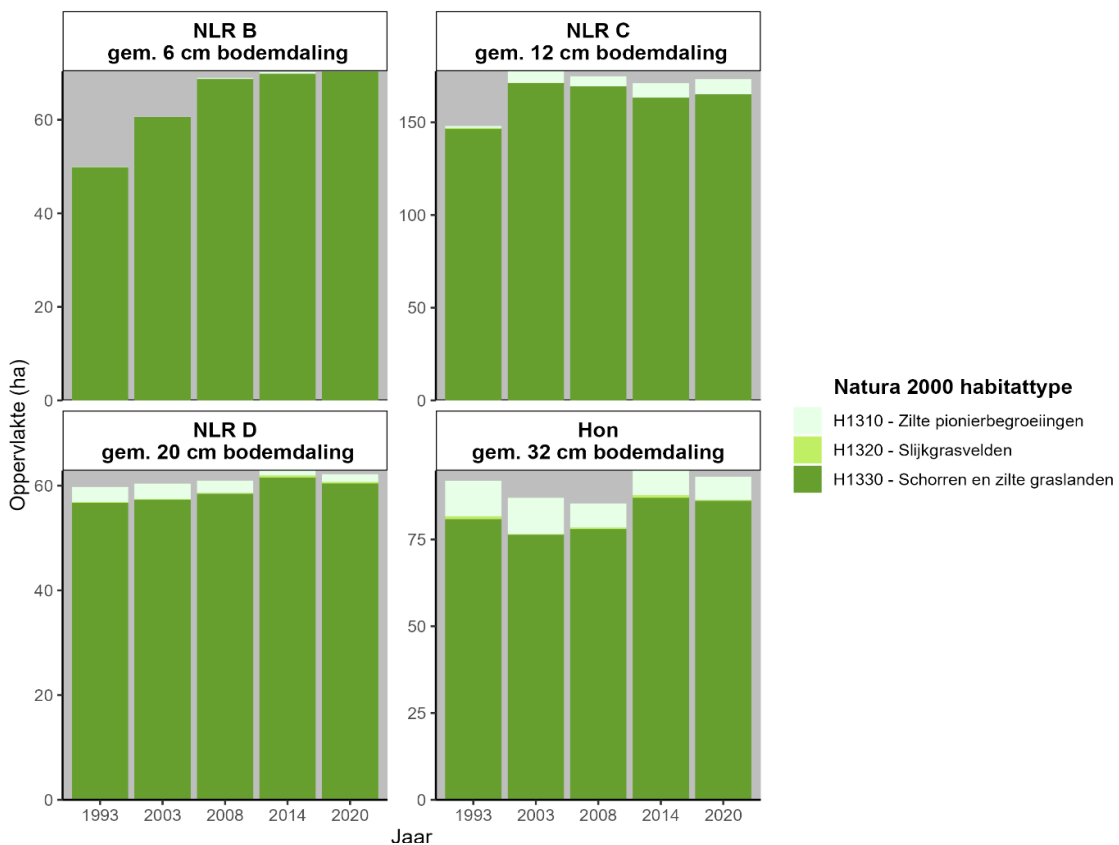
Binnen beide deelgebieden was het vochtgehalte sterk gecorreleerd met de bulkdichtheid, bij hogere bulkdichtheid was het vochtgehalte lager. Daarbij was het vochtgehalte hoger op plekken verder weg van de sedimentbron, en in De Hon met een lagere maaiveldhoogte. Het organische stofgehalte was niet significant 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. Het Neerlands Reid had meestal een hogere bulkdichtheid bij vergelijkbare afstand van het wad vergeleken met De Hon (bijlage 3), maar dit verschil was niet significant.

De maximale inundatievrije-periode nam nauwelijks toe met toenemende afstand tot het wad in Neerlands Reid en nam licht af op De Hon. De maximale inundatievrije-periode 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 wordt meestal hoger in de richting van de duinen. Het maaiveld op Neerlands Reid was lager op plekken met meer bodemdaling.

## 4.6 Vegetatie

### 4.6.1 Natura 2000

De kwelder vegetatietypes behoren tot drie Natura 2000 habitattypen: H1310A (zilte pionier begroeiingen, zeekraal vegetatie), H1320 (Slijkgrasvelden, klein slijkgras of Engels slijkgras) en H1330A (Schorren en zilte graslanden). Binnen Natura 2000 mogen deze habitat types niet verdwijnen of veel areaal verliezen. Alle 3 habitattypen komen voor op Ameland, waar het grootste deel van de kwelder hoort tot H1330A, een kleiner deel bij H1310 en H1320 heeft het laagste aandeel (Tabel 4-5). De oppervlaktes van de habitattypen verschillen iets per jaar maar zijn redelijk stabiel (Figuur 4-10), alleen in gebied B is er een toename van H1330A, dit komt omdat gebieden van zoete graslanden zijn veranderd in brakke kwelder. Habitatype H1310 varieert ook in oppervlakte doordat zeekraal een eenjarige soort is en zich ieder jaar opnieuw moet vestigen. Zaadaanbod, geschikt vestigingshabitat en gunstige omgevingsfactoren tijdens de kiemfase zorgen voor een natuurlijke jaar-op-jaar variatie in bedekking (van Regteren et al. 2019, 2020).



**Figuur 4-10** Oppervlakte Natura 2000 habitattypen per jaar voor de verschillende gebieden.

**Tabel 4-5** Kwaliteitseisen habitattypen vergeleken met toestand Neerlands Reid en De Hon op basis van de RWS-vegetatiekaart uit 2020.

Kwaliteitseis	Wordt eraan voldaan?
<b>H1310_A Zilte pionierbegroeiingen (Zeekraal)</b>	
Voorkomen constante soorten vaatplanten die indicatief zijn voor goede abiotische toestand en goede biotische structuur.	Ja.
Bedekking van meerjarige soorten < 10 %.	Ja, per definitie volgens onderliggende vegetatietypologie.
Op landschapsschaal in samenhang voorkomend met kwelders/schorren (H1330) en met open wad (H1140).	Ja. Op Neerlands Reid bevindt het zich deels aan de wadrand, deels in de slenken en deels binnen H1330_A als secundaire pioniervegetatie. Het grootste deel bevindt zich op De Hon tussen H1330 en H1140 in een vloeiende overgang naar het wad.
Optimale functionele omvang: vanaf honderden m <sup>2</sup> .	164.000 m <sup>2</sup> , waarvan 98.000 m <sup>2</sup> op het Neerlands Reid en 67.000 m <sup>2</sup> op De Hon.
<b>H1320 Slijkgrasvelden</b>	
Voorkomen constante soorten vaatplanten die indicatief zijn voor goede abiotische toestand en goede biotische structuur.	Nee. De enige typische soort (Klein slijkgras) staat als ernstig bedreigd op de Rode Lijst en is mogelijk zelfs al verdwenen
Op landschapsschaal bij voorkeur voorkomend in samenhang met enerzijds Zilte pionierbegroeiingen (Zeekraal) (H1310A) en Schorren en zilte graslanden (buitendijks) (H1330) en anderzijds met Slik- en zandplaten (getijdengebied) (H1140A).	Ja, maar dan met Engels slijkgras. Het bevindt zich op De Hon en op Neerlands Reid tussen H1330_A en H1140_A.
Optimale functionele omvang: vanaf honderden m <sup>2</sup> .	5600 m <sup>2</sup> , waarvan 2600 m <sup>2</sup> op De Hon en 3000 m <sup>2</sup> op Neerlands Reid (met Engels slijkgras)
<b>H1330_A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)</b>	
Voorkomen constante soorten vaatplanten die indicatief zijn voor goede abiotische toestand en goede biotische structuur.	Ja.
Op landschapsschaal een complete zonering van lage kwelder (aansluitend op habitattypen H1310 en H1320) hoge kwelder en kwelderzoom (zo mogelijk aansluitend op duinhabitattypen). Mogelijkheden voor deze zonering doen zich vooral voor in landschappen van tenminste honderden hectares - op kleinere oppervlakten hangen de mogelijkheden sterk af van de aard van het gebied.	Ja.
Met name binnen grote kweldergebieden: geen oververtegenwoordiging (> 40 %) of ondervertegenwoordiging (< 5 %) van een bepaalde kwelderzone of van een climaxvegetatie met Gewone zoutmelde, Zeekweek (oude naam: Strandkweek) of Riet.	Nee. Op het Neerlands Reid heeft de volgende bedekking: hoge kwelder = 53%, lage kwelder = 22%, brakke kwelder = 22% en hoge kwelder met zeekweek = 3%. Op De Hon is de hoge kwelder met zeekweek = 58%, lage kwelder = 32%, hoge kwelder = 5% en brakke kwelder = 5%.
Structuurvariatie onder invloed van begrazing (met name binnen grote kweldergebieden); van nature is er al een bepaalde invloed door de graasactiviteiten van de haas (constante typische soort) en van ganzen; beweiding met vee kan nodig zijn om de vegetatiesuccessie verder of langduriger te vertragen.	Ja. Natuurlijke begrazing op De Hon lijkt beperkt. Neerlands Reid wordt beweid door vee, waardoor de kwelder ook aantrekkelijk is voor natuurlijke begrazing.
Optimale functionele omvang: vanaf tientallen hectares (subtype A).	381 ha, waarvan 86 ha op De Hon en 295 ha op Neerlands Reid.

---

## 4.6.2 Vegetatiekaarten

Met de vegetatiekaarten kan de vegetatieverandering vanaf 1993 worden bepaald. Aangezien er in 1993 nog niet veel bodemdaling had plaatsgevonden, heeft de bodemdaling nog geen effect gehad op de vegetatiesamenstelling. Alle vijf vegetatiekaarten die tussen 1993 en 2020 voor Neerlands Reid en De Hon zijn verschenen staan in bijlage 4. Uit de analyse blijkt dat op Neerlands Reid de meeste regressie plaatsvond aan de oostzijde rond de Oerdsloot (Figuur 4-11), daar zijn grote delen van de kwelder veranderd van hoge kwelder naar lage kwelder. Hier is de bodemdaling ook hoger dan richting het westen. Verder is de vegetatie ten westen van de Oerdsloot (in gebied C) zeer kort (van Puijenbroek persoonlijke observaties), wat een indicatie is van een hoge begrazingsdruk, waarschijnlijk door een combinatie van schapen en ganzen begrazing. Op de Hon was er vooral sprake van een toename van de climax stadium zeekweek, regressie van vegetatie heeft weinig plaatsgevonden, ondanks de grotere bodemdaling dan op Neerlands Reid.

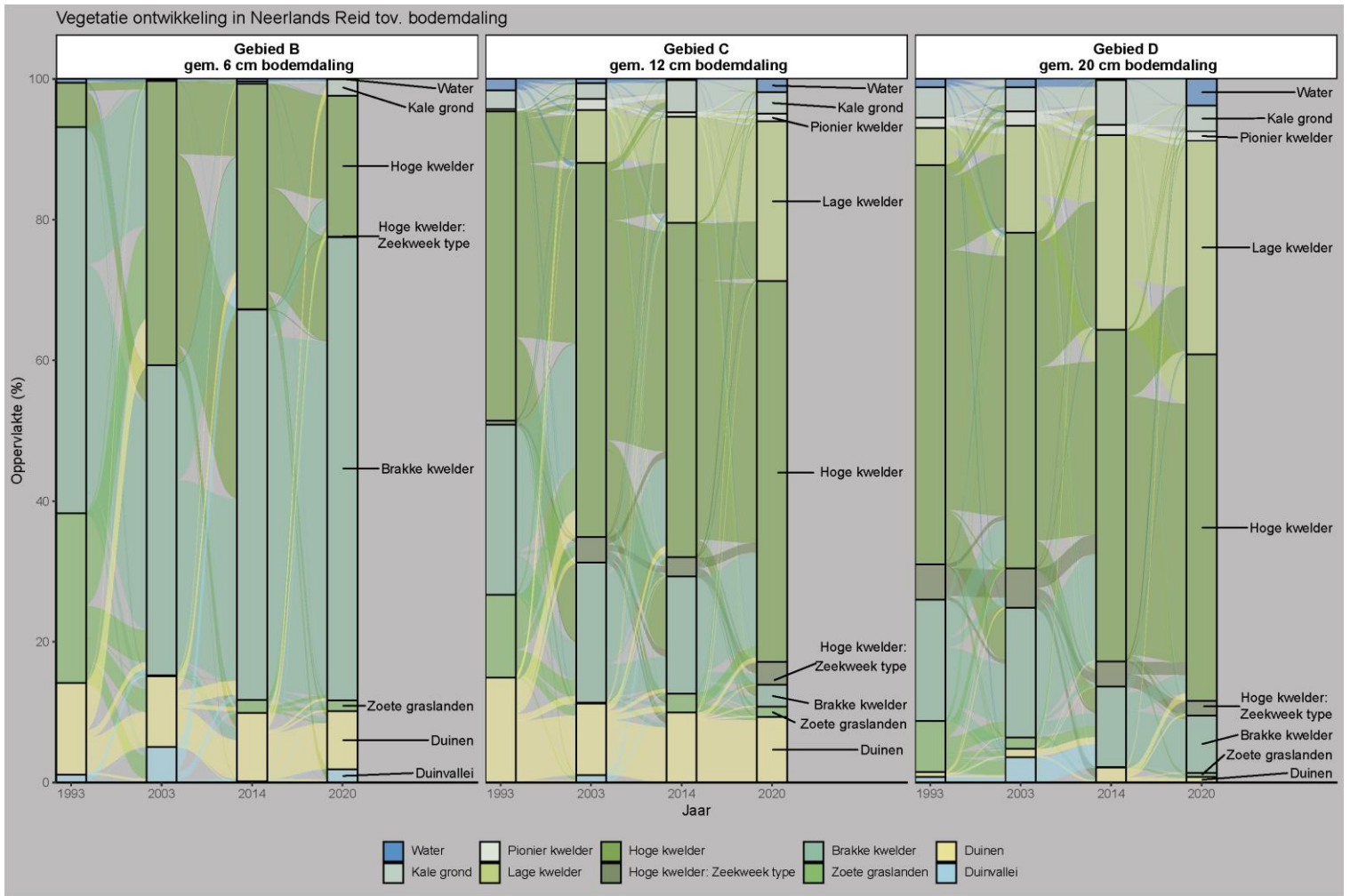
In de volgende paragrafen worden de belangrijkste vegetatieontwikkelingen tussen 1993 en 2020 besproken voor beide locaties en per beweidingsgebied (op het Neerlands Reid).

### **Neerlands Reid**

De vegetatiekaarten van het Neerlands Reid laten duidelijk een verschil zien in vegetatieontwikkeling tussen 1993 en 2020 en tussen de verschillende begrazingsgebieden (Figuur 4-12). In het westelijke gebied B met gemiddeld 6 cm bodemdaling en een begrazingsdruk van 0.28 GVE/ha/j was er gedurende de hele periode vooral hoge en brakke kweldervegetatie aanwezig. Een deel van de hoge kweldervegetatie aanwezig in 1993 veranderende in brakke kweldervegetatie in 2003 en hetzelfde gebeurde in 2014. De zoete graslanden zijn veranderd in hoge kwelder, brakke kwelder of duinvegetatie in 2003. Het gebied is verder relatief stabiel gebleven. De hoge kwelder bestaat met name uit het fioringras/aardbeiklaver vegetatietype wat veel voorkomt als een gebied begraasd wordt met vee (Figuur 4-13). De brakke kwelders zijn vooral brakke graslanden. Tussen 1993 en 2020 is 57% van de vegetatie stabiel gebleven, bij 39% van de vegetatie heeft er regressie plaatsgevonden en bij 4% van het gebied was er sprake van successie.

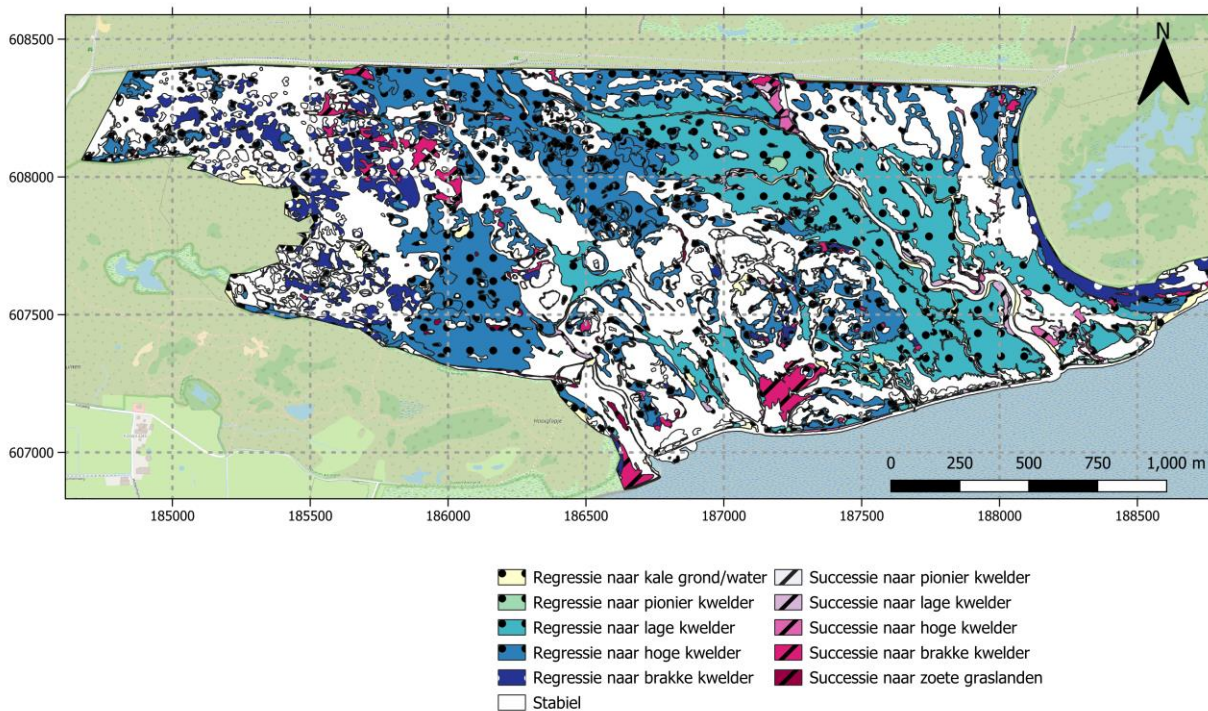
In gebied C ten westen van de Oerdsloot met gemiddeld 12 cm bodemdaling en een begrazingsdruk van 0.21 GVE/ha/j is het aandeel lage kwelder toegenomen over tijd. In 1993 was er nauwelijks lage kwelder aanwezig, terwijl in 2020 dit is toegenomen tot 22%. Deze toename is vooral door een verandering van hoge kwelder in lage kwelder. Tegelijkertijd nam het aandeel brakke kwelder af ten gunste van hoge kwelder. Daarnaast zijn er meer kale stukken in de lage kwelder, in 2020 ongeveer 10 hectare kaal of water. Dominant op de lage kwelder is het gewoon kweldergras type en op de hoge kwelder domineren drie: zilte rus type, rood zwenkgras type en fioringras/aardbeiklaver type. Tussen 1993 en 2020 is 41% van de vegetatie stabiel gebleven, bij 56% regressie en bij 3% successie.

In het oostelijke gebied D met gemiddeld 20 cm bodemdaling en een begrazingsdruk van 0.21 GVE/ha/j zijn de verandering in vegetatie vergelijkbaar met gebied C. Het aandeel lage kwelder is hier ook toegenomen, van 5% naar 25%. Ook in dit gebied is brakke kweldervegetatie veranderd naar hoge kwelder vegetatie, en hoge kwelder naar lage kwelder. Op de lage kwelder is het vegetatietype met zoutmelde dominant en op de hoge kwelder is het een combinatie van de typen zilte rus en zee alsem/rood zwenkgras. Het deel van de vegetatie dat stabiel is gebleven is 46%, bij 49% regressie en bij 5% successie.



**Figuur 4-12** De vegetatieontwikkeling in Neerlands Reid in drie beweidingsgebieden voor vier verschillende jaren: 1993, 2003, 2014, 2020. De vegetatietypes zijn gebaseerd op de TMAP-typologie.

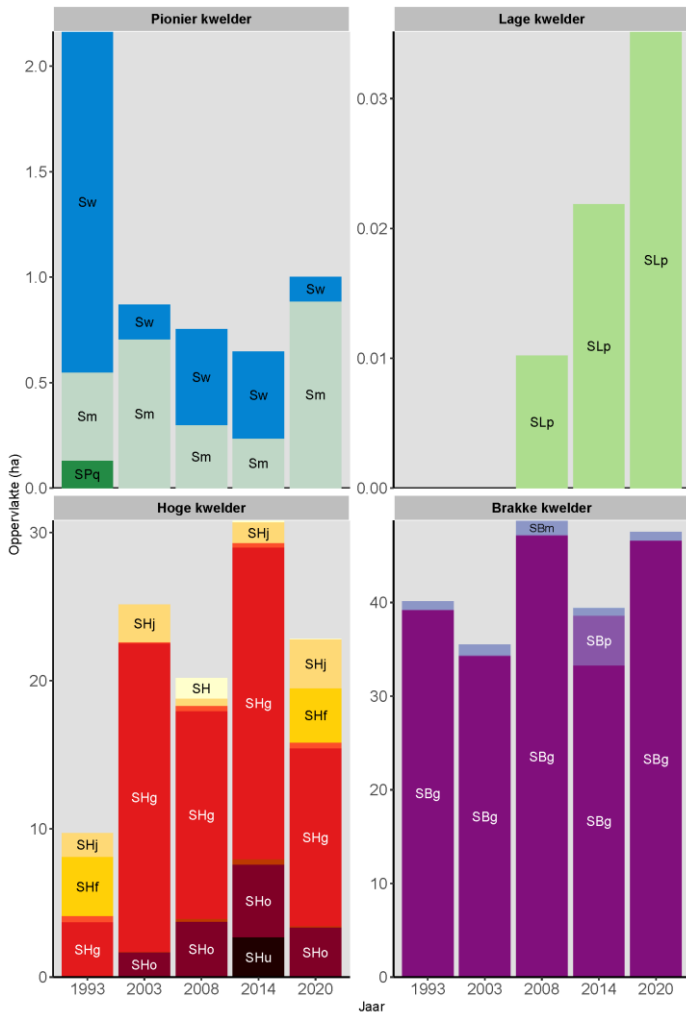
### Verandering vegetatie Neerlands Reid 1993 - 2020



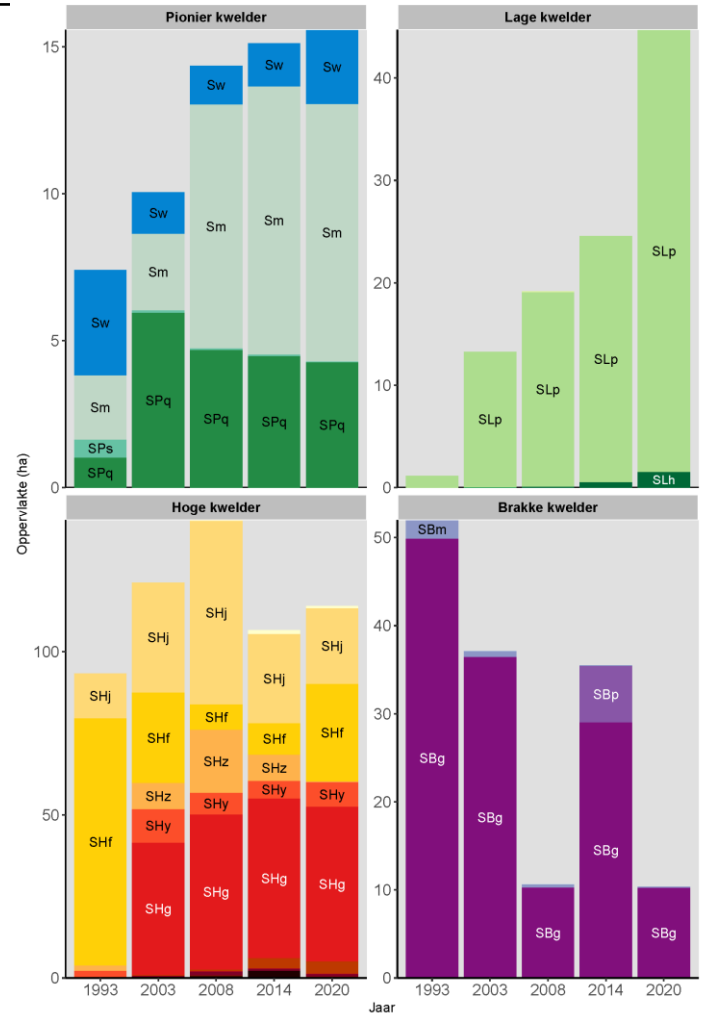
**Figuur 4-11** Gegeneerde verschilkaart (successie-regressie) van de VEGWAD-vegetatiekaart van het Neerlands Reid in 1993 en 2020.



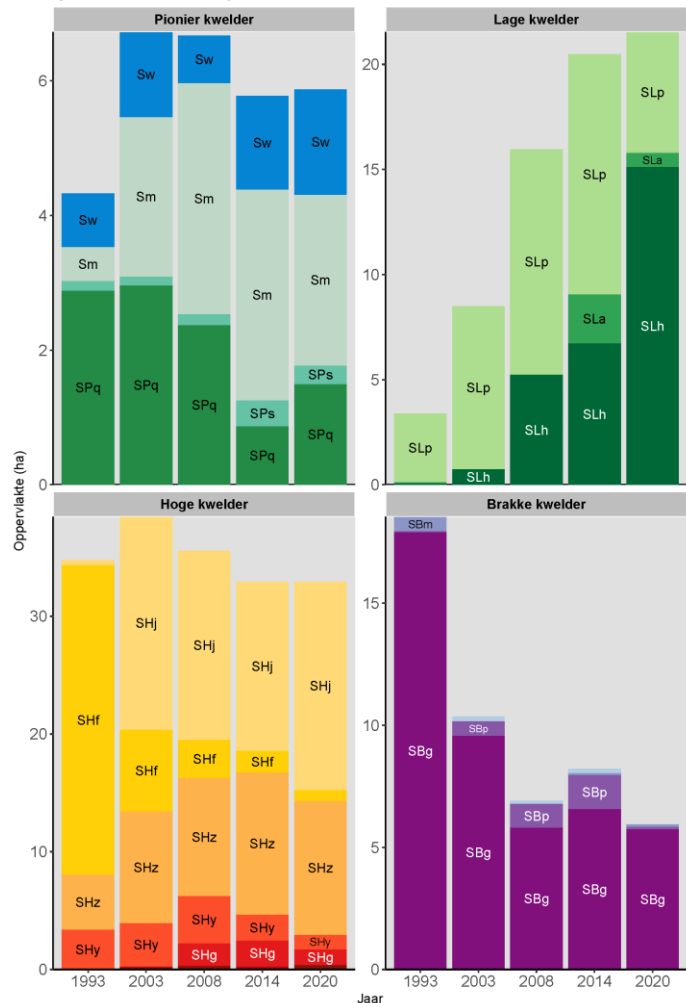
Vegetatieontwikkeling NLR: Gebied B  
gem. 6 cm bodemdaling



Vegetatieontwikkeling NLR: Gebied C  
gem. 12 cm bodemdaling



Vegetatieontwikkeling NLR: Gebied D  
gem. 20 cm bodemdaling

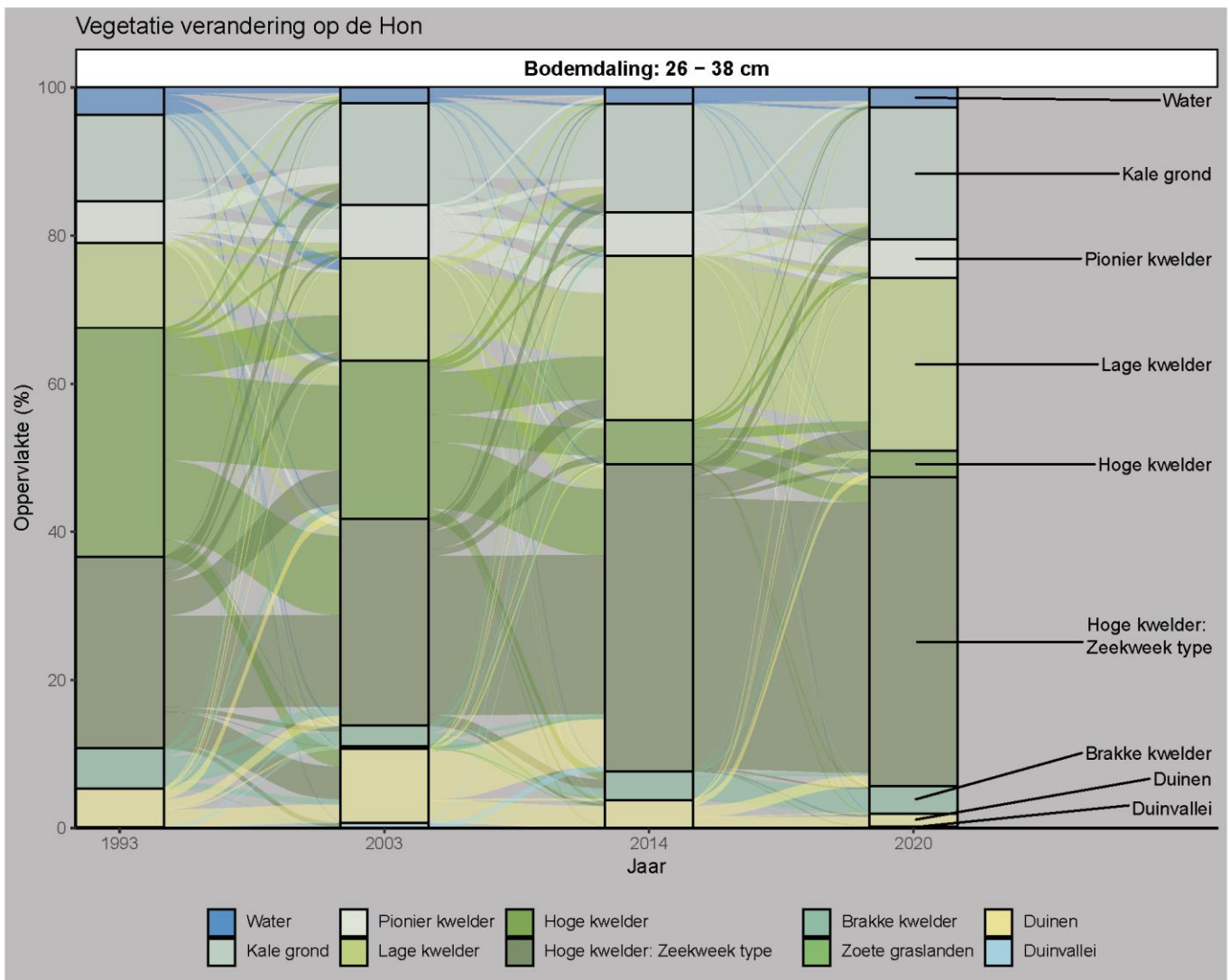


**Figuur 4-13** Oppervlaktes van TMAP vegetatietypes per jaar en vegetatiezone voor de drie beweidingsgebieden in het Neerlands Reid. Schaal y-as verschilt per figuur.

- Sw: Water
- Sm: Kale grond
- Pionier kwelder**
- SPs: Engels slijkgras type
- SPq: Zeekraal type
- Lage kwelder**
- SLp: Kweldergras type
- SLi: Lamsoor / kweldergras type
- SLa: Zeeaster / kweldergras type
- SLh: Zoutmelde type
- Hoge kwelder**
- SHi: Lamsoor / zilte rus type
- SHj: Zilte rus type
- SHf: Roodzwenkgras type
- SHz: Zeealsem / roodzwenkgras type
- SHh: Zoutmelde / zeealsem type
- SHy: Zeekweek type
- SHg: Fioringras / aarbeiklaver type
- SHc: Hertzhoornweegbree / strandduizendguldenkruid type
- SHx: Spiesmilde / strandmelde type
- SHo: Kattendoorn / zilte zegge type
- SHm: Zeerus type
- SHr: Kweek type
- SHu: Ruderale kwelder
- Brakke kwelder**
- SBb: Heen / Ruwe bies type
- SBm: Zeerus / Zilt torkruid type
- SBp: Riet type
- SBg: natte brakke graslanden type

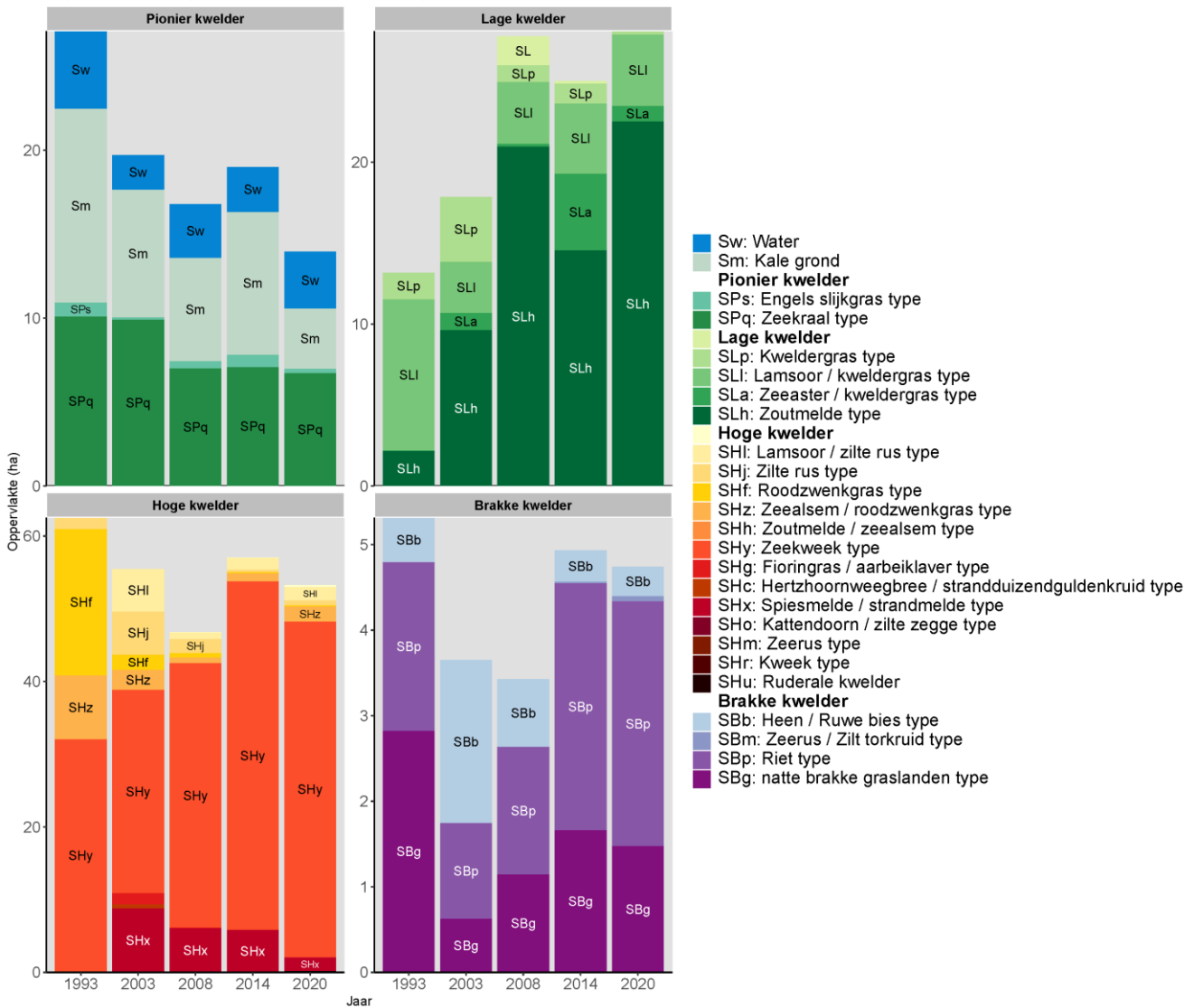
## De Hon

Aangezien er op De Hon niet veel variatie is in bodemdaling is het niet verder opgesplitst in deelgebieden. Op De Hon is tussen 1993 – 2020 de hoge kwelder voor een groot deel veranderd in een climaxvegetatie gedomineerd door zeekweek, maar er is ook een deel in een lage kwelder vegetatie veranderd (Figuur 4-14). Het aandeel lage kwelder is daardoor toegenomen, waarvan het grootste deel van de lage kwelder is begroeid met de climax soort zoutmelde. In de brakke kwelder is het vegetatietype met riet aan het toenemen (Figuur 4-15). De toename van kale grond in figuur 4-14 komt vooral door kliferosie langs de kwelderrand, maar er zijn ook kleine kale plekken op de kwelder ontstaan (Figuur 4-16). Op De Hon is 62% van de vegetatie stabiel gebleven tussen 1993 en 2020, bij 23% van de vegetatie heeft er regressie plaatsgevonden en bij 15% successie. Het eroderen van de kwelderrand is hierbij niet meegenomen.



**Figuur 4-14** De vegetatieontwikkeling in De Hon voor vier verschillende jaren, 1993, 2003, 2014 en 2020. De vegetatietypes zijn gebaseerd op de TMAP-typologie.

Vegetatieontwikkeling de Hon: 26 – 38 cm bodemdaling



**Figuur 4-15** Oppervlaktes van TMAP vegetatietypes per jaar en vegetatiezone voor De Hon. De schaal van de y-as verschilt tussen figuren.

### Vegetatieverandering relateert aan ruimtelijke ligging

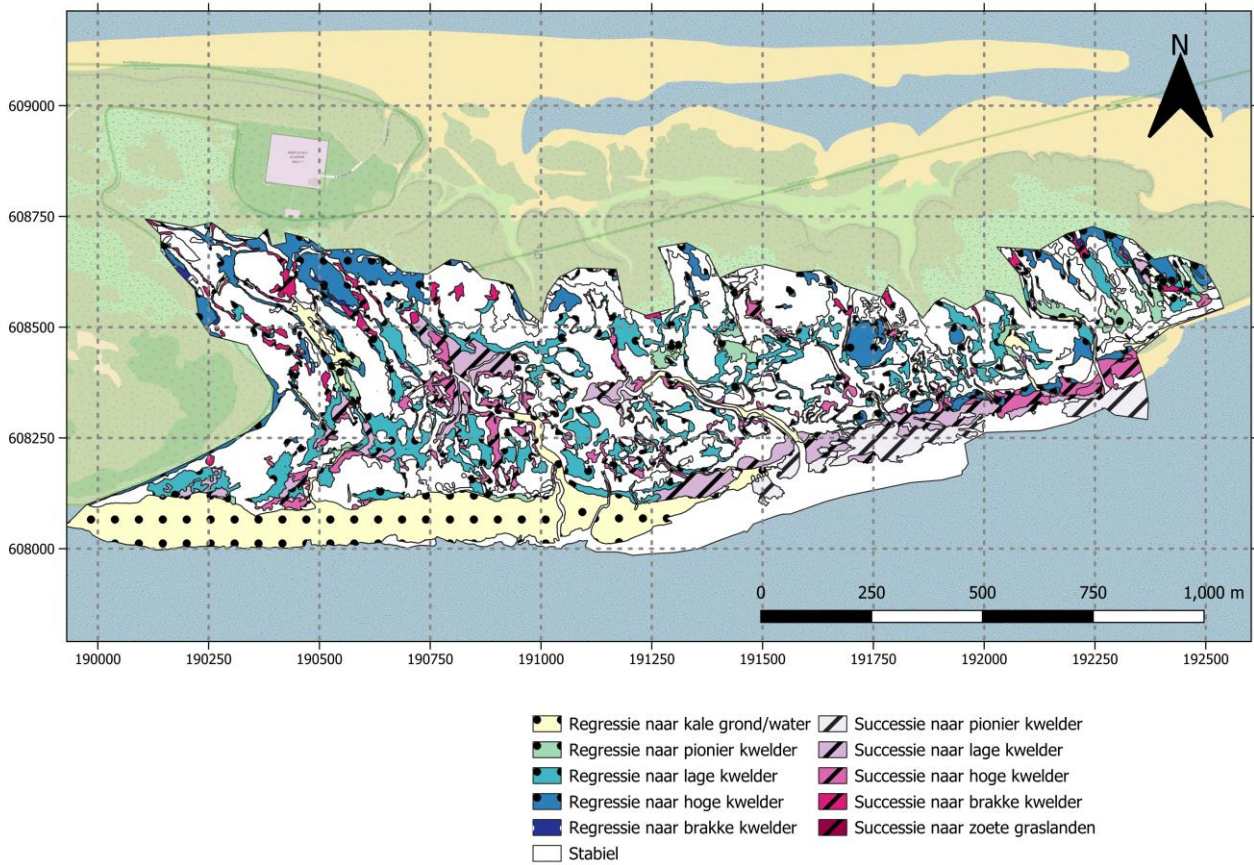
De vegetatieverandering is gerelateerd aan de ruimtelijke ligging op de kwelder. Om de ruimtelijke ligging te relateren aan de vegetatieverandering zijn de locatie en maaiveldhoogtes van de kleidikte data gebruikt. Aangezien de punten waar kleidikte is gemeten dicht bij elkaar liggen, zijn de punten ruimtelijk gecorreleerd. Om daarvoor te corrigeren is het Neerlands Reid en De Hon opgedeeld in blokken doormiddel van een grid. De afmetingen van de blokken waren voor het Neerlands Reid 200x200 m en voor De Hon 150x150 m. Voor De Hon zijn de blokken kleiner, omdat De Hon heterogener is en de afstand tussen de kleidikte metingen kleiner is. Binnen elk blok zijn de maaiveldhoogtes, afstand tot de sedimentbron en wad en de vegetatieverandering gemiddeld. Als de gemiddelde vegetatieverandering -1 was hadden alle punten in een blok regressie, bij 0 waren alle punten stabiel en bij 1 was er bij alle punten successie.

De belangrijkste factor die de vegetatieverandering op het Neerlands Reid verklaarde was het beweidingsgebied (Bijlage 5). In gebied C kwam de meeste regressie voor en in gebied B het minst (Figuur 4-18). Daarnaast had afstand tot de sedimentbron een kleine maar statistisch significante relatie met de gemiddelde vegetatieontwikkeling, wat betekent dat er iets meer regressie plaatsvondt verder van kreek of wadrand. Er was een significante interactie tussen maaiveldhoogte en het gebied, in gebieden B en C heeft bij een lager maaiveld gemiddeld meer regressie plaats gevonden (Figuur 4-17).

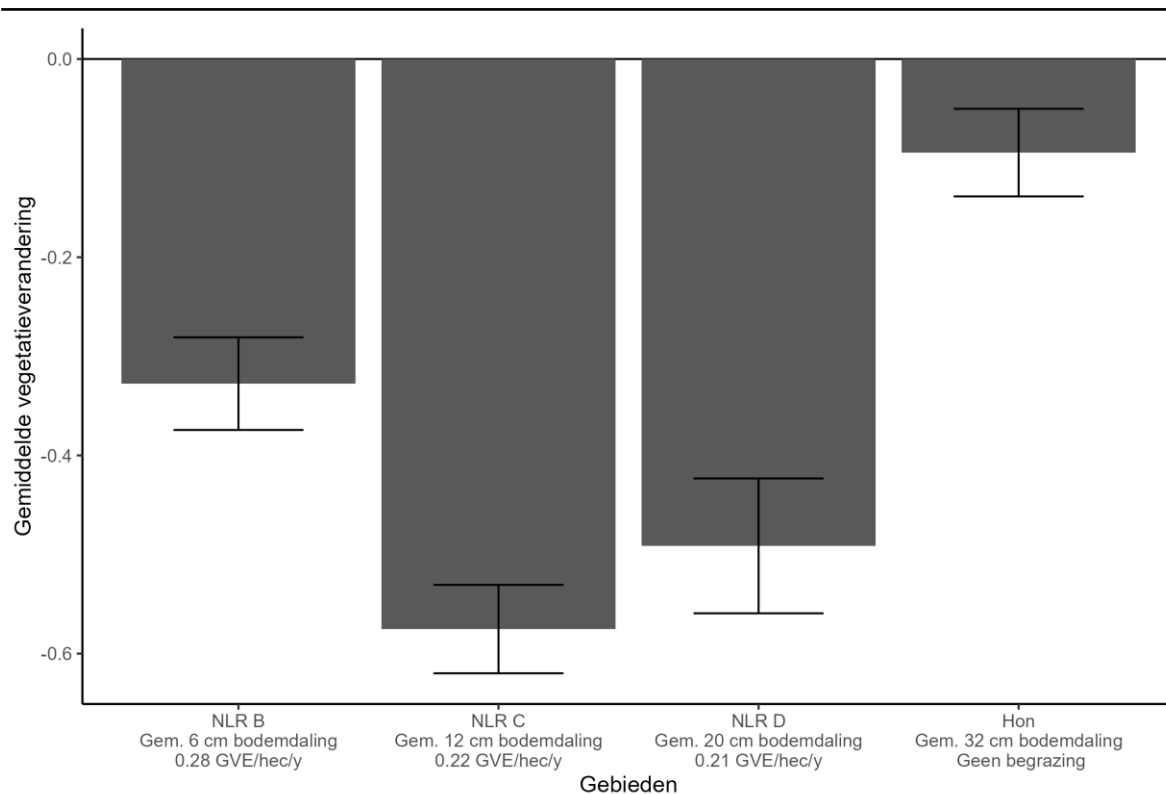
Deze relatie was niet aanwezig in gebied D, maar dat komt omdat gebied D geen delen had met een hoog maaiveld. De interactie tussen afstand tot de sedimentbron en maaiveldhoogte was ook significant, maar daar was de onzekerheid zeer groot waardoor er geen patroon aanwezig was.

Op De Hon was geen enkele factor gerelateerd aan de gemiddelde vegetatieverandering. Dit komt waarschijnlijk doordat er veel minder regressie heeft plaatsgevonden op De Hon dan op het Neerlands Reid, ondanks een grotere bodemdaling.

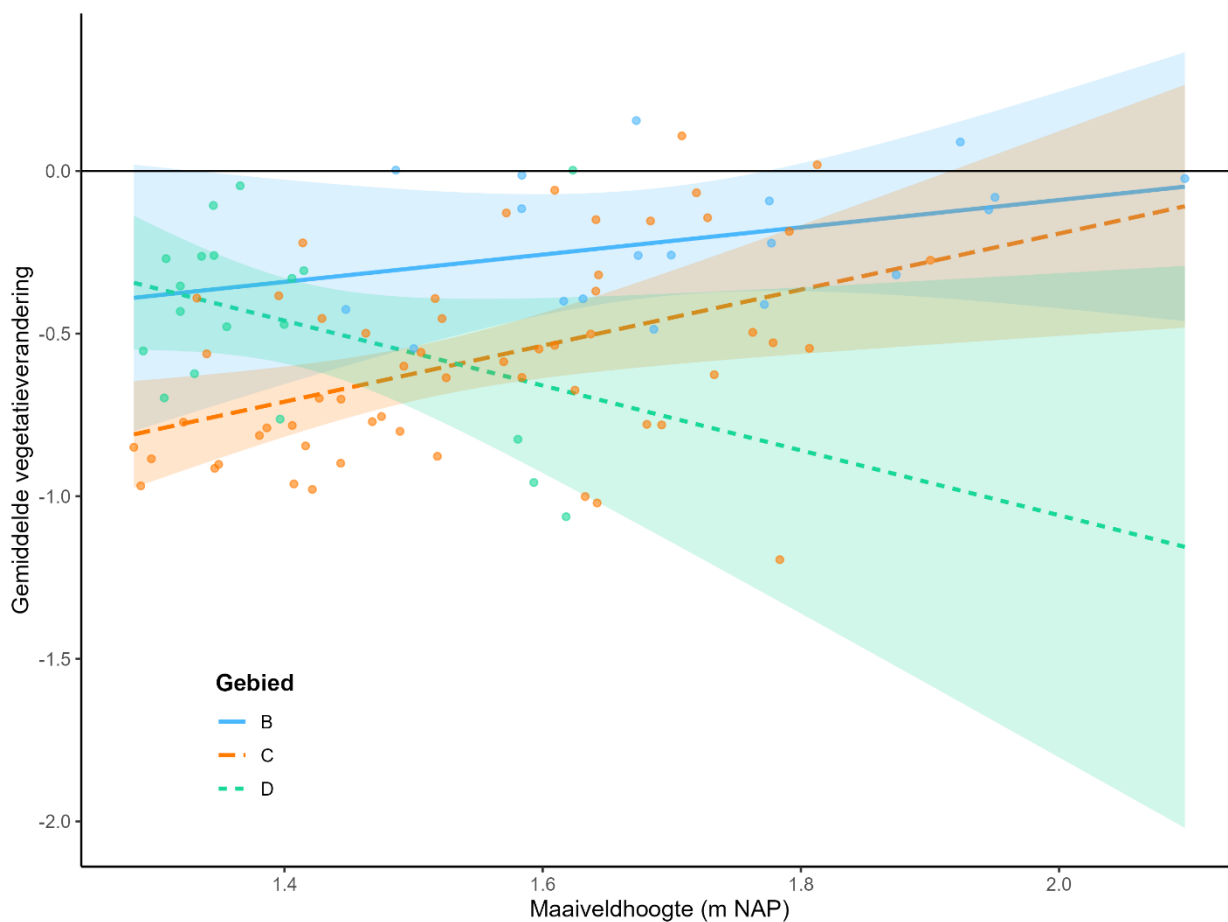
### Verandering vegetatie de Hon 1993 - 2020



**Figuur 4-16** Gegeneerde verschilkaart (successie-regressie) van de VEGWAD-vegetatiekaart van De Hon in 1993 en 2020.



**Figuur 4-17** Gemiddelde successie of regressie voor de drie gebieden op het Neerlands Reid en De Hon. Hoe negatiever de waarden hoe meer regressie heeft plaats gevonden binnen het gebied. De waarden zijn het gemiddelde met de standard error.



**Figuur 4-18** Relatie tussen maaiveldhoogte en gemiddelde vegetatieverandering voor de drie verschillende gebieden op Neerlands Reid. Hoe negatiever de waarden hoe meer regressie heeft plaats gevonden binnen een blok.

## 4.7 Permanente en eenmalige kwadraten

### 4.7.1 Oorspronkelijke meetnet

In het oude PQ-meetnet vond tussen 1986 en 2018 in elf PQ's van de 38 PQ's regressie van de vegetatie plaats, waarvan vier op het NLR en zeven op De Hon. De regressie van hoge kwelder naar lage kwelder, pionierzone of kale grond was het meest voorkomend. Voor geen van de factoren had een significant effect op het voorkomen van successie of regressie.

De soortensamenstelling van het oude PQ-meetnet werd vooral bepaald door de factoren maaiveldhoogte en de locatie (Neerlands Reid of De Hon) (Tabel 4-9). De pionier- en lage kwelder soorten komen vooral voor bij een lagere maaiveldhoogte (Bijlage 4). Op het Neerlands Reid komen vooral soorten voor die kenmerkend zijn voor een beweide kwelder, terwijl op De Hon meer soorten voorkomen die niet begrazingstolerant zijn.

### 4.7.2 Nieuwe meetnet

Bij het nieuwe meetnet was het niet mogelijk om de regressie te bepalen met behulp van de vegetatiekaart, omdat voor de vegetatiekaart de TMAP-typologie anders was bepaald dan voor de PQ's, wat leidt tot conversiefouten.

Naast het optreden van regressie kan de aanwezigheid van kale grond en de eenjarige pioniersoorten zeekraal en klein schorrekruid ook een indicatie zijn van slechte drainage. De bedekking kale grond is in het nieuwe meetnet vrijwel niet aanwezig in de PQ's + EQ's in gebied B. In de vegetatiekaart had gebied C de grootste oppervlakte met kale grond, uit de PQ heeft gebied B meer kale grond, dit verschil komt waarschijnlijk omdat PQ's/EQ's een puntmeting zijn (Figuur 4-19). De bedekking kale grond was gerelateerd aan maaiveldhoogte, namelijk in lageregelegen PQ's/EQ's komt meer kale grond voor (Tabel 4-7). Klein schorrekruid komt vooral voor in gebied D (met de meeste bodemdaling op NLR) en op de Hon (Figuur 4-19). Maar de bodemdaling was niet significant, wel komt klein schorrekruid vooral veel voor in PQ's met een lager maaiveld (Tabel 4-7). Zeekraal komt vooral op het Neerlands Reid voor, vooral in PQ's in gebied D (Figuur 4-19). Deze pioniersoort is voornamelijk aanwezig in PQ's/EQ's met een lager maaiveld (Tabel 4-7).

Geen enkele van de abiotische factoren had een significant effect op de bedekking van kale grond (Bijlage 6). 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.

#### **Soortenrijkdom op het Neerlands Reid en De Hon**

In voorgaande rapportages is genoemd dat bodemdaling een mogelijk positief effect heeft op de biodiversiteit, doordat het de successie naar een soortenarm climaxstadium kan afremmen. Om te bepalen of de biodiversiteit is veranderd, is de soortenrijkdom vergeleken tussen het oude meetnet in 1986 en de PQ's + EQ's in 2020-2022. Het zijn wel verschillende meetnetten, maar het aantal PQ's is vrij groot, 1986: 90 en 2020 -2022: 198. In 1986 waren er 78 soorten gevonden in de PQ's van het oude meetnet op het Neerlands Reid en daarvan waren er 38 kweldersoorten. In het oude meetnet op De Hon waren er 57 soorten gevonden, waarvan er 31 kweldersoorten waren. In 2021 zijn er 49 soorten op het Neerlands Reid gevonden, waarvan er 33 kweldersoorten waren. Op De Hon zijn er 22 soorten gevonden en alle soorten waren kweldersoorten. In 1986 waren er op het Neerlands Reid meer duin en duinvallei soorten aanwezig in de plots, voor De Hon is er vooral een afname van begrazingstolerante soorten van de lage en de hoge kwelder, daarnaast ook een aantal duinsoorten. Tussen 1986 en 2021 is dus de soortenrijkdom sterk afgenomen op zowel het Neerlands Reid en op de Hon. Of deze afname komt door de bodemdaling of door natuurlijke successie is niet te bepalen. Daarvoor is vergelijking met een referentiekwelder nodig.

#### **Multivariate analyse ruimtelijke ligging**

Op het NLR en De Hon wordt de soortensamenstelling van het nieuwe meetnet PQ's/EQ's bepaald door de maaiveldhoogte, bodemdaling en de afstand van wad via de kreek (Tabel 4-9). Op het NLR komen soorten van de pionier- en lage kwelder veel voor in PQ's/EQ's met een laag maaiveld of met een hoge

bodemdaling (Bijlage 6). PQ's/EQ's op het NLR met een grote afstand tot het wad via kreek hadden vooral soorten van de hoge kwelder of zoete graslanden. Verder waren de verschillende beweidingsgebieden op Neerlands Reid ook significant verschillend van elkaar. PQ's/EQ's op De Hon met lager maaiveld hebben vaker pionier- en lage kwelder soorten (Bijlage 6). In PQ's/EQ's met grotere bodemdaling en een grotere afstand tot het wad komen de brakke soorten riet en zilte rus meer voor.

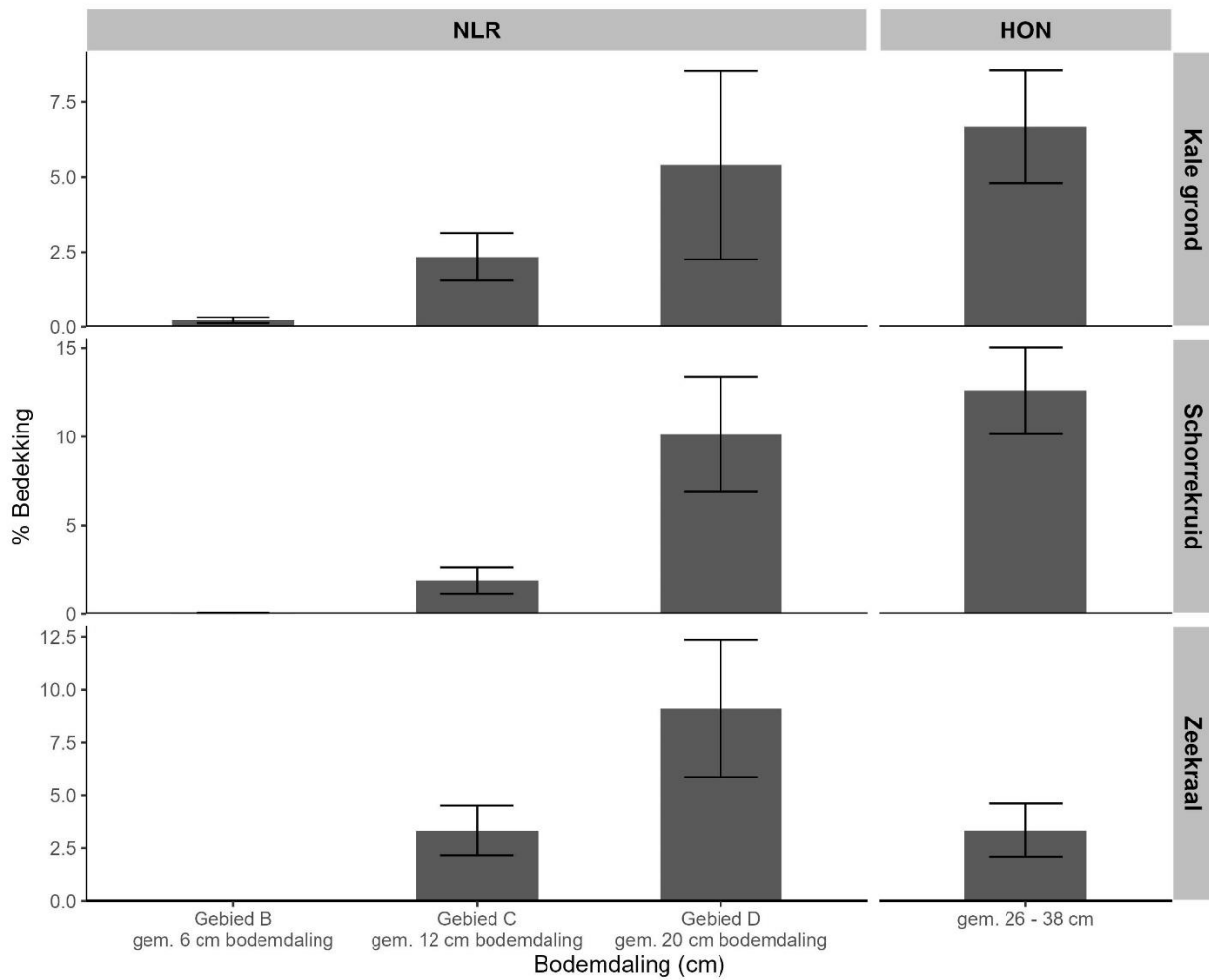
### Multivariate analyse abiotische factoren

Uit de multivariate analyse met de abiotische variabelen blijkt dat op het Neerlands Reid het zoutgehalte (EC) en maximale inundatievrije periode significante effecten hadden op de soortensamenstelling (Bijlage 6). Zouttolerante en pioniersoorten kwamen vaker voor bij PQ's met een hoger zoutgehalte en in PQ's die vaak worden geïnundeerd. Op De Hon had alleen het percentage organische stof een significant effect op de soortensamenstelling. De organische stof was vooral hoger op plekken gedomineerd door soorten als zilte rus, zeerus en riet, plantensoorten die zelf zorgen voor een dikkere organische toplaag (vooral bestaande uit wortelmateriaal) in de bodem.

**Tabel 4-6** Lineaire modellen met wel/niet regressie van de vegetatie van de PQ's oorspronkelijke meetnet 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

Factoren	Regressie Bedekking			
	Oud meetnet	Kale grond	Zeekraal	Klein schorrekruid
Intercept	-1.40	4.57**	3.10**	2.86**
Maaiveldhoogte	1.93	-4.92***	-5.24***	-2.35*
Verandering in maaiveldhoogte	1.35			
Gemodelleerde Bodemdaling		-1.57	-0.74	0.40
Afstand sedimentbron	-1.04	1.47	1.12	-1.18
Afstand wad via kreek	0.45	-1.13	-1.94	-1.44
Max. inundatievrije-periode		0.28	1.45	-0.86
Locatie	-0.79	-0.86	2.82**	-0.93
Log link	-14.31			
F-statistics		5.79**	7.40**	6.14**
R <sup>2</sup>	0.55	0.13	0.16	0.14
AIC	41	1571	1498	1665
BIC	50	1598	1524	1691
DF residual	32	191	191	191

p-waardes: \* < 0.05, \*\* < 0.01, \*\*\* < 0.001

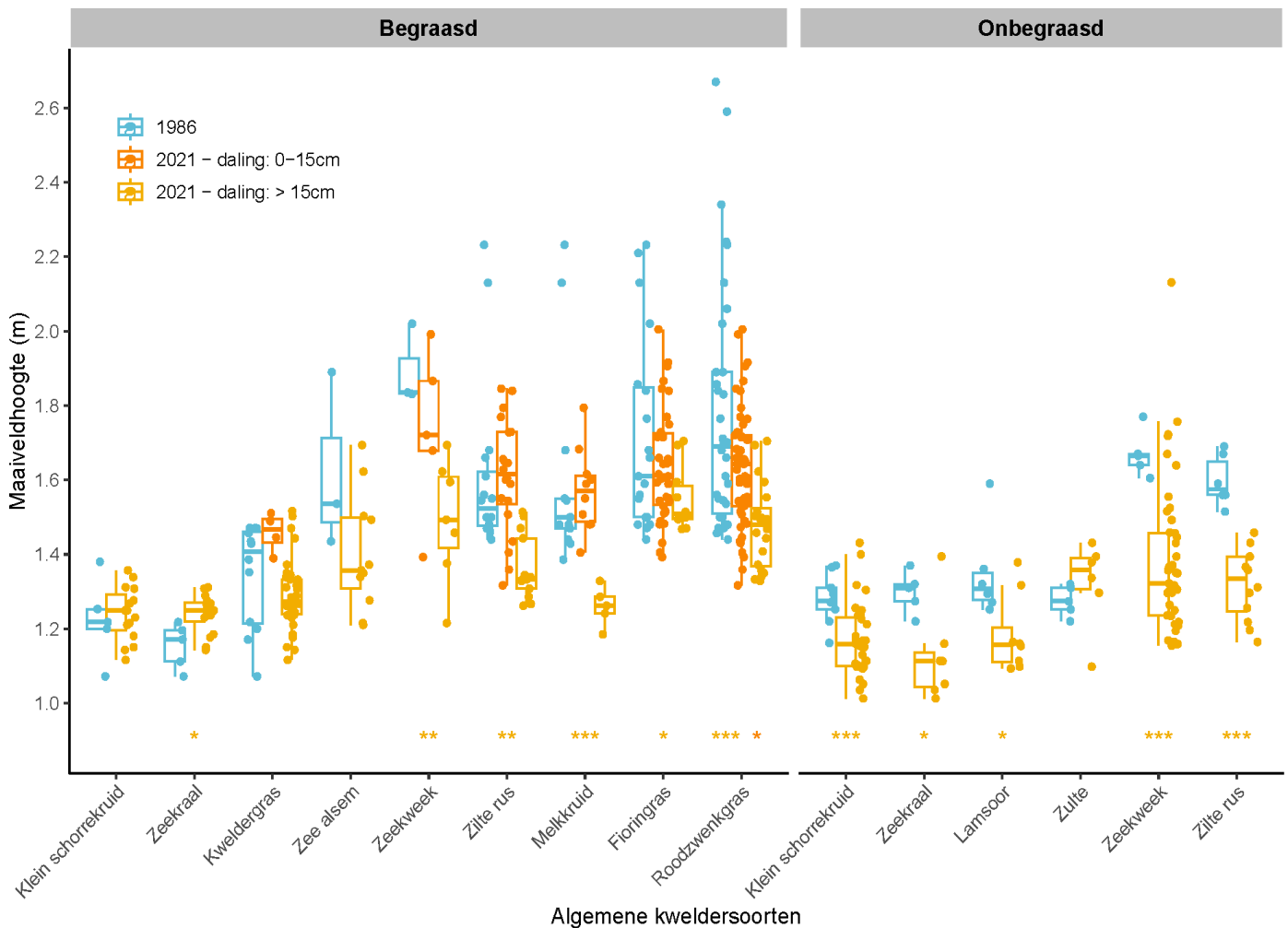


**Figuur 4-19** De bedekking (in %) van de kale grond, klein schorrekruid en zeekraal ten opzichte van de bodemdaling en voor het NLR en De Hon.



### 4.7.3 Individuele soorten

De verandering in maaiveldhoogte van de individuele soorten over tijd geeft aan in hoeverre deze zouden kunnen mee dalen met een dalende bodem voordat de bedekking significant afneemt. Op Neerlands Reid was er geen significant verschil tussen de maaiveldhoogte van 1986 en 2020-2022 voor de kweldersoorten die groeiden in een gebied met 0 - 15 cm bodemdaling, ze kwamen dus nog op ongeveer gelijke maaiveldhoogte voor. In het gebied met meer dan 15 cm bodemdaling kwamen in 2020-2022 vier soorten: zeekweek, melkkruid, zilte rus en rood zwenkgras op een significant lagere maaiveldhoogte voor dan in 1986 (voor de start van de gaswinning) (Figuur 4-22). Deze vier soorten groeiden ook op een significant lagere maaiveldhoogte in het gebied met meer dan 15 cm bodemdaling dan het gebied met minder 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:  $t = 4.41$ ,  $p < 0.001$ ). Deze soorten kunnen dus relatief lang standhouden ondanks een dalend van het maaiveld. Opvallend genoeg was de maaiveldhoogte van zeekraal in 2020/2021 significant hoger dan in 1986. Dit kan mogelijk verklaard worden doordat er geen onderscheid gemaakt is tussen langarig en kortarige zeekraal. Langarig zeekraal komt doorgaans op een lagere maaiveldhoogte voor dan kortarige zeekraal, daardoor kunnen ze op een relatief brede range aan maaiveldhoogtes voorkomen. Daarnaast is kortarige zeekraal een typische soort van de secundaire pioniervegetatie en kan daardoor op hoger maaiveld voorkomen. Op De Hon groeiden klein schorrekruid, zeekraal, lamsoor, zeekweek en zilte rus op een significant lagere maaiveldhoogte in 2020-2022 dan in 1986.



**Figuur 4-20** 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. De asterisk geven weer of er een significant verschil is met de maaiveldhoogte in 1986.  $p$ -waarde: \* < 0.05, \*\* < 0.01, \*\*\* < 0.001

# 5 Evaluatie en discussie

## 5.1 Maaiveldhoogteveranderingen 1986 – 2022

Om een gelijke maaiveldhoogte ten opzichte van gemiddeld hoogwater te houden dienen kwelders op Ameland voldoende opslibbing te hebben om zowel de bodemdaling als de zeespiegelstijging te compenseren. Wereldwijd is er sinds begin 20<sup>e</sup> eeuw een gemiddelde zeespiegelstijging van ongeveer 2 mm per jaar (Church & Clark 2013). Op Ameland was er in de periode 1963-2022 een vergelijkbare gemiddelde stijging van 1.7 mm per jaar, maar gedurende de bodemdalingsperiode 1986-2022 was er geen significante versnelling van de zeespiegelstijging (Wang & Krol 2023). Om te bepalen of de opslibbing kan compenseren voor de bodemdaling is gebruik gemaakt van kleidiktemetingen en jaarlijkse opslibbingmetingen. Beide metingen laten een grote ruimtelijke variatie zien (§4.1, §4.2, §4.3).

Sinds 2019 is de opslibbing gemeten met een nieuw meetnet. Aangezien de opslibbing varieert per jaar afhankelijk van de inundatiefrequentie en waterhoogte, is de gemiddelde opslibbing per jaar voor het nieuwe meetnet nog niet heel nauwkeurig. Het oude meetnet heeft een langere meetperiode, maar de ruimtelijke verspreiding van die punten is minder groot. Ondanks de verschillen tussen de meetnetten, zijn wel dezelfde factoren belangrijk voor de opslibbing. Voor beide meetnetten is de gemiddelde opslibbing significant lager dan de opgetelde bodemdaling en zeespiegelstijging (§4.1.1), waardoor de kwelder tegenwoordig dus lager ligt ten opzichte van het gemiddeld hoog water dan vroeger. De kleidikte metingen laten vergelijkbare resultaten zien. Op De Hon is de kleidikte in de kommen vaak minder dan de totale bodemdaling, wat betekent dat het maaiveld op deze plekken nu lager is dan tijdens de start van de kwelderontwikkeling. Gemiddeld is het maaiveldhoogte van De Hon met 9 cm gedaald (§4.3), ten opzichte van gemiddeld 32 cm bodemdaling op de De Hon. De Hon ligt gemiddeld nog wel hoger dan gemiddeld hoog water (De Hon: 1.29 m NAP, gemiddeld hoog water: 1.09 m NAP). Voor het Neerlands Reid was het niet mogelijk de maaiveldverandering te bepalen doordat de kwelder al veel ouder is en er geen onderscheidt kan worden gemaakt hoeveel opslibbing er voor en na de start van de gaswinning heeft plaatsgevonden. Gebaseerd op de gemiddelde opslibbingssnelheid gemeten op het Neerlands Reid is het echter aannemelijk dat in de delen met veel bodemdaling het maaiveld plaatselijk ook netto is gedaald ten opzichte van 1986, zoals al werd voorspeld door Dankers et al. (1987).

De kleidiktes op het NLR en De Hon zijn het hoogst nabij de kwelderrand en naast de krekken (§ 4.2). Vooral langs de kwelderrand en krekken was de opslibbing van het nieuwe en het oorspronkelijke meetnet hoog genoeg om voor de bodemdaling te corrigeren (§4.1.1 & §4.1.2). Op grotere afstand van de oeverwal en kwelderrand is de opslibbing lager waardoor het maaiveld achterblijft in hoogteontwikkeling en er mogelijk kommen zijn gevormd. Van Dobben et al. (2022) vonden dat de opslibbing ongeveer met 50% verminderde over een afstand van 10 m van de sedimentbron. Uit de meetresultaten uit het nieuwe meetnet bleek deze relatie niet zo sterk, waarschijnlijk doordat andere factoren ook een belangrijke rol spelen die niet zijn meegenomen in de analyse of omdat het meetnet nog relatief kort wordt gemeten. Voor het nieuwe meetnet was er geen significante relatie tussen de afstand van het wad via de kreek.

Opslibbing vindt plaats als de kwelder wordt overstroomd en sediment, aanwezig in het water, bezinkt. Als een gebied lager ligt overstroomt het vaker. Daardoor hebben gebieden met een lager maaiveld vaker een hogere opslibbing en daarmee een snellere ophoging van het maaiveld dan hoger gelegen gebieden (Cahoon & Reed 1995, Suchrow et al. 2011). Er was inderdaad een dikkere kleilaag op de plekken waar de onderliggende zandlaag tijdens het ontstaan van de kwelder lager lag (§4.2). Ook inundatiefrequentie had een significant effect op de opslibbing (§4.1.1). De opslibbing lijkt een optimum te hebben bij ongeveer 200 inundaties per jaar, waarna het weer afneemt, maar dit verband is statistisch niet sterk. Het lijkt erop dat er vooral weinig opslibbing of zelfs inklinking of erosie plaatsvindt op locaties met heel weinig inundaties (< 25 per jaar) of juist heel veel inundaties (> 400 per jaar). Tussen de 25 en 400 inundaties per jaar is er weinig verschil in opslibbing. In de analyse door Van Dobben et al. (2022) is inundatiefrequentie ook geen goede predictor voor opslibbing gebleken. Waarschijnlijk is de

---

gemiddelde hoogte van de waterkolom tijdens een overstroming bepalender voor de opslibbingssnelheid. Deze factor is een proxy voor de stormintensiteit, hogere waardes betekenen dat er zwaardere stormen waren dat jaar. De gemiddelde hoogte van de waterkolom had een positieve relatie met de opslibbing (§4.1.1). Het voorjaar van 2022 was erg stormachtig en dat jaar was de opslibbing ook veel hoger dan de vorige jaren (§4.1.1). Hiermee kunnen we dan ook concluderen dat de opslibbing voornamelijk gebeurt tijdens stormen, wat in lijn is met wat voorgaande studies (Schuerch et al. 2013, Goodwin & Mudd 2019, van Dobben et al. 2022).

De kwelderbodem kan inklinken tijdens droogte en uitzetten na een periode met veel regenval (Cahoon et al. 2011). Vooral een extreme droogte (zoals in 2018) kan een aanzienlijke inklinking veroorzaken (Elschot et al. 2023). Maar, in het statistisch model had neerslagtekort geen significant effect op de opslibbing (§4.1.1). Het nieuwe meetnet wordt nog maar een paar jaar gemeten, waardoor er nog niet veel variatie is in de temperaturen en neerslag in de zomer, daardoor is er waarschijnlijk nog geen significante relatie gevonden. Daarnaast is de absolute inklinking afhankelijk van de kleidikte, in een dunne kleilaag zal er slechts beperkt inklinking kunnen plaatsvinden (Cahoon & Reed 1995, van Dobben et al. 2022).

In het nieuwe meetnet is de jaarlijkse maaiveldophoging significant verschillend tussen de twee gebieden, namelijk een lagere gemiddelde ophoging op het Neerlands Reid dan De Hon (§4.1.1). Daarnaast is het verschil in kleidikte tussen het Neerlands Reid en De Hon minder groot dan verwacht bij een leeftijdsverschil van ongeveer 80 jaar (§4.2). Deels kan dat verklaard worden door het verschil in maaiveldhoogte. De Hon heeft een lagere maaiveldhoogte dan het Neerlands Reid en doorgaans slibt een lagergelegen kwelder sneller op doordat het vaker overstroomt en meer sediment kan bezinken. Daarnaast vindt er op het Neerlands Reid extra inklinking plaats door vertrapping van koeien, paarden en/of schapen. Hoeveel extra inklinking beweiding door vee veroorzaakt is lastig te bepalen in deze studie, daarvoor zouden we twee gebieden met en zonder beweiding vlakbij elkaar moeten vergelijken. Het Neerlands Reid en De Hon zijn te verschillend van elkaar om te vergelijken, bijvoorbeeld door het leeftijdsverschil. Op Schiermonnikoog is een extra inklinking door beweiding met vee gemeten van ongeveer een centimeter bij een totale kleidikte van 12 cm (Elschot et al. 2013), maar dit zal ruimtelijk variëren afhankelijk van de zandfractie en de totale dikte van de kleilaag.

De vegetatiehoogte had ook een significante positieve relatie met de maaiveldophoging, met hogere vegetatie was er meer opslibbing, en daarmee hogere de kwelder netto meer op. Dit kan komen doordat hogere vegetatie de stroomsnelheid vermindert, en dus meer sediment kan invangen (Peralta et al. 2008). Daarentegen is de vegetatiehoogte ook een indicatie van begrazingsdruk en de daarbij horende vertrapping, een korte vegetatie duidt op een hoge begrazingsdruk. Andere studies geven aan dat het vooral vertrapping is dat het verschil in opslibbing veroorzaakt in begraasde en onbegraasde kwelders (Elschot et al. 2013, 2023, Marin-Diaz et al. 2021). Daarnaast zijn PQ's in het Neerlands Reid extra vertrappt omdat schapen ze aantrekkelijk vonden om tegenaan te schuren, waardoor de opslibbing voor deze PQ's mogelijk wordt onderschat.

Het statistisch model van het nieuwe meetnet verklaarde 29% van de variatie in de opslibbing, wat vrij laag is voor een geomorfologische proces. Het nieuwe meetnet is relatief recent (2019) geplaatst en gedurende het plaatsen van de SEB-palen kan verstoring optreden. Ook extra vertrapping door schapen heeft effect op de opslibbing. In een langere meetreeks zal verstoring minder impact hebben op de gemiddelde maaiveldveranderingen, daarnaast is de vertrapping van schapen lager door het afzagen van de palen en daarmee minder aantrekkelijk maken van de SEB voor schapen. Een deel van de variatie in de opslibbing wat niet kan worden verklaard komt omdat het sediment aanbod in het water niet is meegenomen (Cahoon & Reed 1995, Temmerman et al. 2003a), wat verschillen tussen jaren deels zou kunnen verklaren. Het sedimentaanbod wordt enkele keren per maand gemeten door Rijkswaterstaat bij het Danzigtgat. Omdat de meeste opslibbing plaatsvindt tijdens stormen zijn er gegevens noodzakelijk van het sedimentaanbod tijdens stormen. Dat is meestal niet het geval, waardoor deze data niet geschikt zijn voor een statistische analyse van de opslibbingssnelheid. De verwachting is dat met een langere meetperiode het statistisch model de variatie beter kan verklaren, omdat verschillen tussen de PQ en jaren en verstoring minder groot effect zullen hebben.

## 5.2 Abiotiek 2021

De opslibbing is het hoogst nabij de kreken en het wad. Effecten van bodemdaling op de kwelder zullen hierdoor groter zijn verder weg van de sedimentbronnen (kreken en wad). Naar verwachting zullen er meer lagergelegen kommen ontwikkelen achter de oeverwallen door een te lage opslibbing (Hartig et al. 2002, Fagherazzi et al. 2012, Mariotti 2016). 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 achter in de kwelder dicht bij de duinen hoger zijn dan de kwelderdelen bij het wad (§4.5). Lagergelegen kommen vormen achter de hoger gelegen oeverwallen. De kommen liggen dus vaak relatief dicht bij de kreken. De hydromorfologische ontwikkeling geeft wel een indicatie voor het ontstaan van kommen. De kwelderrand en oeverwal hebben een hogere inundatiefrequentie dan locaties op een grotere afstand van de sedimentbron (§4.4). Maar als de verder gelegen locaties overstromen is de inundatieduur veel langer door een slechtere drainage dan de op de kwelderrand en oeverwal met goede drainage. Het vochtgehalte van de bodem was dan ook hoger op grotere afstand van de sedimentbron (§4.5).

In de kommen met een lager maaiveld is de bodem zouter. Daarnaast hebben deze kommen een lagere redox-waarde wat een indicatie is voor zuurstofloze en stressvolle omstandigheden (§4.5). Zoutgehalte en aanwezigheid van zuurstof zijn belangrijke indicatoren voor het voorkomen van kwelderplanten (Flowers & Colmer 2008, Colmer & Flowers 2008, Davy et al. 2011, Cott et al. 2013, Mossman et al. 2020). Als stressvolle omstandigheden toenemen zal dit op den duur kunnen resulteren in regressie van de vegetatie, doordat soorten van lagere kwelderzonerings beter tegen stressvolle condities kunnen.

Drainage (afstromen) van vocht op de kwelder kan worden vertraagd door het aanstampen van de bodem door grazers. Een kenmerk van een aangestampte bodem is dat de bulkdichtheid hoger is en dit kan voor anoxische (zuurstofloze) condities in de bodem zorgen (Hamza & Anderson 2005, Elschot et al. 2013, van Klink et al. 2015). Tegen de verwachting in was er geen significant verschil in bulkdichtheid tussen de begraasde kwelder het Neerlands Reid en de onbegraasde kwelder De Hon (§4.5). 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 de sedimentbronnen en wad, factoren die belangrijker kunnen zijn dan beweiding of kwelderleeftijd. 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 tijdens inundatie.

## 5.3 Vegetatieveranderingen 1986 – 2020

### 5.3.1 Vlakdekkende vegetatiekaarten

De analyses van de vegetatiekaarten 1993 – 2020 laten zien dat het aandeel lage kwelder is toegenomen in de gebieden met meer bodemdaling. Deze toename komt vooral doordat voorheen hoge kweldervegetatie veranderde in lage kweldervegetatie. Er was nog geen toename zichtbaar van het aandeel pionierzone en daarmee eenjarige soorten op beide locaties. Op het Neerlands Reid was er meer regressie van de vegetatie dan op De Hon, wat waarschijnlijk komt door een combinatie van bodemdaling en beweiding (§4.6.2).

Op het Neerlands Reid heeft gebied C (ten westen van de Oerdsloot) de meeste regressie (56%), daarna het oostelijke gebied D (49%) en in westelijke gebied B het minste regressie (39%). Gebied B heeft zich vooral ontwikkeld van zoete graslanden naar brakke kwelder, terwijl er ook successie was van hoge kwelder naar brakke kwelder. Gebieden C & D hebben de meeste regressie: een deel van de kwelder is van brakke kweldervegetatie veranderd in hoge kwelder vegetatie, maar ook is hoge kweldervegetatie veranderd in lage kweldervegetatie, waardoor het aandeel hoge kweldervegetatie gelijk is gebleven en het aandeel lage kwelder toeneemt. In gebied C is er ook een toename van ongeveer 5 hectare aan kale grond en water sinds 1993. De regressie van vegetatie op het Neerlands Reid komt waarschijnlijk door een combinatie van bodemdaling en begrazingsdruk. De begrazingstolerante soorten typerend voor

---

hoge kwelders kunnen waarschijnlijk minder goed tegen de nattere en zoutere omstandigheden die door bodemdaling worden veroorzaakt (Howison et al. 2016, Veldhuis et al. 2019). Daarnaast kan door vertrapping de waterdoorlaatbaarheid minder zijn waardoor het ook nog natter wordt op het Neerlands Reid.

In het veld lijken de drie gebieden verschillen te hebben in begrazingsdruk, al geeft de grootvee-eenheid aan dat er weinig verschil is in begrazingsdruk tussen de gebieden ( $B = 0.28$  GVE/ha/j;  $C = 0.22$  GVE/ha/j;  $D = 0.21$  GVE/ha/j). Dat is opvallend, omdat in gebied C de vegetatie zeer kort begraasd is en er meer schade door vertrapping lijkt te zijn. Gebied C wordt ook door een grote populatie ganzen begraasd, en deze begrazingsdruk wordt nu niet meegenomen in de berekening van de grootvee-eenheid. Daarnaast is de berekening afhankelijk van de grootvee-eenheid factor die per type vee is bepaald in de literatuur (Davidson et al. 2017). Volwassen koeien en paarden hebben een grootvee-eenheid van 1, pinken (jonge koeien) een grootvee-eenheid van 0.5 en schapen een grootvee-eenheid van 0.12 (Davidson et al. 2017). Vooral de grootvee-eenheid van schapen varieert tussen landen (tussen 0.2 – 0.05) en dat maakt uit voor de totale grootvee-eenheid (European Union 2021, NVWA 2023).

Op De Hon vindt alleen natuurlijke begrazing plaats van o.a. konijnen, hazen en ganzen. Daarnaast is de morfologie van De Hon veel heterogener waardoor de regressie vooral lijkt plaats te vinden in kommen op een grotere afstand tot de sedimentbron dan oeverwallen, terwijl regressie op Neerlands Reid op grotere oppervlakten plaatsvindt. Op De Hon is de vegetatie vooral veranderd in zeekweek climax of in de lage kwelder climax met zoutmelde en beide processen vinden in kleine oppervlaktes naast elkaar plaats (mozaïek).

### **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 (Elschot et al. 2017). 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, Mossman et al. 2020). Lage kweldersoorten en pioniersoorten zijn beter aangepast aan zuurstofloze omstandigheden dan hoge kweldersoorten en daardoor zou op die plekken regressie plaatsvinden (Gray & Scott 1977, Castillo et al. 2000, Holmer et al. 2002, Veldhuis et al. 2019).

Uit de analyse in de voorliggende rapportage blijkt dat maaiveldhoogte de belangrijkste factor is voor het voorkomen van regressie van vegetatie (§4.6.2). Op plekken met een lage maaiveldhoogte vindt vaker regressie plaats. Maar er is geen specifieke ondergrens van de maaiveldhoogte geïdentificeerd waar regressie plaatsvindt. Dit geeft aan dat andere factoren ook een belangrijk rol spelen. Uit de analyse komt dat regressie vooral plaatsvindt op een korte afstand tot sedimentbron en wad, daarnaast had de afstand tot het wad ook een significant effect op de plantensamenstelling. Op grotere afstand van de sedimentbron is het maaiveld meestal weer hoger omdat de kwelder dan geleidelijk verandert in duinen. Daarom is het lastig statistisch te bepalen of de ligging op de kwelder een effect heeft op de vegetatieontwikkeling. De regressie heeft ook duidelijk niet alleen plaatsgevonden in de kommen, maar ook op de oeverwallen en kwelderrand.

### **5.3.2 Permanente kwadranten**

Op het Neerlands Reid komen in 2019 – 2022 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 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 begrazings-intolerante 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 voornamelijk de lage kwelder climaxsoort zoutmelde voor. Op stukken kwelder die natter zijn domineert klein schorrekruid of, als het water brak is, riet met zilte rus (eigen observaties).

In eerdere rapportages is geconcludeerd dat de vroegere zorg om areaalverlies heeft plaatsgemaakt voor de constatering dat een tijdelijke negatieve opslibningsbalans op De Hon positief is voor de biodiversiteit door het afremmen van de veroudering van de vegetatie (Dijkema et al. 2011). Veroudering van de vegetatie resulteert op een onbeweide kwelder doorgaans in een monocultuur van zeekweek op de hoge kwelder en van zoutmelde op de lage kwelder. Dit vertaalt zich vervolgens in een afname van de plantendiversiteit (Van Wijnen & Bakker 1997, Veeneklaas et al. 2013, Esselink et al. 2017, Elschot et al. 2020). Dit natuurlijke, maar vanwege bovengenoemde redenen veelal ongewenste, verouderingsproces wordt op veel kwelders in de Waddenzee tegengegaan of vertraagd door beweiding met vee (Bakker 1985, Esselink et al. 2017). Op Ameland wordt het verouderingsproces op de onbeweide kwelder mogelijk vertraagd door bodemdaling (Dijkema et al. 2011, Elschot et al. 2017), toch neemt de bedekking van Zeekweek ook daar langzaam toe. Eventueel optredende regressie betekent overigens niet dat alle soorten typerend voor een lagere kwelderzone ook altijd kunnen terugkeren (Elsey-Quirk et al. 2019). Op De Hon bestaat ongeveer 67% van de kwelder uit twee vegetatietypes: het zoutmelde type wat de climax vegetatie van de lage kwelder is en het zeekweek type, wat de climaxvegetatie is van de hoge kwelder. Deze vegetatietypes zijn beide ook niet heel erg soortenrijk (Westhoff et al. 1970, Petersen et al. 2014). Als de soortenrijkdom van het oude meetnet in 1986 wordt vergeleken met de soortenrijkdom van de vaste PQ's in 2021, is er een duidelijke afname van de soortenrijkdom op De Hon (van 31 naar 20 kweldersoorten) (§4.7.1). Daaruit kunnen we dus concluderen dat ondanks de bodemdaling de successie is doorgegaan wat tot biodiversiteitsverlies heeft geleid. Bodemdaling vertraagt mogelijk wel de afname van de biodiversiteit, maar dit kan alleen onderzocht worden door een vergelijking te maken met een vergelijkbare naburige kwelder (met vergelijkbare leeftijd) waar geen bodemdaling heeft plaatsgevonden.

Een aantal plantensoorten die groeien op het gebied van de kwelder met meer dan 15 cm bodemdaling komt op een significant lager maaiveld in 2020/2021 voor dan in 1986 (§4.7.1). De soorten die op een lager maaiveld groeien met meer bodemdaling zijn vooral meerjarige soorten van de hoge kwelder: lamsoor, zeekweek, melkkruid, zilte rus, rood zwenkgras en fioringras. Van de twee eenjarige soorten groeit alleen klein schorrekruid op De Hon lager in 2020 - 2022 dan in 1986. Zeekraal groeit zelfs iets hoger op het NLR in 2020 - 2022 dan in 1986.

Dat sommige soorten nu op een lager maaiveldniveau groeien dan in 1986 geeft aan dat sommige soorten over een brede zone in hoogteligging kunnen voorkomen (Bockelmann et al. 2002) en als ze eenmaal gevestigd zijn, bestand zijn tegen een verandering/verslechtering van de omstandigheden. Van zeekweek is bekend dat het tijdens successie op een steeds lager maaiveld kan voorkomen (Veeneklaas et al. 2013). Of het lagere voorkomen van zeekweek komt door natuurlijke uitbreiding of doordat de maaiveldhoogte is gedaald kan nog niet worden geconcludeerd. De range van maaiveldhoogtes voor zeekweek van Bockelmann et al. (2002) geeft een indicatie dat zeekweek lager voorkomt op Ameland dan op Schiermonnikoog, maar voor duidelijkheid zal er vergeleken moeten worden met een referentiekwelder waar geen bodemdaling plaatsvindt. Soorten die een- of tweejarig zijn, zoals zilte, zeekraal en klein schorrekruid, moeten zich regelmatig opnieuw vestigen. Tijdens kiemen is een plant het gevoeligst voor maaiveldhoogte en geschikte abiotische omstandigheden (Hu et al. 2015, Bouma et al. 2016, Yuan et al. 2020). Deze planten kunnen daardoor minder makkelijk vestigen op lager maaiveld. Op het Neerlands Reid komen deze soorten dan ook niet op een lager maaiveld voor in 2020-2022 in vergelijking met 1986. Op het Neerlands Reid komt zeekraal op een significant hoger maaiveld voor in vergelijking met 1986, de reden hiervoor is dat er geen onderscheid wordt gemaakt tussen de twee zeekraal soorten (langarig en kortarig zeekraal). Kortarig zeekraal komt op een hoger maaiveld voor dan langarig zeekraal, daarnaast is kortarig zeekraal een soort die veel voorkomt bij secundaire pioniervegetatie. Verschillen in de verhouding tussen de twee soorten kan dit effect verklaren.

Op De Hon komen klein schorrekruid en zeekraal wel op lagere maaiveldhoogtes voor dan in 1986. Waarschijnlijk kan het erg goed tegen zoutere en nattere omstandigheden die optreden door bodemdaling (Tessier et al. 2000). Andere studies geven aan dat klein schorrekruid niet goed kan ontkiemen onder 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 ver is gedaald of omdat kweldergras relatief snel verdwijnt als de bodem daalt.

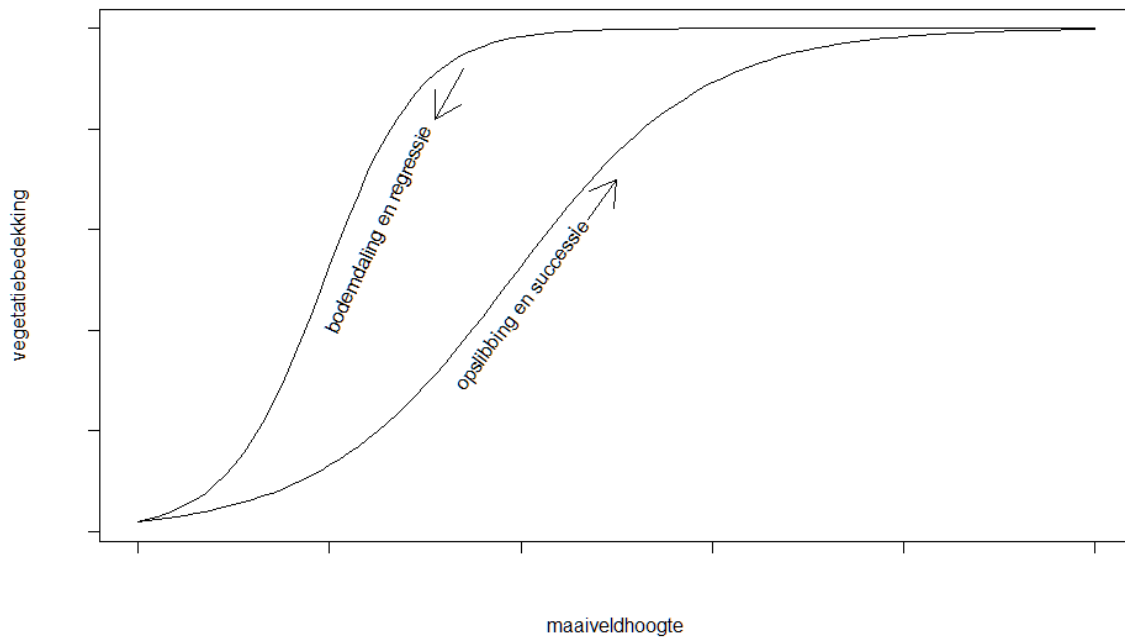
Deze conclusies zijn afhankelijk van de range in maaiveldhoogte van de PQ's. Er zijn 65 PQ's in 1986 gebruikt voor de maaiveldhoogte van de individuele soorten, waar de PQ's een range in maaiveldhoogte hebben van 1.10 m tot 2.20 m boven NAP. Voor het nieuwe meetnet zijn voor de analyse van individuele soorten 184 PQ's gebruikt, waarbij er een range in maaiveldhoogtes is van 1.01 m tot 2.13 m boven NAP. Daarnaast zou het goed zijn om met een referentie kwelder te vergelijken. Op Schiermonnikoog zijn in het verleden veel vegetatieopnames gedaan. Het toevoegen van vegetatieopnames met een grote range van maaiveldhoogtes van Schiermonnikoog met dezelfde leeftijd als de kwelder op Ameland, zou een mooie aanvulling zijn. Verder is 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.

## 5.4 Effect bodemdaling op kweldervegetatie

### 5.4.1 Regressie van de kweldervegetatie

Een kwelder is verdeeld in verschillende zones met een elk eigen plantengemeenschappen die grotendeels worden bepaald door de maaiveldhoogte en daarmee de inundatiefrequentie tijdens hoogwaters (Olf et al. 1997, Van Wijnen et al. 2014). Zo kan de primaire pioniervegetatie vanaf 25 cm onder gemiddeld hoogwater vestigen (maaiveldhoogte van 0.81 m boven NAP). De lage kwelderzone kan 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) (Dankers et al. 1987, Elschot et al. 2017). De zonehypothese ging ervan uit dat regressie door maaivelddaling net zo verloopt als successie door maaiveldophoging. Maar in eerdere rapportages is de zonehypothese aangepast, omdat veel soorten op Ameland voorkomen op lagere maaiveldhoogtes dan verwacht wordt gebaseerd op de ondergrens van de zone waar ze zouden kunnen voorkomen. In de vorige rapportage werd geconcludeerd dat de combinatie van netto-daling van het maaiveld, lage initiële maaiveldhoogte én slechtere drainage lijkt te resulteren in regressie van de vegetatie. Deze factoren zijn zeker belangrijk voor het voorkomen van regressie, maar daarnaast is de ondergrens soort. Sommige soorten kunnen na het vestigen heel lang standhouden, in verslechterde omstandigheden, maar andere niet. Er is op de kwelder waarschijnlijk sprake van een hystereselus; de abiotische omstandigheden kunnen voor reeds gevestigde vegetatie slechter worden voordat de soort in bedekking afneemt (Válega et al. 2008, Duke et al. 2019).

De hystereselus is ook onderdeel van de theorie van 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 verandert in lage kwelder en de lage kwelder in pionier kwelder etc. Direct van hoge kwelder naar kale grond is slechts een enkele keer voorgekomen in de PQ's. Maar het kan best zijn dat met extra stressors, zoals extreme weersomstandigheden of een toename in zeespiegelstijging, er wel een totale omslag van vegetatie naar kale grond optreedt (Silliman et al. 2005). Een deel van De Hon had in 2020 een lager maaiveld dan tijdens de start van de kwelderontwikkeling, de vegetatie die er nu is houdt nog stand. Maar als de vegetatie zou verdwijnen, kan het zijn dat het kale plekken worden waar zich geen nieuwe vegetatie meer kan vestigen.



**Figuur 5-1** 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.

#### 5.4.2 Oorzaken regressie

Maaiveldhoogte is de belangrijkste factor voor regressie, met een lager maaiveld is er een grotere kans op regressie. Maar er zijn geen specifieke omslagpunten voor maaiveldhoogtes van verschillende vegetatiezones waarop PQ's regressie vertoonden. 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. Waarschijnlijk wordt regressie bepaald door een combinatie van drainage, het zoutgehalte en de specifieke plantensoorten die voorkomen op de locatie. Ondanks de relaties tussen inundatievrije-periode en redoxwaardes met bodemdaling, hadden deze factoren geen direct 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 relatief 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 en dit kan een groot effect hebben op de abiotiek. Daarnaast was het groeiseizoen grotendeels voorbij in september en juist de abiotische omstandigheden aan het begin van het groeiseizoen zullen cruciaal zijn voor de vestiging en vegetatieontwikkeling (Yuan et al. 2020).

De inundatiefrequentie data zijn gevoelig voor uitschieters en de afzonderlijke drukmeters kunnen een bias hebben. Daarnaast was er ook geen aparte barometer aanwezig op het eiland waardoor ervoor gekozen is om inundaties mee te nemen als er een drukverschil is van 3 hPa (hoogteverschil van 3 cm). 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.

De afstand tot de sedimentbron heeft ook geen duidelijk effect op het voorkomen van vegetatieregressie. Dit komt waarschijnlijk omdat op grotere afstanden van de sedimentbron er duinen zijn waardoor het maaiveld hoger is, daardoor is er geen duidelijk verband met de bodemdaling.

Het Neerlands Reid wordt beweide en dit zorgt voor extra stress op de planten, zo verandert de vegetatie van de climaxsoort zeekweek naar het begrazingstolerante roodzwenkgras of kweldergras (Howison et al. 2015). Door beweiding kan een hoge kwelder vegetatietype naar lage kwelder vegetatietype



---

veranderen. Het zou verondersteld kunnen worden dat de regressie op het Neerlands Reid alleen wordt veroorzaakt door de beweiding en niet door de bodemdaling. Maar dat is niet aannemelijk op het Neerlands Reid. Ten eerste werd het Neerlands Reid al beweid voor bodemdaling begon. Als er door beweiding regressie plaatsvindt, dan zou dat waarschijnlijk binnen 5 jaar van de start van de beweiding hebben plaatsgevonden (Bakker 1985). Verder heeft de meeste regressie plaatsgevonden in deelgebieden C en D, de gebieden met veel meer bodemdaling dan gebied B. Aangezien de begrazingsdruk niet veel verschilt tussen de gebieden is het aannemelijk dat niet alleen beweiding de oorzaak is van de regressie.

De combinatie van bodemdaling en beweiding is zeer waarschijnlijk de oorzaak dat er veel regressie plaatsvindt. Dit heeft waarschijnlijk meerdere oorzaken, ten eerste is er meer compactie door vertrapping waardoor er meer maaiveld daling is (Elschot et al. 2023). Deze vertrapping kan ook zorgen voor slechtere drainage (Bakker et al. 2020), waardoor er nattere, zuurstofloze omstandigheden kunnen ontstaan waardoor er regressie plaatsvindt. Verder is het ook mogelijk dat de begrazingstolerante soorten minder goed tegen de veranderingen in abiotische omstandigheden bestand zijn dan soorten die niet begrazingstolerant zijn.

Op de onbeweide kwelder komt vooral zeekweek en zoutmelde voor. Van zeekweek is bekend dat het luchtkanalen (aerenchym) in de wortels heeft waardoor het zuurstof in de bodem kan brengen (Schrama 2012). Zoutmelde heeft geen aerenchym, maar wortelt wel vrij ondiep en kan misschien daardoor minder last hebben van natte en zuurstofloze omstandigheden. De begrazingstolerante soort Roodzwenkgras heeft daarentegen juist een verminderde groei in zuurstofloze omstandigheden (Howison et al. 2016). Als laatste kan ook mechanische vertrapping door grazers de vegetatie vernietigen en vertrapping kan kale stukken kwelder vergroten (Bakker 1985). Vertrapping kan ervoor zorgen dat de kwelder minder makkelijk erodeert doordat het de bodem aandrukt (Marin-Diaz et al. 2021), maar aangezien de kwelderrand al wordt beschermd op het Neerlands Reid, heeft dat weinig effect op de kwelder.

### 5.4.3 Morfologie kwelders

Naast de veranderingen in de vegetatie, verandert ook de morfologie van de kwelder. Volgens Mariotti (2020) komt het verlies van kwelders niet alleen door het 'verdrinken' van een kwelder, via regressie van de vegetatie, maar vooral door het verbreden van kreken, erosie van de kwelderrand en uitbreiding van kale natte plekken. Alleen voor situaties met een zeer hoge zeespiegelstijging gecombineerd met een laag sedimentaanbod is het verdrinken van een kwelder de belangrijkste factor voor het verlies van kwelderoppervlakte. Deltares en Wageningen Environmental Research hebben onderzoek gedaan naar de morfologische veranderingen van de kwelders op Ameland Oost. Daaruit blijkt dat op het Neerlands Reid de oppervlakte van de kreken is uitgebreid. Of de kreken ook verbreden is nog niet onderzocht. Daarnaast neemt ook het aandeel kale/natte plekken toe op de kwelder. De kwelderrand op het Neerlands Reid is vastgelegd met een stenen rand.

Op De Hon is de kwelderrand niet vastgelegd en onderhevig aan erosie, deze erosie komt waarschijnlijk door de ligging van de kwelderrand in combinatie met golven tijdens stormen (Marani et al. 2011), en een te lage maaiveldhoogte voor pionier planten om zich te vestigen op het wad. Of de kreken op De Hon uitbreiden is onduidelijk, De Hon is een vrij jonge kwelder, waar de kreken nog in ontwikkeling zijn. Er is nog geen onderzoek geweest naar de ontwikkeling van de kreken op De Hon. Op een grotere afstand van het wad bevinden zich meerdere plassen, deze plassen hebben zich de laatste jaren uitgebreid, maar de totale oppervlakte van de plassen is niet groot. Deze veranderingen in morfologie geeft aan dat beide kwelders onder druk staan door de combinatie van bodemdaling en een te lage opslibbing.

## 5.5 Prognose maaiveld- en vegetatieontwikkeling

De prognose is dat de totale bodemdaling in 2050 op het Neerlands Reid ongeveer tussen de 6 – 30 cm uitkomt en op De Hon tussen de 34 – 46 cm (NAM 2023). Dat betekent dat op het Neerlands Reid de

komende 28 jaar waarschijnlijk nog tussen 2 – 4 cm bodemdaling zal plaatsvinden (gebied B = 2 – 4 cm; gebied C & D = 4 cm). Op De Hon zal waarschijnlijk de komende 28 jaar nog 6 – 10 cm bodemdaling plaatsvinden. De bodemdalingssnelheid zou waarschijnlijk wel afvlakken, waardoor het voor de kwelder makkelijker is om te compenseren voor de bodemdaling. Maar als de CO<sub>2</sub> uitstoot niet drastisch wordt verminderd zal de zeespiegelstijging toenemen. De verwachting is dat er een zeespiegelstijging zal zijn tussen de 2.3 – 12.3 mm/j in 2050, afhankelijk van het scenario (Vermeersen et al. 2018).

Gebaseerd op de maaiveldophogingdata en de toekomstige verwachtingen van bodemdaling en zeespiegelstijging is het waarschijnlijk dat delen van het Neerlands Reid verder zullen dalen ten opzichte van het gemiddeld hoog water. De opslibbing kan de bodemdaling, zeespiegelstijging en inklinking door vertrapping en droogte niet compenseren. Alleen locaties vlak bij de kwelderrand en op oeverwallen naast krekken zullen genoeg opslibbing hebben om te compenseren voor bodemdaling en zeespiegelstijging. De Hon heeft een hogere gemiddelde opslibbing, en ook daar zullen de kwelderrand en oeverwal genoeg opslibbing krijgen om te compenseren voor bodemdaling en zeespiegelstijging. De kommen zouden eventueel kunnen stijgen in maaiveldhoogte bij een verminderde bodemdaling, maar door de zeer waarschijnlijk snelle zeespiegelstijging zullen de kommen waarschijnlijk in hoogte gelijk blijven of dalen ten opzichte van het gemiddeld hoog water. Als door klimaatverandering de stormfrequentie en intensiteit toenemen zou dat tot meer opslibbing kunnen leiden, maar dat zou ook tot snellere erosie van de kwelderrand op de Hon kunnen leiden.

De prognose van de vegetatieontwikkeling is minder duidelijk, aangezien het moeilijk is te bepalen wanneer regressie plaatsvindt. Door de maaiveldaling zou een deel van de kwelder natter kunnen worden, wat kan zorgen voor verdere regressie. Op beide kwelders zou het aandeel natte/kale plekken kunnen toenemen. Door verdere uitbreiding van het krekensysteem zouden deze natte plekken beter kunnen afstromen. Maar het is onduidelijk of de uitbreiding van deze krekken snel genoeg zal gaan, en daarnaast kan het ook tot meer erosie leiden. Op het Neerlands Reid neemt het aandeel lage kwelders de komende tijd waarschijnlijk toe, en zou in de lage kwelder het aandeel pioniervegetatie of kale plekken kunnen toenemen. Dit zal vooral plaatsvinden op plekken met een laag maaiveld. Voor De Hon is het onduidelijk tot welke condities de twee climaxsoorten (zoutmelde en zeekweek) kunnen blijven standhouden. Met toenemende zeespiegelstijging zouden deze twee soorten misschien kunnen verdwijnen. Er zou dan wel pioniervegetatie (zeekraal, klein schorrekruid) kunnen groeien, maar deze pioniervegetatie sterft af in de winter, waardoor het minder sediment vasthoudt. Waarschijnlijk zal een toenemende erosie leiden tot plassen in de kommen op de kwelder.

## 5.6 Conclusie

De diepe bodemdaling op Ameland varieert tot nu toe tussen de 0 – 34 cm. De opslibbing op de kwelders is alleen op de kwelderrand en oeverwallen hoog genoeg om voor de bodemdaling, zeespiegelstijging en inklinking te compenseren. Op het Neerlands Reid is de netto opslibbing lager dan op De Hon doordat er meer inklinking/compactie is als gevolg van vertrapping door vee. Doordat op het Neerlands Reid en De Hon de opslibbing verder van de kwelderrand en oeverwal niet hoog genoeg is, heeft er maaiveldaling plaatsgevonden en zijn er kommen gevormd. Op De Hon heeft de kwelder op sommige plekken nu een lagere maaiveldhoogte dan bij de start van de kwelderontwikkeling. Voor het Neerlands Reid was het niet mogelijk de maaiveldverandering t.o.v. de start van de gaswinning te bepalen, maar gebaseerd op de gemiddelde opslibbingssnelheid gemeten op het Neerlands Reid is het aannemelijk dat in de delen met veel bodemdaling het maaiveld plaatselijk ook netto is gedaald ten opzichte van 1986.

Ameland is onderdeel van N2000 gebied de Waddenzee. Daarom is het belangrijk om de effecten van bodemdaling op de arealen van de habitattypen H1310A (Zilte pionierbegroeiing (Zeekraal)), H1320A (Slijkgrasvelden) en H1330A (Schorren en zilte graslanden (buitendijks)) te bepalen. Ondanks de aanwezige veranderingen in vegetatie verschuiven deze vooral binnen en tussen zones die allemaal tot hetzelfde habitattypen behoren, namelijk H1330A. Op basis van de vegetatiekaarten uit 2020 kan gesteld worden dat aan de kwaliteitseisen van Natura 2000 voor de drie dominante kwelderhabitattypen wordt voldaan. De (klif)erosie van de kwelderrand op De Hon heeft geen effect op het areaal van de kwelderhabitattypen gehad, omdat duinvegetatie is veranderd in kweldervegetatie en er nieuwe kwelder is gevormd aan de oostkant van De Hon. Ook in de toekomst zullen de meeste veranderingen

---

waarschijnlijk voornamelijk binnen het habitatype H1330A plaatsvinden, omdat daar het grootste areaal van aanwezig is. Echter, de aanwezigheid van kale plekken of mogelijke uitbreiding daarvan in de toekomst vormt een aandachtspunt.

Op beide kwelders op Oost-Ameland vindt regressie van de vegetatie plaats waarbij brakke vegetatie verandert in hoge kwelder vegetatie en hoge kweldervegetatie verandert in lage kweldervegetatie. De afname in maaiveldhoogte, omdat de opslibbing de bodemdaling niet kan bijhouden, is de belangrijkste factor voor regressie, maar er is geen duidelijke ondergrens van maaiveldhoogte waarop regressie plaatsvindt. Daardoor is het lastig te verklaren waarom er op sommige plekken regressie plaatsvindt en op andere plekken niet. Naast bodemdaling zijn er echter nog meer factoren die voor regressie hebben gezorgd, zoals slechte drainage en beweiding. Het feit dat door de combinatie van maaivelddaling en beweiding er op het Neerlands Reid meer regressie heeft plaatsgevonden dan op de Hon, wijst ook in die richting.

Uit de analyse komt dat sommige soorten op een veel lagere maaiveldhoogte voorkomen dan in 1986. Deze soorten kunnen na de ontkieming en vestiging waarschijnlijk standhouden onder verslechterde omstandigheden. De hypothese dat door bodemdaling de vermindering van soortenrijkdom door successie wordt vertraagd, is niet bewezen. De soortenrijkdom is namelijk afgenomen tussen 1986 en 2021, al is een vergelijking nodig met een referentiekwelder zonder bodemdaling om hier definitieve conclusies over te trekken. De kwelderoppervlakte neemt af door een toename in kreekdimensie en door erosie van de kwelderrand, en daarnaast is er uitbreiding van natte/kale plekken op de kwelder. De effecten van bodemdaling op Ameland geven een goede indicatie van wat er met eilandkwelders kan gebeuren als de zeespiegel verder gaat stijgen. De kwelders op Ameland kunnen de huidige bodemdaling en zeespiegelstijging niet bijhouden. Daardoor dalen deze kwelders netto deels ten opzichte van het huidige gemiddeld hoog water en lopen ze een achterstand in hoogteligging op in vergelijking met andere eilandkwelders. Dit zou ze kwetsbaarder kunnen maken als de zeespiegel verder zal gaan stijgen in de toekomst.

Onderstaand worden de vragen van de bodemdalingscommissie beantwoord.

1a. Vormen er kommen achter de oeverwal en neemt het volume toe van de kommen (1b)?

- De opslibbing neemt af met grotere afstand tot de oeverwal. Aangezien de opslibbing niet hoog genoeg is om te compenseren voor bodemdaling en zeespiegelstijging, daalt het maaiveld achter de oeverwal en worden er kommen gevormd. Over tijd neemt het volume van deze kommen verder toe.

Het Neerlands Reid heeft minder opslibbing dan De Hon, maar op De Hon heeft meer bodemdaling plaats gevonden. Hierdoor kan er niet worden bepaald of er een verschil is in het ontstaan en het volume van kommen tussen het Neerlands Reid en De Hon. Daarnaast is het ook lastig om op een kaart aan te geven waar een kom precies zit, omdat het vaak gaat om enkele centimeters verschil in maaiveldhoogtes.

1c. Wat is het effect van de kommen op de vegetatie?

- Maaiveldhoogte was de belangrijkste factor voor het voorkomen van regressie, regressie komt het meest voor bij een lagere maaiveldhoogte. Aangezien er minder opslibbing en daardoor maaivelddaling is in de kommen, is het aannemelijk dat er meer regressie plaatsvindt in de kommen. Maar er is geen direct bewijs dat regressie van vegetatie vaker voorkomt in de kommen. In beide kweldergebieden vindt regressie namelijk ook plaats op de oeverwal en kwelderrand.

2a. Wat is het effect van bodemdaling op de inundatiefrequentie?

- Door bodemdaling vindt er maaivelddaling plaats, wat kan leiden tot kommen. Deze kommen worden minder vaak overstroomd dan de oeverwal en kwelderrand, maar als de kommen overstroomd worden is de inundatieduur langer. In 2022 overstroomde een oeverwal/kwelderrand ongeveer 8 – 50 keer vaker dan een kom, maar de inundatieduur was ongeveer 0 – 200 dagen langer in een kom. De Hon heeft een lager maaiveld dan het Neerlands Reid en daardoor is de inundatiefrequentie hoger.

## 2b. Welk effect heeft inundatiefrequentie op de kweldervegetatie?

- Niet de inundatiefrequentie maar inundatieduur tijdens het groeiseizoen lijkt een belangrijk effect te hebben op de kweldervegetatie. Een langere inundatieduur zorgt voor zuurstofloze omstandigheden wat stressvol is voor planten en wat kan leiden tot vegetatieverandering.

De maximale inundatie-vrije periode tijdens het groeiseizoen is een goede indicator voor vegetatieontwikkeling. In de huidige analyses is er echter geen direct significant effect gevonden tussen de maximale inundatie-vrije periode en het voorkomen van regressie. De maximale inundatie-vrije periode heeft zeer waarschijnlijk wel een effect op de vegetatieontwikkeling op de kwelders van Ameland-Oost. Maar doordat maaiveldhoogte en maximale inundatie-vrije periode gecorreleerd zijn, is het daardoor mogelijk niet significant in het statistisch model.

## 3a. Wat is het effect van bodemdaling op de drainage

- In gebieden met meer bodemdaling is de kwelder vochtiger en is de redoxwaarde lager, wat indicaties zijn voor slechtere drainage.

## 3b. Wat is het effect van drainage op de kweldervegetatie?

- Er zijn geen directe statische significante relaties tussen vocht, de redoxwaardes en de vegetatieontwikkeling gevonden. De vegetatie wordt beïnvloed door verschillende abiotische factoren, waardoor het lastig is te verklaren welke abiotische factoren de uiteindelijke regressie verklaren.

## 5.7 Kennishiaten

Deze rapportage laat zien dat het nieuwe meetnet een vlakdekkender beeld geeft van de opslibbing en vegetatieveranderingen van de kwelder dan het oude meetnet uit de voorgaande rapportages. Om een langere tijdreeks te hebben, adviseren we om het nieuwe meetnet te blijven monitoren. Ondanks het nieuwe en verbeterde meetnet zijn er enkele kennishiaten:

- Vergelijking van vegetatietypes, soortenrijkdom en maaiveldhoogtes met een referentiekwelder ontbreekt. Eind 2024 komt de nieuwe vegetatiekaart van Schiermonnikoog beschikbaar als onderdeel van het VEGWAD-programma van Rijkswaterstaat. Als de ontwikkeling van Ameland kan worden vergeleken met de ontwikkeling van Schiermonnikoog kan beter worden bepaald in hoeverre de veranderingen door bodemdaling komen of door natuurlijke successie of regressie.
- In de voorliggende rapportage is de gemodelleerde diepe bodemdaling van de NAM gebruikt als proxy voor maaiveldddaling, waarmee de vegetatieveranderingen in het nieuwe meetnet zijn geanalyseerd. In dit model is geen rekening gehouden met opslibbing op kwelders. Voor een volgende rapportage wordt geadviseerd om een opslibbingsmodel te gebruiken om de netto maaiveldddaling te bepalen vanaf de start van de gaswinning.
- Met de verdere monitoring van het nieuwe meetnet kan na ongeveer 10 jaar een nauwkeurige inschatting gemaakt worden van de opslibbing op de kwelders. Deze inschatting kan gecombineerd worden met een herhaling van de kleidiktemeting.
- Door het meten van abiotische omstandigheden van de kwelder aan het begin van het groeiseizoen kunnen we beter bepalen wat de vegetatieontwikkeling bepaalt, omdat plantensoorten zich dan zullen moeten vestigen of uitbreiden.
- Het meten van kreekdimensies in de tijd door een combinatie van vegetatiekaarten, luchtfoto's en de AHN is aanbevolen. Wetenschappelijk onderzoek toont aan dat het kreekoppervlak toeneemt naarmate een kwelder moeite heeft om mee te stijgen met zeespiegelstijging. Daarnaast zal een toenemend aantal natte plekken ontstaan verder weg van de wadrand. Hiermee kan ook de snelheid van kreekuitbreiding worden bepaald en wanneer kreken de natte plekken zouden kunnen draineren.
- Verkennen van inzet van drones om de geomorfologie van het kwelderoppervlak met hoge resolutie in kaart te brengen. Stilstaand water kan met drones mogelijk ook in kaart gebracht worden om zo de locaties met slechte drainage beter in kaart te brengen.

- 
- Vooral op het Neerlands Reid is het aantal kale plekken toegenomen. Het is wenselijk dat deze plekken weer begroeid raken met vegetatie. Vegetatie zal er misschien weer kunnen vestigen als er geen begrazing plaatsvindt. Het effect van mozaïekbeheer op vegetatievestiging en soortensamenstelling in combinatie met mogelijke maaiveldddaling door diepe bodemdaling zou moeten worden onderzocht.
  - In hoeverre heeft de grondwaterstand te maken met vernatting en/of verzoeting (toename brakke vegetatie), zoals met name op Neerlands Reid wordt gezien?

# 6      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

- AHN3. 2014. Actueel Hoogtebestand Nederland 3.
- Bakker, J. P. 1985. The Impact of Grazing on Plant Communities, Plant Populations and Soil Conditions on Salt Marshes. *Vegetatio* 62:391–398.
- Bakker, J. P., P. Esselink, R. van der Wal, and K. S. Dijkema. 1997. Options for restoration and management of coastal salt marshes in Europe. Pages 286–322 in K. M. Urbanska, N. R. Webb, and P. J. Edwards, editors. *Restoration ecology and sustainable development*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Bakker, J. P., M. Schrama, P. Esselink, P. Daniels, N. Bholá, S. Nolte, Y. de Vries, R. M. Veeneklaas, and M. Stock. 2020. Long-Term Effects of Sheep Grazing in Various Densities on Marsh Properties and Vegetation Dynamics in Two Different Salt-Marsh Zones. *Estuaries and Coasts* 43:298–315.
- Bockelmann, A. C., J. P. Bakker, R. Neuhaus, and J. Lage. 2002. The relation between vegetation zonation, elevation and inundation frequency in a Wadden Sea salt marsh. *Aquatic Botany* 73:211–221.
- Bouma, T. J., J. van Belzen, T. Balke, J. van Dalen, P. Klaassen, A. M. Hartog, D. P. Callaghan, Z. Hu, M. J. F. Stive, S. Temmerman, and P. M. J. Herman. 2016. Short-term mudflat dynamics drive long-term cyclic salt marsh dynamics. *Limnology and Oceanography* 61:2261–2275.
- Brinkman, A. G., A. V. de Groot, and J. T. van der Wal. 2017. Bodemdaling en opslibbing op de kwelders van Ameland, een modelstudie.
- Cahoon, D. R., B. C. Perez, B. D. Segura, and J. C. Lynch. 2011. Elevation trends and shrink-swell response of wetland soils to flooding and drying. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 91:463–474.
- Cahoon, D. R., and D. J. Reed. 1995. Relationships among Marsh Surface Topography, Hydroperiod, and Soil Accretion in a Deteriorating Louisiana Salt Marsh. Page Source: *Journal of Coastal Research*.
- 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.
- Church, J. A., and P. U. Clark. 2013. Sea Level Change. Page 124 Working group I contribution to IPCC assesment (AR5), climate change 2013: The physical science base.
- Colmer, T. D., and T. J. Flowers. 2008. 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.
- Davidson, K. E., M. S. Fowler, M. W. Skov, S. H. Doerr, N. Beaumont, and J. N. Griffin. 2017. Livestock grazing alters multiple ecosystem properties and services in salt marshes: a meta-analysis. *Journal of Applied Ecology* 54:1395–1405.
- 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.
- Dijkema, K. S. 1997. Impact prognosis for salt marshes from subsidence by gas extraction in the Wadden Sea. *Journal of Coastal Research* 13:1294–1304.
- Dijkema, K. S., H. F. van Dobben, E. C. Koppenaar, E. M. Dijkman, and W. E. van Duin. 2011. Monitoring effecten van bodemdaling op Ameland-Oost. Evaluatie na 23 jaar gaswinning. - Deel 2 Kwelders. Wageningen.

- 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*.
- Dort, K. W., and A. S. Kers. 2007. Toelichting bij de vegetatiekartering Ameland 2002: op basis van false colour-luchtfoto's 1: 5000.
- 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-salt pans. *Marine and Freshwater Research* 70:1047–1055.
- Ehlers, J. 1988. *The morphodynamics of the Wadden Sea*. Balkema, Rotterdam.
- Elschot, K., M. J. Baptist, and M. E. B. van Puijenbroek. 2023. Biocompacting livestock accelerate drowning of tidal salt marshes with sea level rise. *Frontiers in Marine Science* 10.
- 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*.
- Elschot, K., M. E. B. Van Puijenbroek, D. D. G. Lagendijk, J. T. Van der Wal, and C. Sonneveld. 2020. Lange-termijnontwikkeling van kwelders in de Waddenzee (1960-2018). Wettelijke Onderzoekstaken Natuur & Milieu, WOt-technical report 182. Wageningen, The Netherlands.
- Elsay-Quirk, T., G. Mariotti, K. Valentine, and K. Raper. 2019. Retreating marsh shoreline creates hotspots of high-marsh plant diversity. *Scientific Reports* 9:5795.
- Esselink, P., W. E. van Duin, J. Bunje, J. Cremer, E. O. Folmer, J. Frikke, M. Glahn, A. V. de Groot, N. Hecker, U. Hellwig, K. Jensen, P. Körber, J. Petersen, and M. Stock. 2017. Salt marshes. Page *in* S. Kloepper and E. Al., editors. *Wadden Sea Quality Status Report 2017*. Common Wadden Sea Secretariat, Wilhelmshaven, Germany.
- European Union. 2021. Consolidated text: Regulation (EU) 2018/1091 of the European Parliament and of the Council of 18 July 2018 on integrated farm statistics and repealing Regulations (EC) No 1166/2008 and (EU) No 1337/2011.
- Fagherazzi, S., M. L. Kirwan, S. M. Mudd, G. R. Guntenspergen, S. Temmerman, A. D'Alpaos, J. van de Koppel, J. M. Rybczyk, E. Reyes, C. Craft, and J. Clough. 2012. Numerical models of salt marsh evolution: Ecological, geomorphic, and climatic factors. *Reviews of Geophysics* 50: RG1002.
- Flowers, T. J., and T. D. Colmer. 2008. Salinity tolerance in halophytes. *The New phytologist* 179:945–963.
- Goodwin, G. C. H., and S. M. Mudd. 2019. High platform elevations highlight the role of storms and spring tides in salt marsh evolution. *Frontiers in Environmental Science* 7.
- 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.
- Groot, A. V. de, A. P. Oost, R. M. Veeneklaas, E. J. Lammerts, W. E. van Duin, and B. K. van Wesenbeeck. 2016. Tales of island tails: biogeomorphic development and management of barrier islands. *Journal of Coastal Conservation* 21:409–419.
- Gutter, M. J., J. A. M. Janssen, and A. M. de Meulmeester. 1998. Toelichting bij de vegetatiekartering Ameland-Oost 1993 op basis van false colour-luchtfoto's 1:5000.
- Hamza, M., and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82:121–145.
- 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, M. E. B. van Puijenbroek, and C. Smit. 2016. Facultative grazing and bioturbation by macrodetritivores alter saltmarsh plant-plant interactions under stress. *Journal of Ecology* 104:1149–1157.



- 
- Howison, R. A., H. Oloff, 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.
- Hu, Z., J. van Belzen, D. van der Wal, T. Balke, Z. B. Wang, M. Stive, and T. J. Bouma. 2015. Windows of opportunity for salt marsh vegetation establishment on bare tidal flats: The importance of temporal and spatial variability in hydrodynamic forcing. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 120:1450–1469.
- Jage, T. D. 2010. Toelichting bij de vegetatiekartering Ameland 2008: op basis van false colour-luchtfoto's 1: 5.000.
- 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.
- van de Koppel, J., J. Huisman, R. van der Wal, and H. Oloff. 1996. Patterns of Herbivory Along a Productivity Gradient: An Empirical and Theoretical Investigation. *Ecology* 77:736–745.
- Krol, J., and L. Saathof. 2023. Begrazingsonderzoek Neerlands Reid.
- Kuiters, A. T., and R. M. A. Wegman. 2020. Veranderingen in morfologie kwelderrand en kwelderdrainage op Oost-Ameland in relatie tot bodemdaling. Wageningen.
- Londo, G. 1976. The decimal scale for relevés of permanent quadrats. *Vegetatio* 33:61–64.
- Marani, M., A. D'Alpaos, S. Lanzoni, and M. Santalucia. 2011. Understanding and predicting wave erosion of marsh edges. *Geophysical Research Letters* 38: n/a-n/a.
- Marin-Diaz, B., L. L. Govers, D. van der Wal, H. Oloff, and T. J. Bouma. 2021. How grazing management can maximize erosion resistance of salt marshes. *Journal of Applied Ecology* 58:1533–1544.
- Mariotti, G. 2016. Revisiting salt marsh resilience to sea level rise: Are ponds responsible for permanent land loss? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 121:1391–1407.
- Marietta, G. 2020. Beyond marsh drowning: The many faces of marsh loss (and gain). *Advances in Water Resources* 144:103710.
- Mossman, H. L., A. Grant, and A. J. Davy. 2020. Manipulating saltmarsh microtopography modulates the effects of elevation on sediment redox potential and halophyte distribution. *Journal of Ecology* 108:94–106.
- NAM. 2021. Gaswinning Moddergat/Lauwersoog/Vierhuizen: Technische bijlage behorend by het geactualiseerde Meet- en Regelprotocol 2021.
- NAM. 2023. Gaswinning vanaf de locaties Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen - Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2022.
- Nolte, S., C. van der Weyde, P. Esselink, C. Smit, S. E. van Wieren, and J. P. Bakker. 2017. Behaviour of horses and cattle at two stocking densities in a coastal salt marsh. *Journal of Coastal Conservation* 21:369–379.
- Nolte, S., E. C. Koppenaal, 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.
- NVWA. 2023. Grootvee eenheden (GVE) nieuwe Controleverordening.
- Oloff, 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.
- Peralta, G., L. van Duren, E. Morris, and T. Bouma. 2008. Consequences of shoot density and stiffness for ecosystem engineering by benthic macrophytes in flow dominated areas: a hydrodynamic flume study. *Marine Ecology Progress Series* 368:103–115.
- Petersen, J., B. Kers, and M. Stock. 2014. TMAP-Typology of Coastal Vegetation in the Wadden Sea Area. Wilhelmshaven, Germany.
- Pranger, D. P., and M. E. Tolman. 2016. Toelichting bij de vegetatiekartering Ameland 2014: op basis van false colour-luchtfoto's 1:5:000.
- R Core team. 2022. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

- van Regteren, M., I. Colosimo, P. Vries, M. E. B. van Puijenbroek, V. S. Freij, M. J. Baptist, and K. Elschot. 2019. Limited seed retention during winter inhibits vegetation establishment in spring, affecting lateral marsh expansion capacity. *Ecology and Evolution* 9:13294–13308.
- van Regteren, M., E. H. Meesters, M. J. Baptist, A. V. de Groot, T. J. Bouma, and K. Elschot. 2020. Multiple Environmental Variables Affect Germination and Mortality of an Annual Salt Marsh Pioneer: *Salicornia procumbens*. *Estuaries and Coasts* 43:1489–1501.
- Scheffer, M., S. Carpenter, J. A. Foley, C. Folke, and B. Walker. 2001, October 11. Catastrophic shifts in ecosystems. Nature Publishing Group.
- Schrama, M. 2012. The assembly of a saltmarsh ecosystem; the interplay of green and brown food web. University of Groningen.
- Schrama, M., P. Heijning, J. P. Bakker, H. J. van Wijnen, M. P. Berg, and H. Olf. 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.
- Schuerch, M., A. Vafeidis, T. Slawig, and S. Temmerman. 2013. Modeling the influence of changing storm patterns on the ability of a salt marsh to keep pace with sea level rise. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118:84–96.
- Silliman, B. R., J. van de Koppel, M. D. Bertness, L. E. Stanton, and I. A. Mendelsohn. 2005. Drought, Snails, and Large-Scale Die-Off of Southern U.S. Salt Marshes. *Science* 310:1803–1806.
- Silvestri, S., A. Defina, and M. Marani. 2005. Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 62:119–130.
- Suchrow, S., N. Pohlmann, M. Stock, and K. Jensen. 2011. Long-term surface elevation changes in German North Sea salt marshes.
- Temmerman, S., G. Govers, P. Meire, and S. Wartel. 2003a. Modelling long-term tidal marsh growth under changing tidal conditions and suspended sediment concentrations, Scheldt estuary, Belgium. *Marine Geology* 193:151–169.
- Temmerman, S., G. Govers, S. Wartel, and P. Meire. 2003b. SPATIAL AND TEMPORAL FACTORS CONTROLLING SHORT-TERM SEDIMENTATION IN A SALT AND FRESHWATER TIDAL MARSH, SCHELDT ESTUARY, BELGIUM, SW NETHERLANDS. *Earth Surf. Process. Landforms* 28:739–755.
- 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.
- Veldhuis, E. R., M. Schrama, M. Staal, and J. T. M. Elzenga. 2019. Plant Stress-Tolerance Traits Predict Salt Marsh Vegetation Patterning. *Frontiers in Marine Science* 5.
- Vermeersen, B. L. A., A. B. A. Slangen, T. Gerkema, F. Baart, K. M. Cohen, S. Dangendorf, M. Duran-Matute, T. Frederikse, A. Grinstead, M. P. Hijma, S. Jevrejeva, P. Kiden, M. Kleinherenbrink, E. W. Meijles, M. D. Palmer, R. Rietbroek, R. E. M. Riva, E. Schulz, D. C. Slobbe, M. J. R. Simpson, P. Sterlini, P. Stocchi, R. S. W. Van De Wal, and M. Van Der Wegen. 2018. Sea-level change in the Dutch Wadden Sea. *Netherlands Journal of Geosciences* 97:79–127.
- Wang, Z., and J. Krol. 2023. Monitoring effecten bodemdaling door gaswinning Ameland-oost.
- Westhoff, V., P. A. Bakker, C. G. van Leeuwen, and E. E. van der Voo. 1970. Wilde planten, flora en vegetatie in onze natuurgebieden. First. de Lange / van Leer n.v., Deveter.
- Van Wijnen, H. J., and J. P. Bakker. 1997. Nitrogen accumulation and plant species replacement in three salt marsh systems in the Wadden Sea. *Journal of Coastal Conservation* 3:19–26.
- 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.
- Wood, S. N. 2017. *Generalized Additive Models: An Introduction with R*. Second edition. Chapman and Hall/CRC.
- 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 C015/24

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. M.J. Baptist  
Collega-onderzoeker

Handtekening: 

Datum: 19 maart 2024

Akkoord: Dr. A.M. Mouissie  
Business Manager Projecten

Handtekening: 

Datum: 19 maart 2024

# Bijlage 1 Vergelijking SEB methode - opslibbingsplaat

**Tabel B 1** Vergelijking van de opslibbing per jaar (mm/j) tussen de sedimentatie en erosie balk en de opslibbingsplaat voor 2017 – 2022.

Neerlands Reid													
jaar	301		304		307		317		321		323		
	SEB	Plaat	SEB	Plaat	SEB	Plaat	SEB	Plaat	SEB	Plaat	SEB	Plaat	
2017	8	14	0	10	4	10	-1	-20	-1	0	4	7	
2018	11	-5	3	5	5	0	4	7	1	-6	1	-19	
2019	7	16	9	7	9	11	0	8	3	0	-	19	
2020	10	9	19	6	8	12	3	-8	2	5	-	-5	
2021	2	0	-3	0	-3	0	-5	-5	-5	-10	-	-7	
2022	11	21	11	19	11	13	11	13	-2	13	0	25	

Hon						
Jaar	904		906		908	
	SEB	Plaat	SEB	Plaat	SEB	Plaat
2017	5	10	6	7	-3	7
2018	1	-7	7	7	5	5
2019	8	2	12	10	-	0
2020	-1	15	5	-6	4	-2
2021	2	-5	6	17	1	3
2022	5	22	12	19	3	9

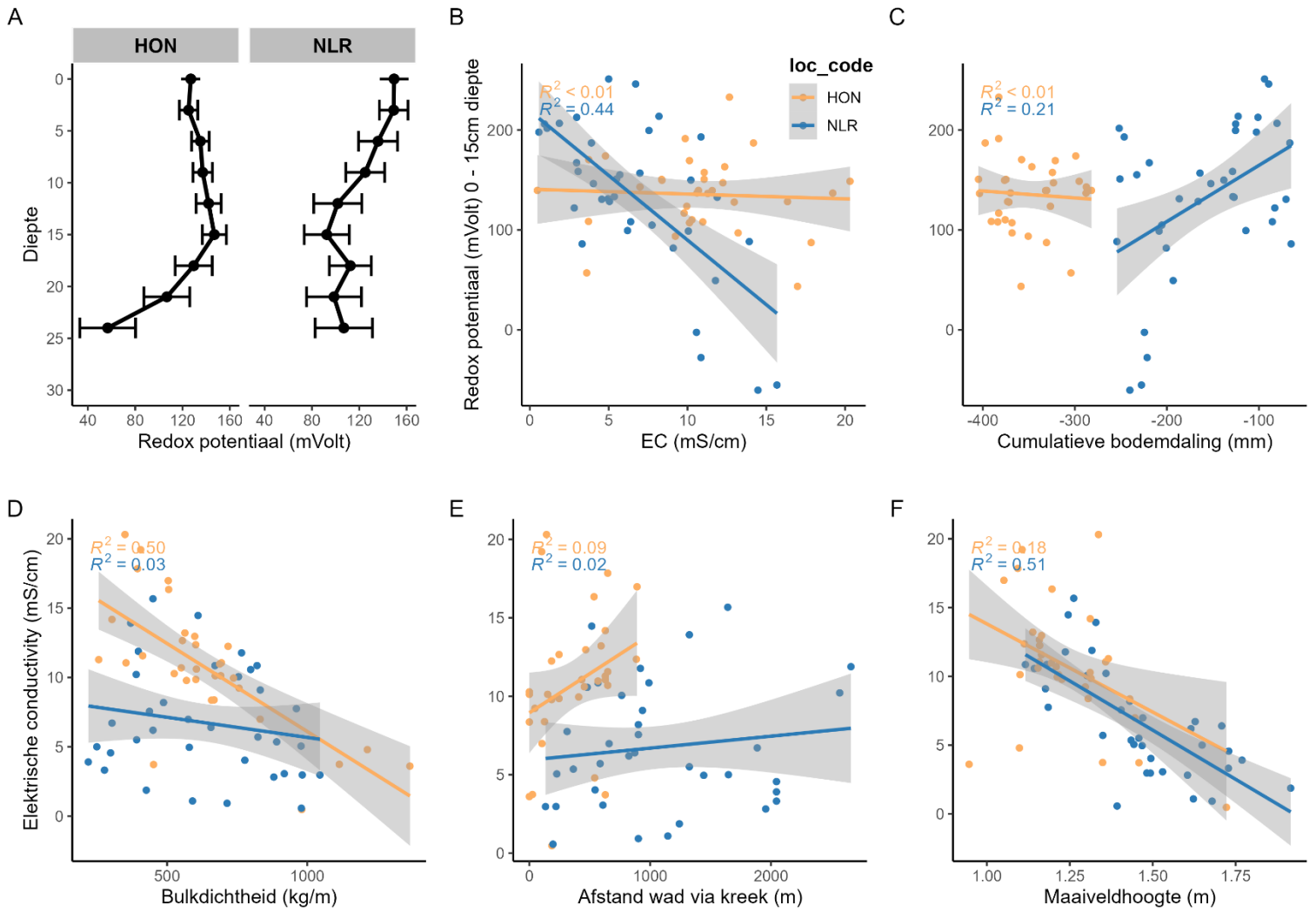
## Bijlage 2 Vergelijking SEB methode - opslibbingsplaat

**Tabel B 2** Statistische resultaten van een generaal additief model gebaseerd op de kleidikte weergegeven voor beide locaties samen (volledig model) en apart weergegeven voor het Neerlands Reid (NLR) en De Hon. Gebied en kwelderleeftijd zijn in het model meegenomen als een lineaire relatie. Grijs cellen geven aan dat de betreffende factoren niet zijn meegenomen in het model.

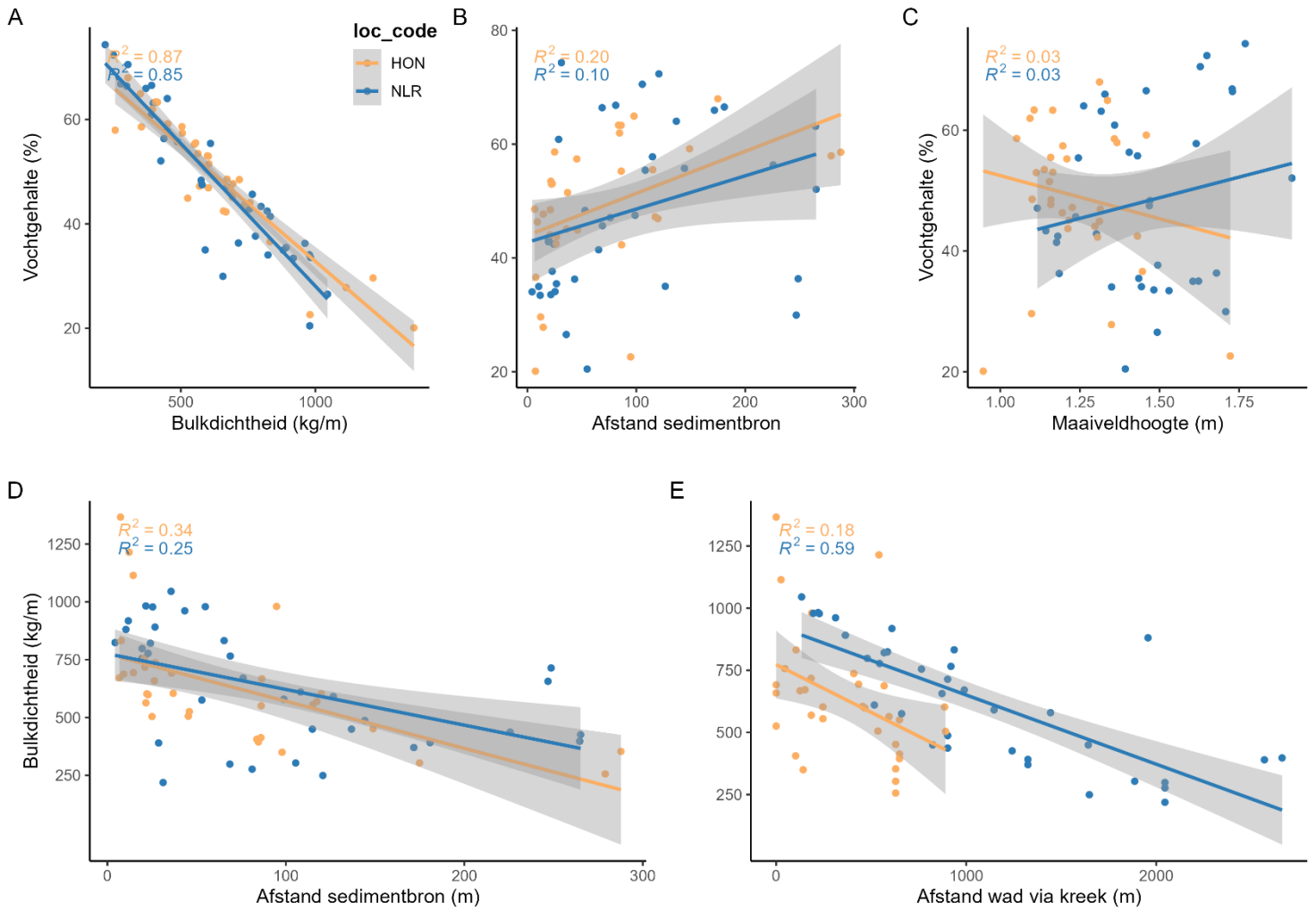
	Kleidikte		
	Volledig model	Model NLR	Model De Hon
<b>Linear fit (t-values)</b>			
Intercept	18.27***	121.9***	15.02***
Gebied	-7.11***		
Ouderdom kwelder	-18.08***		-14.71***
<b>Smoothed fit (F-values)</b>			
S(Zandlaaghoogte)	176.75***	149.4***	106.48***
S(Afstand tot de kwelderrand)	66.03***	100.5***	8.41***
S(Afstand tot de kreek)	9.15***	12.4***	5.74***
Observatie	1272	767	505
Variatie verklaard	78.7%	83.7%	78.6%

Note: \*\*\* p > 0.001

# Bijlage 3 Abiotische factoren

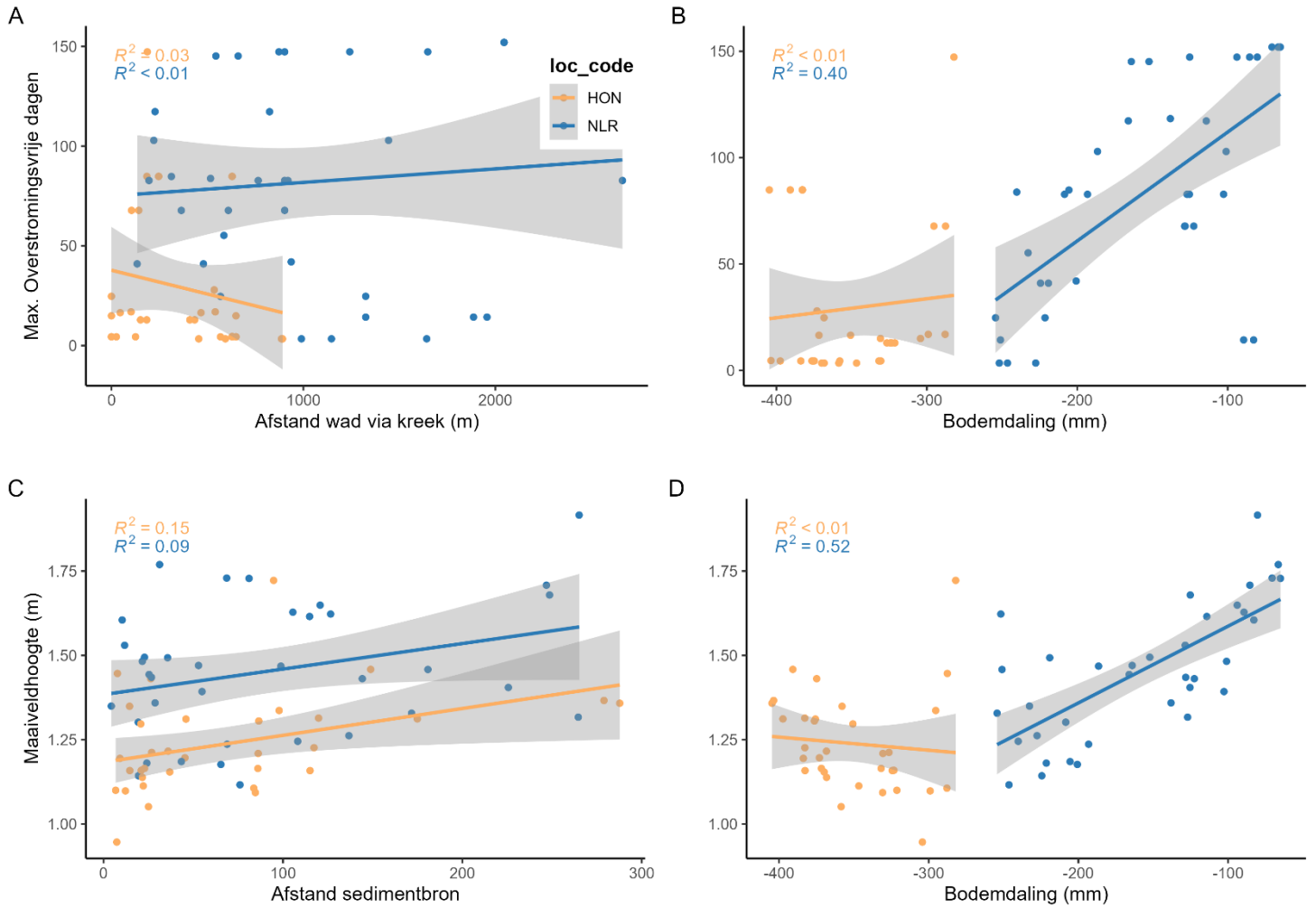


**Figuur B 1** A) Redoxpotentiaal (mVolt) over diepte; B) Relatie EC en redoxpotentiaal; C) Relatie cumulatieve bodemdaling en redoxpotentiaal; D) Relatie bulkdichtheid en EC; E) Relatie afstand wad via kreek en EC; F) Relatie maaiveldhoogte en EC. De kleuren geven de verschillende gebieden aan. De 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



**Figuur B 2** A) Relatie bulkdichtheid en vochtgehalte; B) Relatie afstand sedimentbron en vochtgehalte; C) Relatie maaiveldhoogte en vochtgehalte; D) Relatie afstand sedimentbron en bulkdichtheid; E) 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.

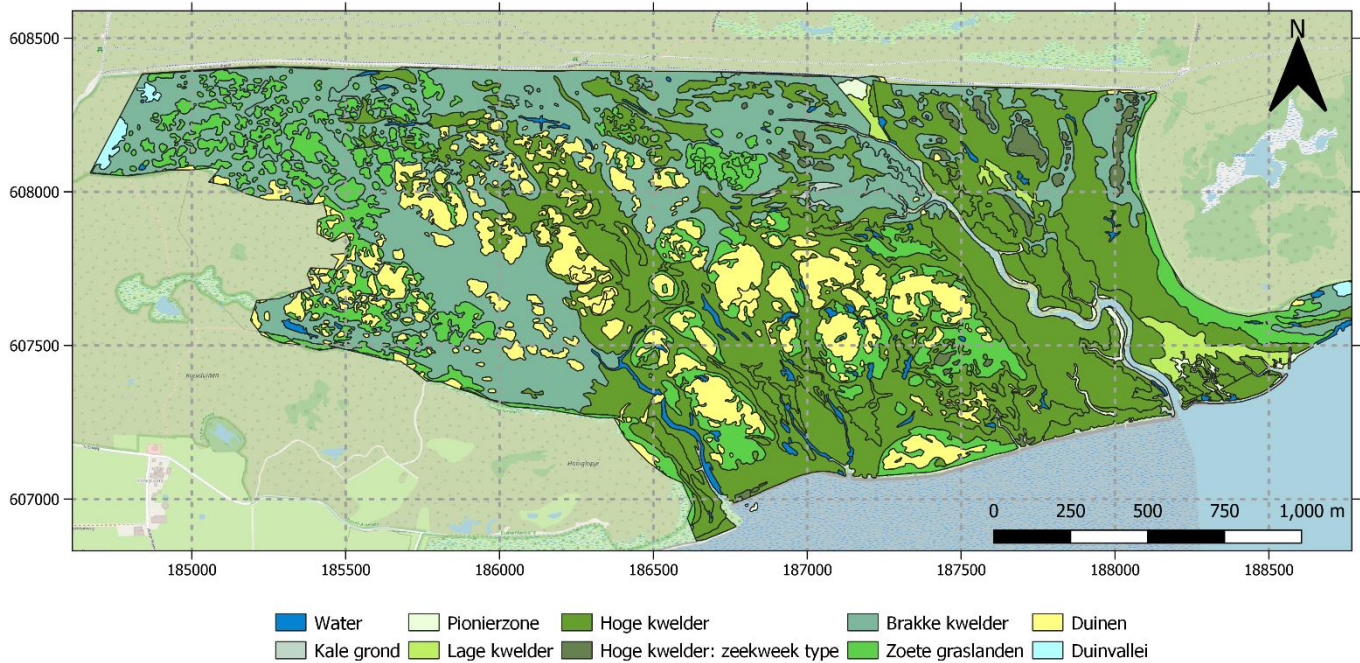




**Figuur B 3** A) Relatie afstand wad via de kreek en overstroomingsvrije periode; B) Relatie cumulatieve gemodelleerde bodemdaling en overstroomingsvrije periode; C) Relatie afstand sedimentbron en maaiveldhoogte; D) Relatie cumulatieve bodemdaling en maaiveldhoogte. De kleuren geven de verschillende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

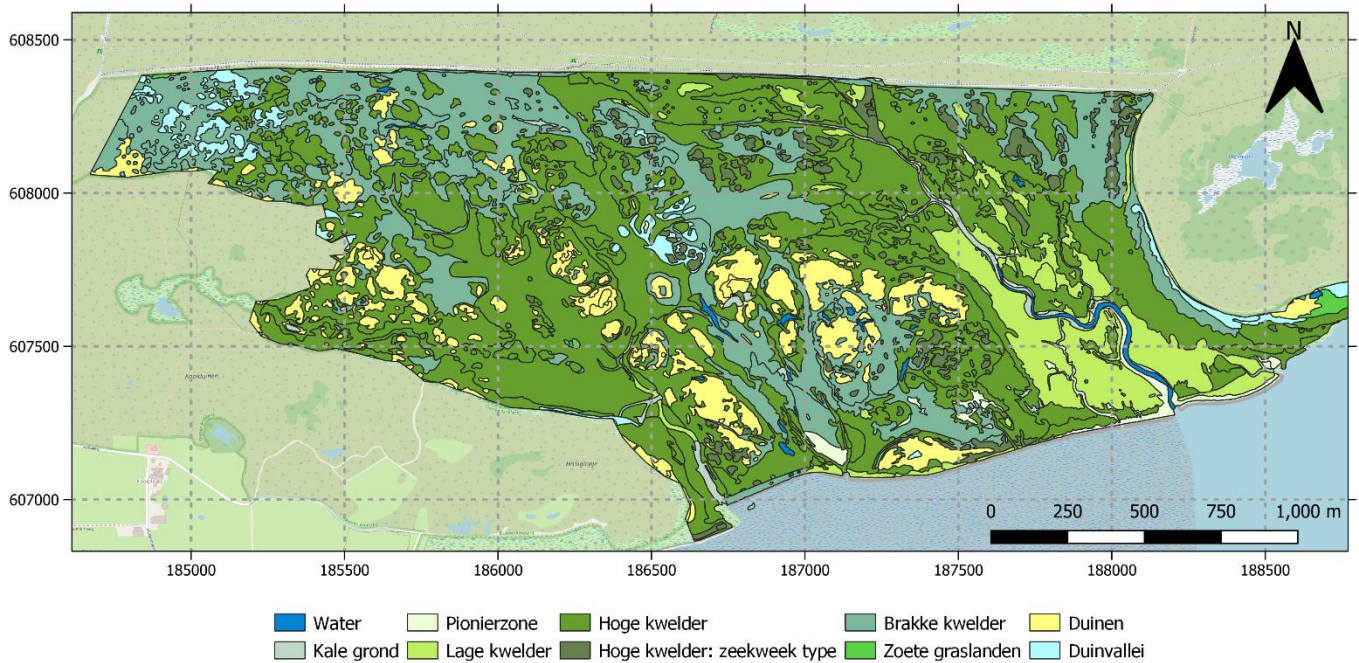
# Bijlage 4 Vegetatiekaarten

## Vegetatiekaart Neerlands Reid 1993



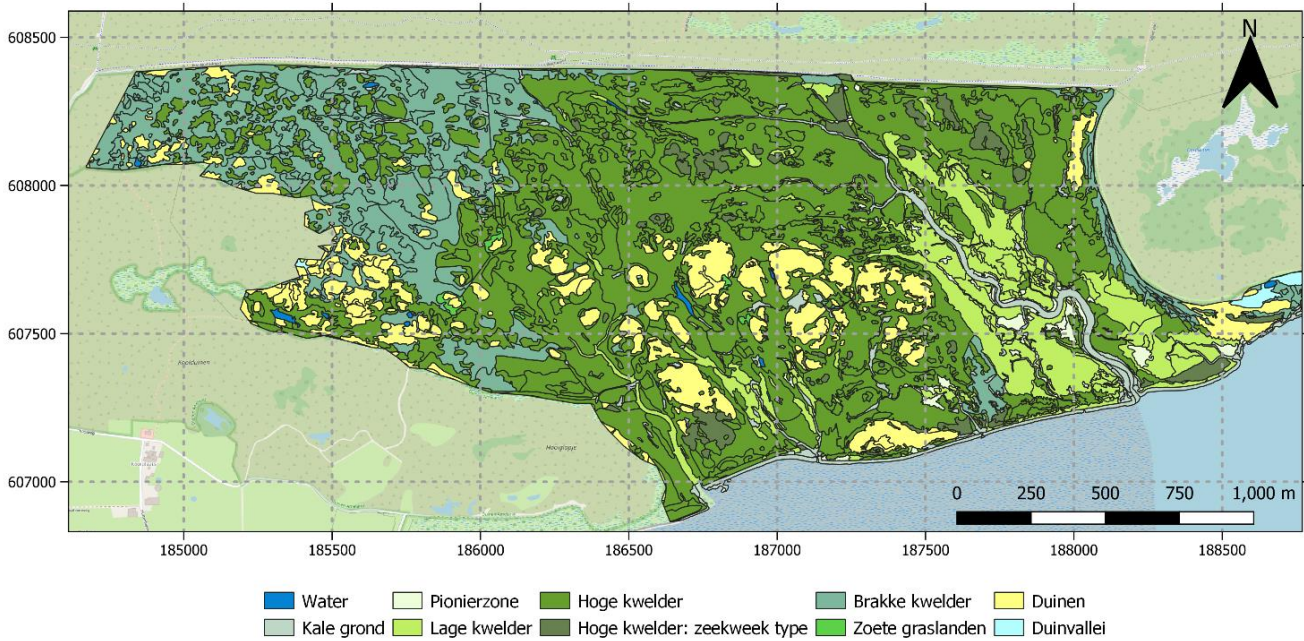
**Figuur B 5** Vegetatiekaart 1993 Neerlands Reid, de typologie is TMAP-typologie.

## Vegetatiekaart Neerlands Reid 2003



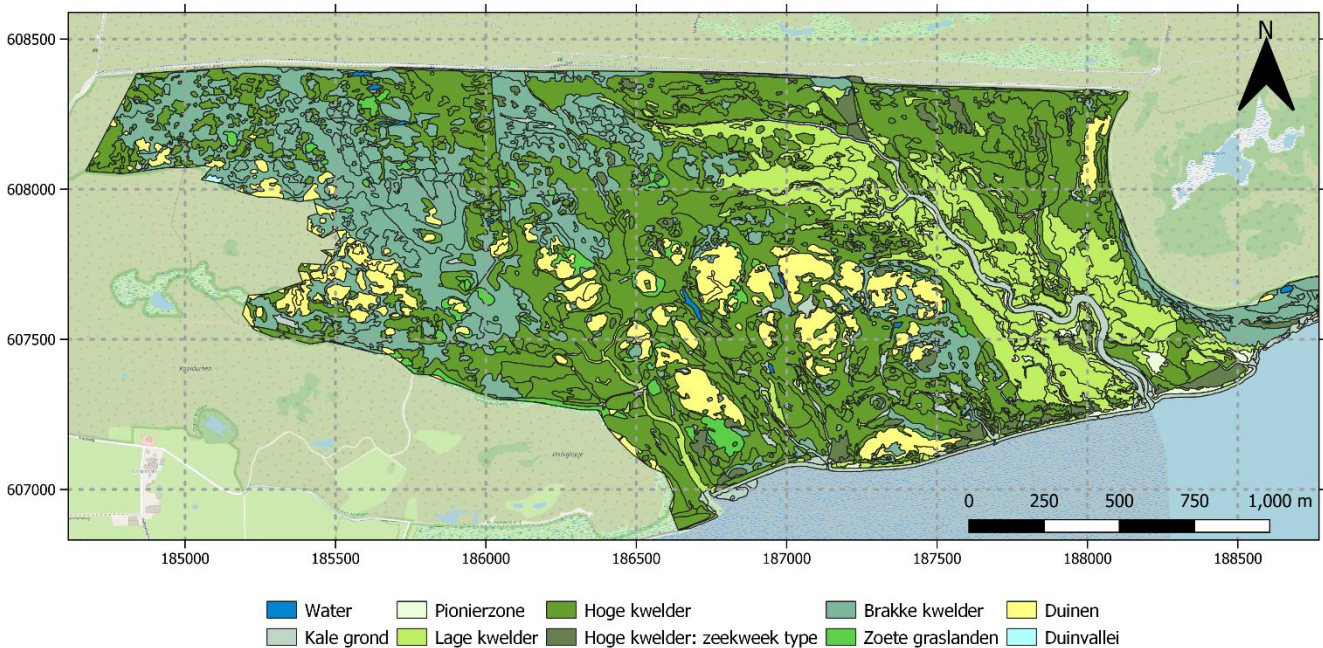
**Figuur B 4** Vegetatiekaart 2003 Neerlands Reid, de typologie is TMAP-typologie.

## Vegetatiekaart Neerlands Reid 2008



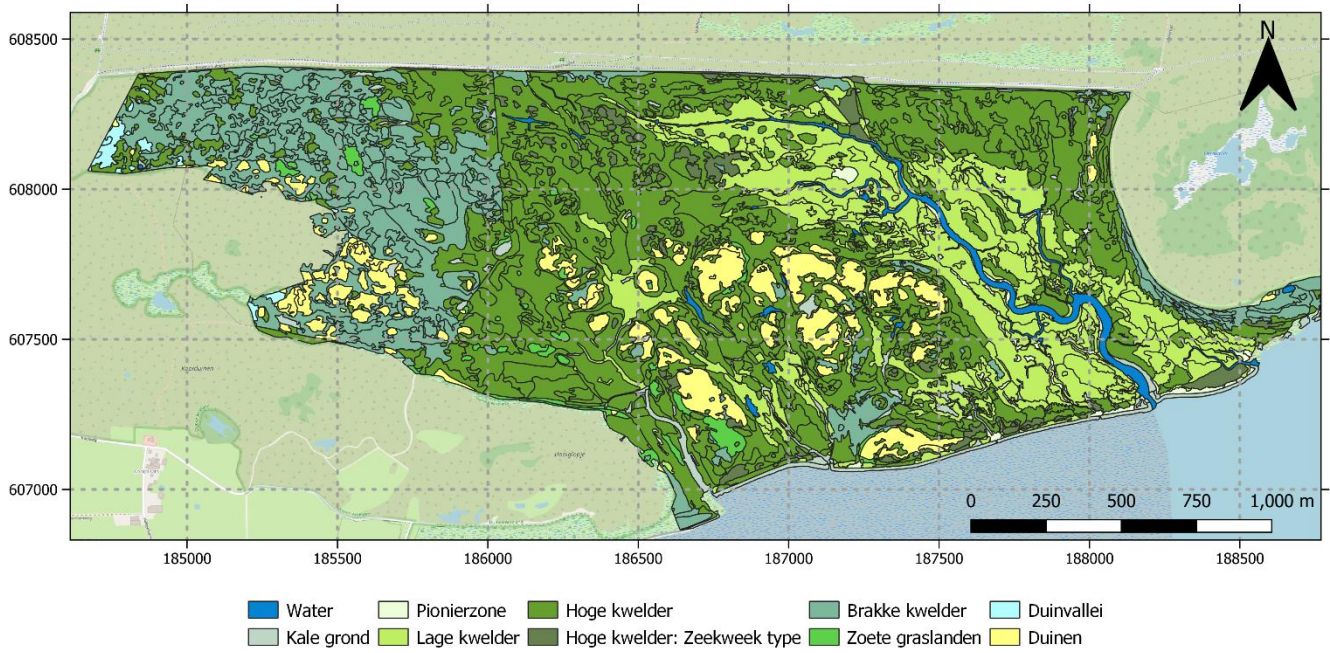
**Figuur B 7** Vegetatiekaart 2008 Neerlands Reid, de typologie is TMAP-typologie.

## Vegetatiekaart Neerlands Reid 2014



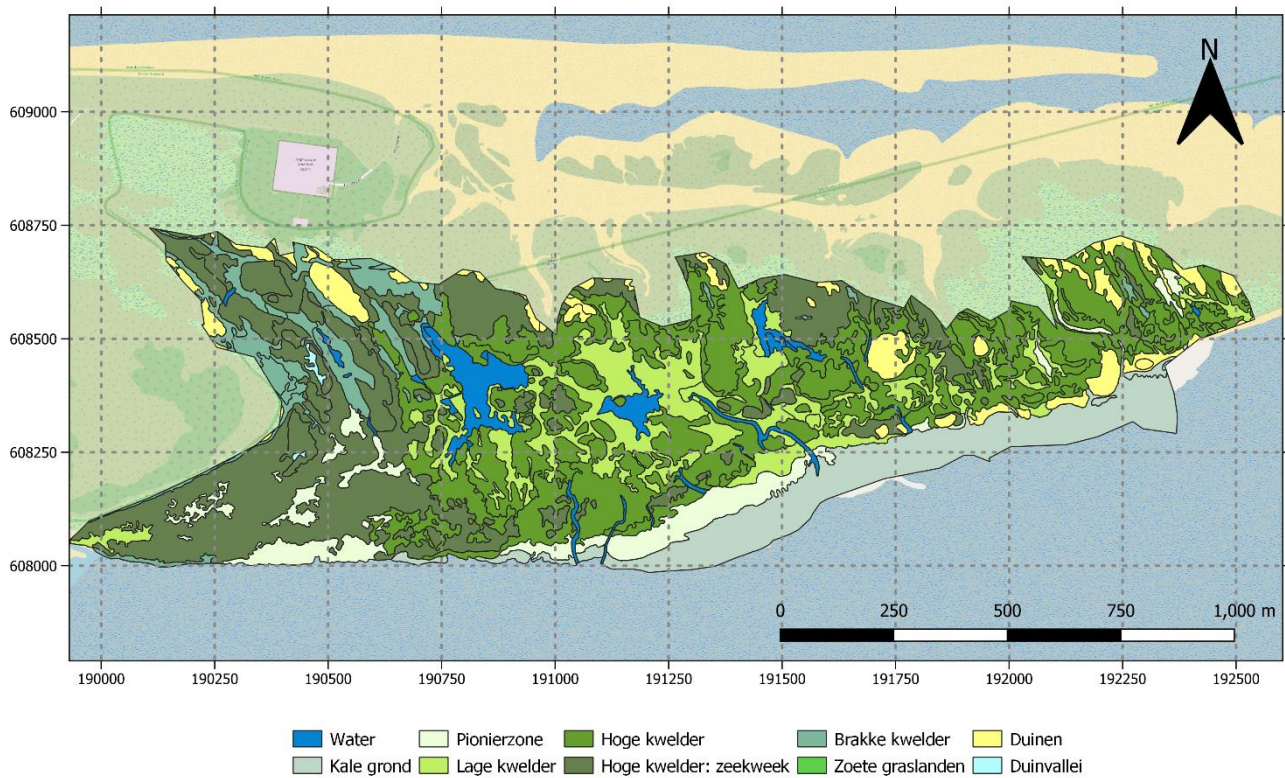
**Figuur B 6** Vegetatiekaart 2014 Neerlands Reid, de typologie is TMAP-typologie.

## Vegetatiekaart Neerlands Reid 2020



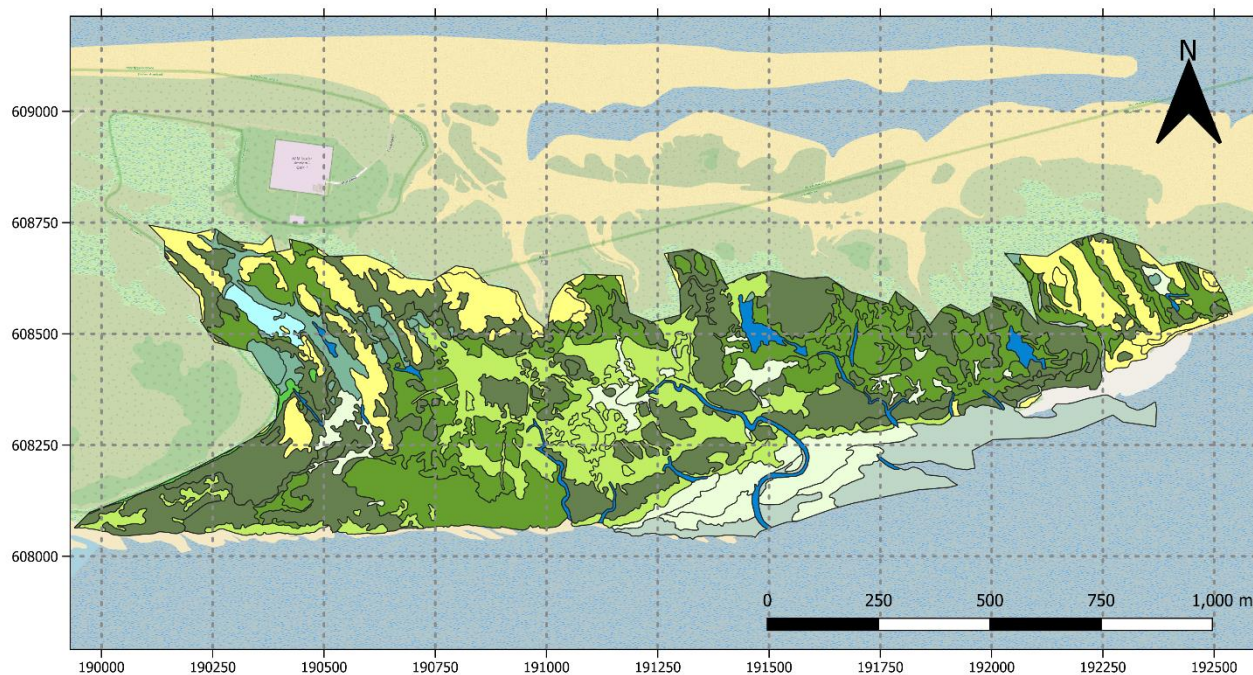
**Figuur B 9** Vegetatiekaart 2014 Neerlands Reid, de typologie is TMAP-typologie.

## Vegetatiekaart Hon 1993



**Figuur B 8** Vegetatiekaart 1993 de Hon, de typologie is TMAP-typologie.

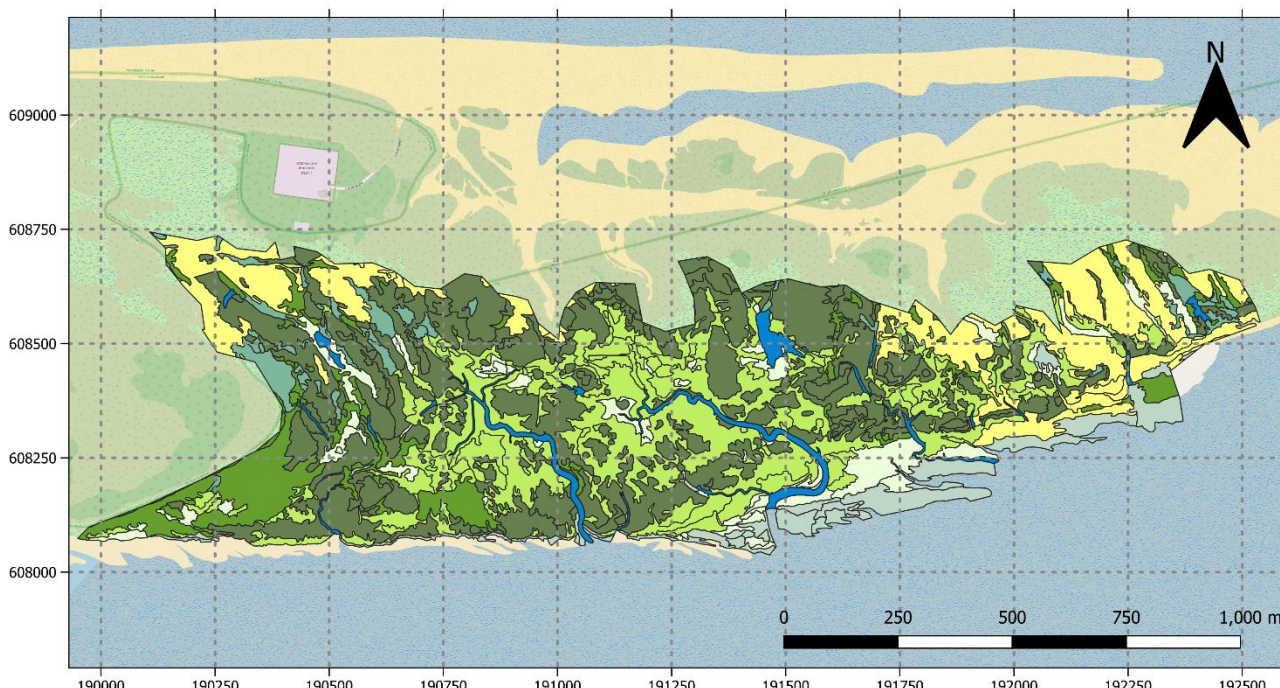
### Vegetatiekaart Hon 2003



- Water
- Pionierzone
- Hoge kwelder
- Brakke kwelder
- Duinen
- Kale grond
- Lage kwelder
- Hoge kwelder: zeekweek
- Zoete graslanden
- Duinvallei

**Figuur B 11** Vegetatiekaart 2003 de Hon, de typologie is TMAP-typologie.

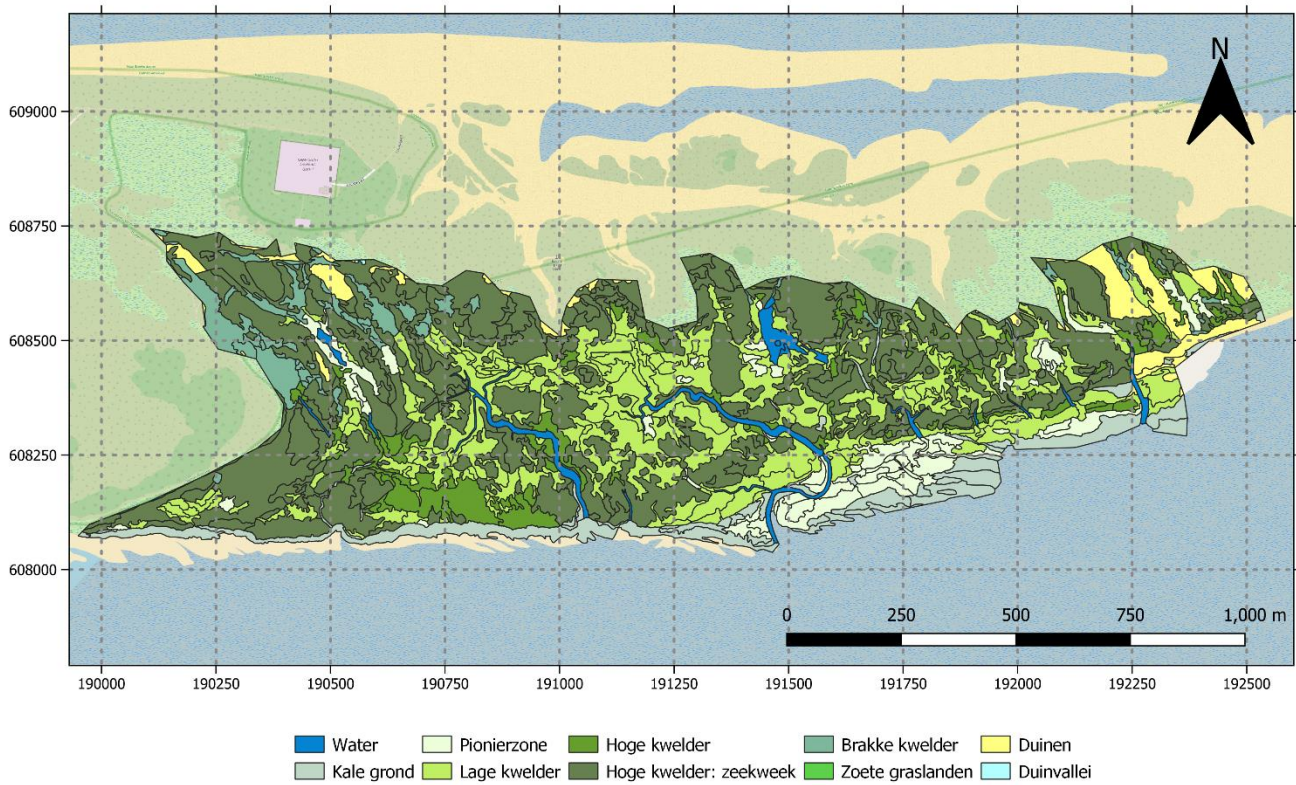
### Vegetatiekaart Hon 2008



- Water
- Pionierzone
- Hoge kwelder
- Brakke kwelder
- Duinen
- Kale grond
- Lage kwelder
- Hoge kwelder: zeekweek
- Zoete graslanden
- Duinvallei

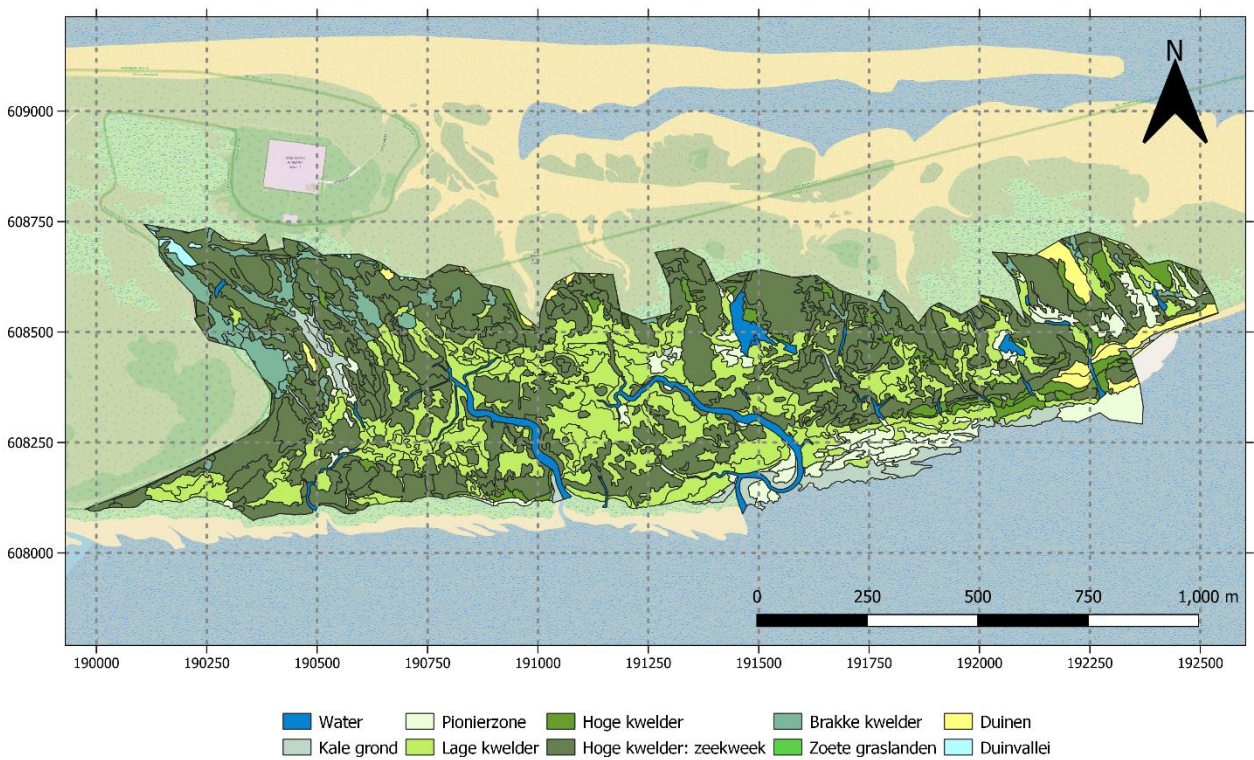
**Figuur B 10** Vegetatiekaart 2008 de Hon, de typologie is TMAP-typologie.

## Vegetatiekaart Hon 2014



**Figuur B 13** Vegetatiekaart 2014 de Hon, de typologie is TMAP-typologie.

## Vegetatiekaart Hon 2020



**Figuur B 12** Vegetatiekaart 2020 de Hon, de typologie is TMAP-typologie.

---

## Bijlage 5 Statistische tabel vegetatieverandering

**Tabel B 3** Anova type III resultaten voor de gemiddelde vegetatieverandering voor het Neerlands Reid en De Hon. F-waardes zijn hier weergegeven met de p-waardes in asterisk.

Factoren	NLR	Hon
Maaiveldhoogte	2.81	3.21
Afstand sedimentbron	4.68*	1.67
Afstand sedimentbron tot wad	0.63	1.67
Gebied	5.57**	-
Maaiveldhoogte x afstand sedimentbron	4.95*	1.70
Maaiveldhoogte x afstand sedimentbron tot wad	0.79	2.16
Maaiveldhoogte x gebied	4.70*	
Residuals	85	46

p-waardes: \* < 0.05, \*\* < 0.01, \*\*\* < 0.001

# Bijlage 6 Resultaten PQ + EQ oorspronkelijk en nieuw meetnet

**Tabel B 4** Lineaire modellen met bedekking kale grond, zeekraal en klein schorrekruid. De modellen worden gerelateerd aan de abiotische factoren.

Factoren	Bed. kale grond	Bed. Zeekraal	Bed. klein schorrekruid
Intercept	-1.05	-2.09*	-1.7
Redox	-1.67	-2.86**	0.89
Bulkdichtheid	1.86	3.24**	2.02*
Vochtgehalte	0.96	1.81	1.23
Elektrische conductiviteit	0.41	0.74	1.53
Organische stof	0.48	0.65	-0.11
Max. inundatievrije-periode	-0.68	0.52	-0.27
Locatie	0.56	1.11	0.06
log link			
F-statistics	2.21**	5.42**	1.66**
R2	0.11	0.31	0.06
AIC	542	489	567
BIC	562	509	587
DF residual	61	61	61

p-waardes: \* < 0.05, \*\* < 0.01, \*\*\* < 0.001

**Tabel B 5** Canonical Correspondence Analysis (CCA) van het oorspronkelijke meetnet en nieuwe meetnet. Voor het nieuwe meetnet zijn de twee gebieden apart geanalyseerd. Voor het oude meetnet zijn de locaties samen geanalyseerd omdat er anders niet genoeg PQ's zijn. Een anova van de omgevingsvariabelen, deze anova's had 999 permutaties.

Factoren	Oud meetnet	Nieuw meetnet	
	NLR + HON	NLR	Hon
Maaiveldhoogte	3.67***	4.24***	4.22**
Maaiveldhoogte verandering	1.77	-	-
Max. inundatie vrije periode	-	1.06	0.86
Bodemdaling	-	1.63*	1.99*
Afstand sedimentbron	1.09	1.13	3.25***
Afstand wad via kreek	0.95	2.40**	1.53
Locatie	2.68**	-	-
Gebieden	-	2.81***	-
R <sup>2</sup>	0.3	0.19	0.16
Df	30	105	76

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

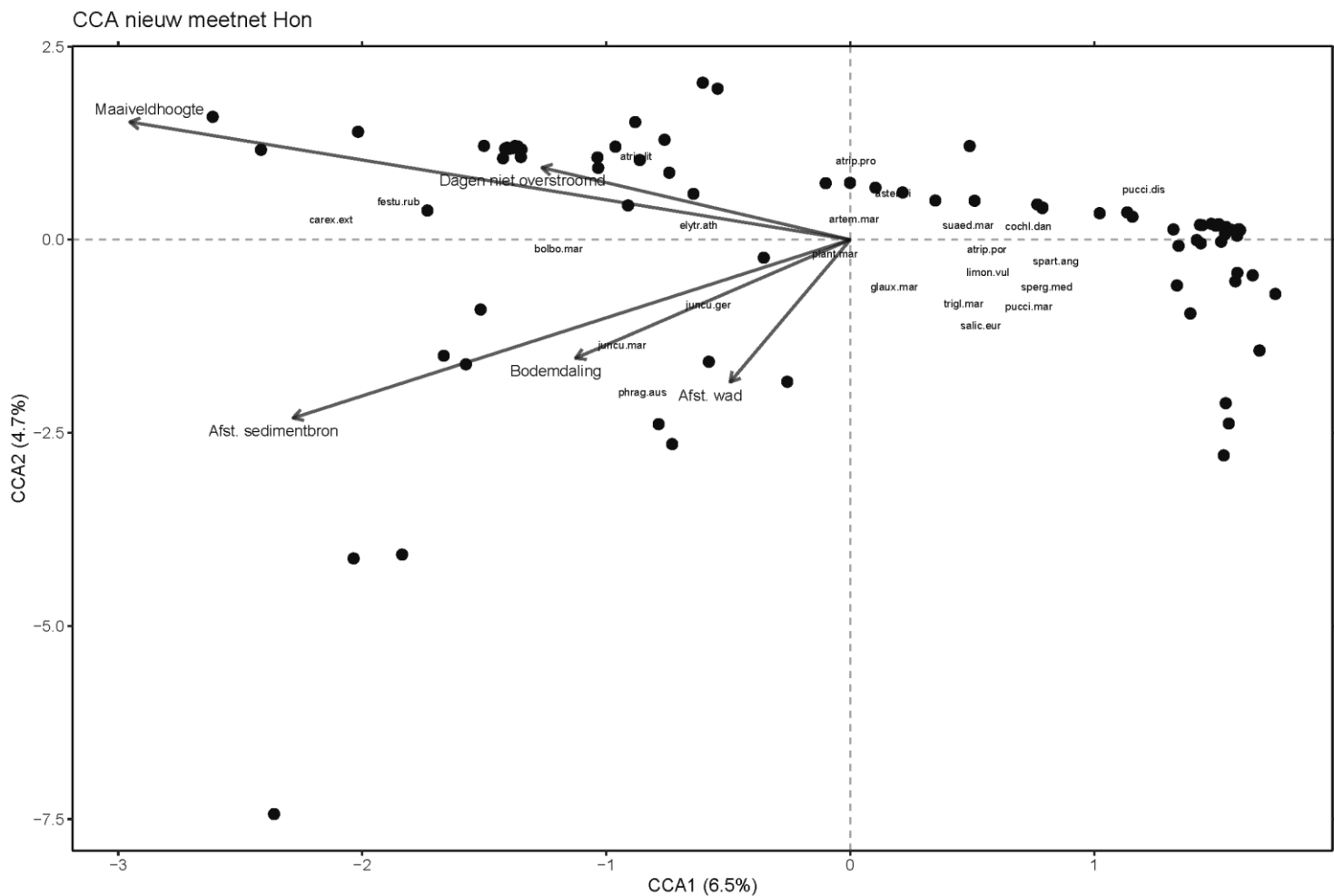


**Tabel B 6** Canonical Correspondence Analysis (CCA) met het nieuwe meetnet waar de gebieden apart zijn geanalyseerd. Een anova met 999 permutaties van de abiotische omstandigheden.

Factoren	Nieuw meetnet	
	NLR	Hon
Redox	1.39	1.16
Bulkdichtheid (kg/m <sup>3</sup> )	1.24	1.32
Vochtgehalte (%)	1.30	0.51
EC mS/cm	2.50**	1.76
Organische stof (%)	0.91	2.50**
Maximale inundatievrije-periode	2.89***	1.05
Section		
R <sup>2</sup>	0.36	0.31
Df	36	32

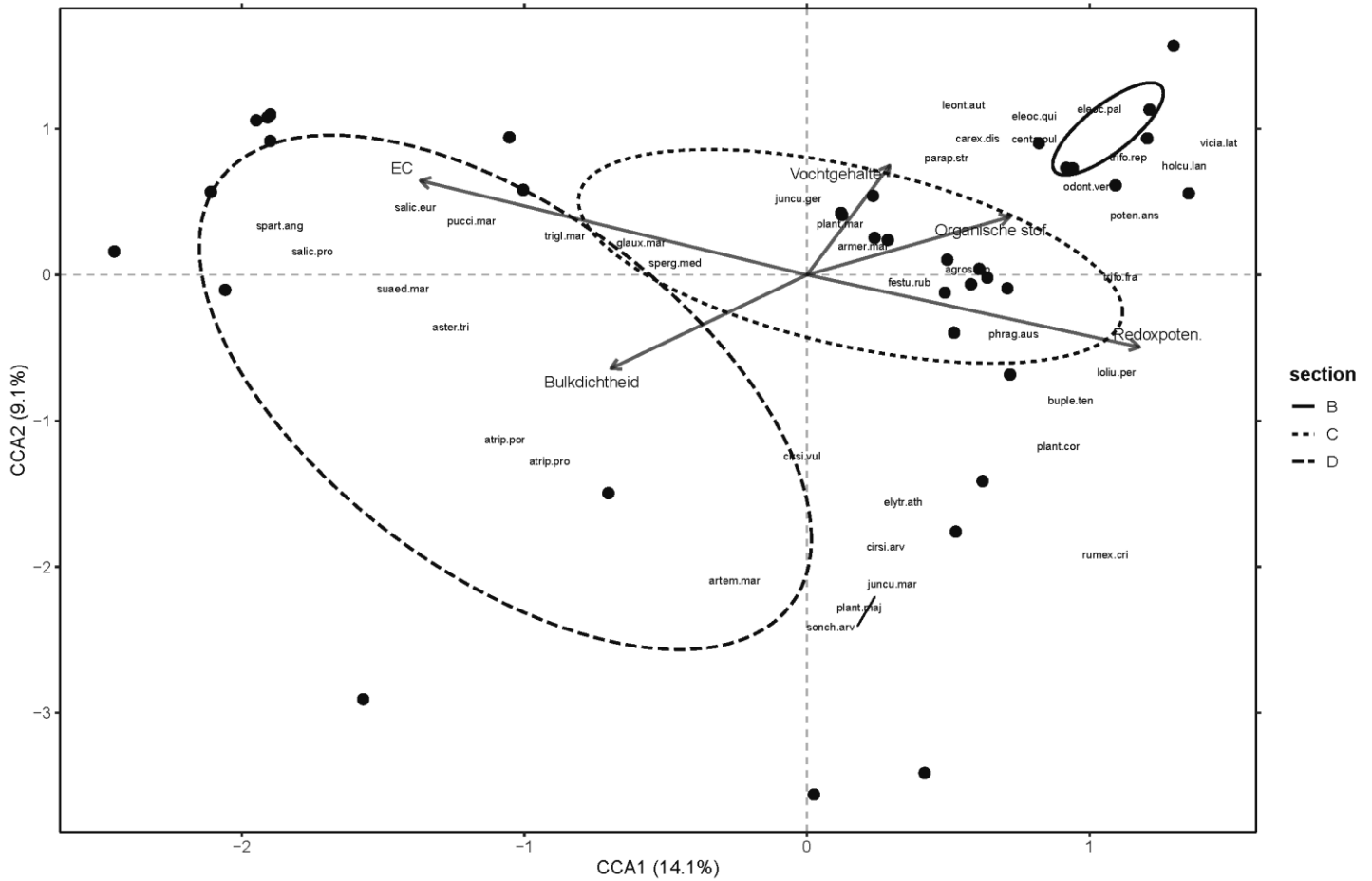
p-waarde: \* < 0.05, \*\* < 0.01, \*\*\* < 0.001





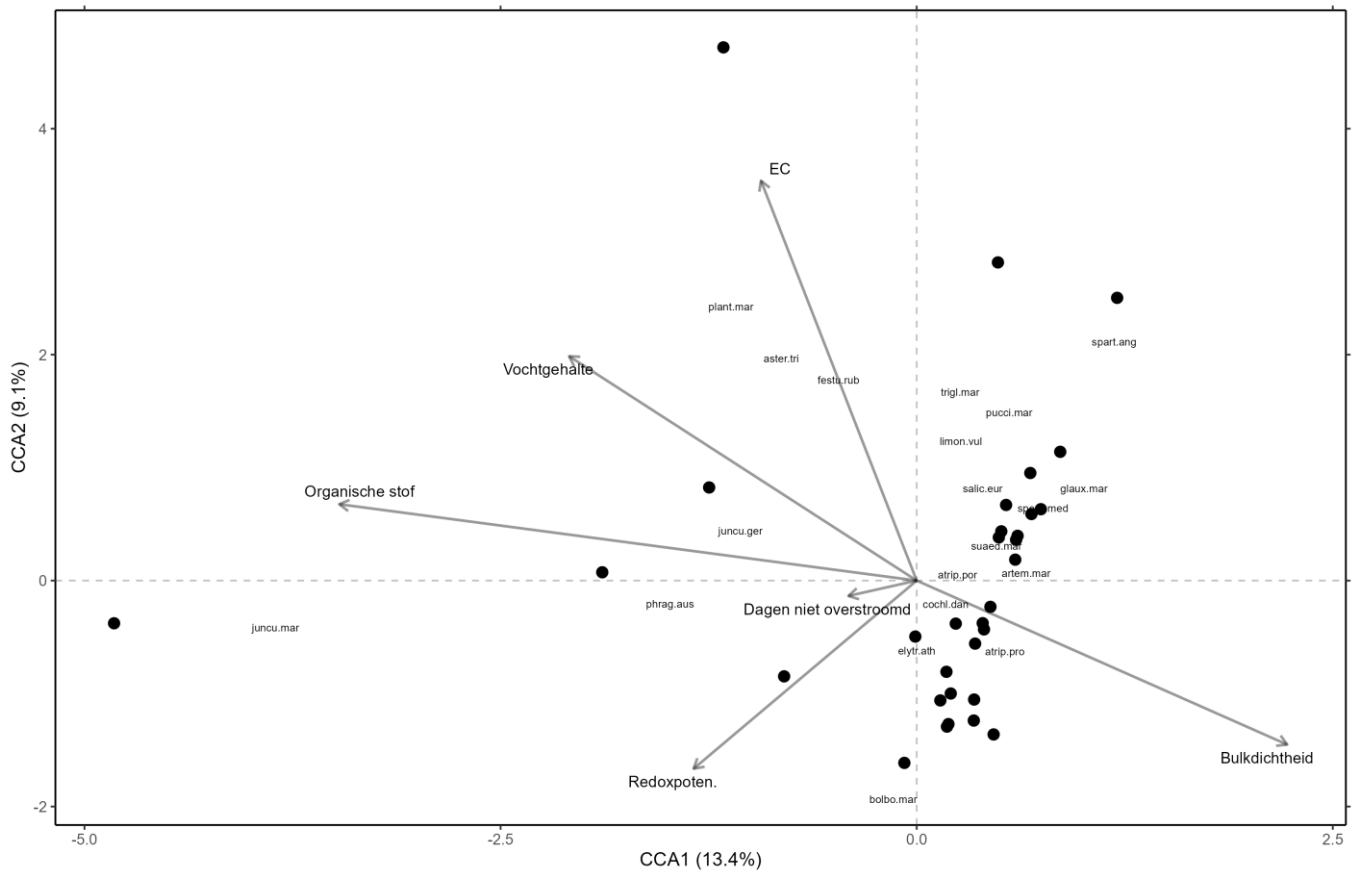
**Figuur B 15** Resultaten van Canonical Correspondence Analyse (CCA) van de PQ's in het nieuwe meetnet op de Hon. De pijlen geven aan waar de omgevingsvariabelen het hoogst zijn. De locaties van de plantensoorten visualiseren waar ze dominant zijn. Voor de plantensoorten zijn de wetenschappelijke namen gebruikt.

CCA nieuw meetnet NLR – abiotische variabelen



**Figuur B 16** Resultaten van Canonical Correspondence Analyse (CCA) van de PQ's in het nieuwe meetnet op het Neerlands Reid. De pijlen geven aan waar de abiotische variabelen het hoogst zijn. De locaties van de plantensoorten visualiseren waar ze dominant zijn. Voor de plantensoorten zijn de wetenschappelijke namen gebruikt. De cirkels geven de standard error van de verschillende beweidinggebieden weer.

CCA nieuw meetnet HON - abiotische variabelen



**Figuur B 17** Resultaten van Canonical Correspondence Analyse (CCA) van de PQ's in het nieuwe meetnet op 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 plantensoorten zijn de wetenschappelijke 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'

---

**Certificate Of Completion**

Envelope Id: AD5F02BCFF494B0E999E9FACC263CB67	Status: Completed
Subject: Complete with DocuSign: C015.24 Rapport Ontwikkeling kwelders ... gaswinning - FINAL - M.v.Puij...	
Source Envelope:	
Document Pages: 86	Signatures: 2
Certificate Pages: 2	Initials: 0
AutoNav: Enabled	Envelope Originator:
Envelopeld Stamping: Disabled	WMR Secretariaat
Time Zone: (UTC+01:00) Amsterdam, Berlin, Bern, Rome, Stockholm, Vienna	Postbus 9101
	Wageningen, Gelderland 6700 HB
	secretariaat.marine-research@wur.nl
	IP Address: 137.224.252.11

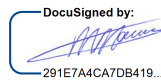
**Record Tracking**

Status: Original	Holder: WMR Secretariaat	Location: DocuSign
3/19/2024 4:17:04 PM	secretariaat.marine-research@wur.nl	

**Signer Events**

Maarten Mouissie  
 maarten.mouissie@wur.nl  
 Security Level: Email, Account Authentication (None)

**Signature**



Signature Adoption: Uploaded Signature Image  
 Using IP Address: 137.224.252.13

**Timestamp**

Sent: 3/19/2024 4:21:35 PM  
 Viewed: 3/20/2024 8:59:18 AM  
 Signed: 3/20/2024 9:00:03 AM

**Electronic Record and Signature Disclosure:**  
 Not Offered via DocuSign

Martin Baptist  
 martin.baptist@wur.nl  
 Wageningen University & Research  
 Security Level: Email, Account Authentication (None)



Signature Adoption: Uploaded Signature Image  
 Using IP Address: 84.83.72.123

Sent: 3/19/2024 4:21:35 PM  
 Viewed: 3/19/2024 5:51:44 PM  
 Signed: 3/19/2024 5:52:57 PM

**Electronic Record and Signature Disclosure:**  
 Not Offered via DocuSign

In Person Signer Events	Signature	Timestamp
-------------------------	-----------	-----------

Editor Delivery Events	Status	Timestamp
------------------------	--------	-----------

Agent Delivery Events	Status	Timestamp
-----------------------	--------	-----------

Intermediary Delivery Events	Status	Timestamp
------------------------------	--------	-----------

Certified Delivery Events	Status	Timestamp
---------------------------	--------	-----------

Carbon Copy Events	Status	Timestamp
--------------------	--------	-----------

WMR Secretariaat secretariaat.marine-research@wur.nl Security Level: Email, Account Authentication (None)	<b>COPIED</b>	Sent: 3/19/2024 4:21:35 PM Resent: 3/20/2024 9:00:10 AM Viewed: 3/20/2024 9:23:16 AM
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------	--------------------------------------------------------------------------------------------

**Electronic Record and Signature Disclosure:**  
 Not Offered via DocuSign

Witness Events	Signature	Timestamp
----------------	-----------	-----------

Notary Events	Signature	Timestamp
---------------	-----------	-----------

<b>Envelope Summary Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamps</b>
Envelope Sent	Hashed/Encrypted	3/19/2024 4:21:35 PM
Certified Delivered	Security Checked	3/19/2024 5:51:44 PM
Signing Complete	Security Checked	3/19/2024 5:52:57 PM
Completed	Security Checked	3/20/2024 9:00:03 AM

<b>Payment Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamps</b>
-----------------------	---------------	-------------------