

## Ruimte voor Zand

Kennisbasis voor een nieuwe beheerstrategie ter behoud en herstel van een dynamisch en veerkrachtig kustlandschapsmozaïek in Nederland

## Colofon

©2025 IPO, Vereniging het Interprovinciaal Overleg, BIJ12, uitvoeringsorganisatie van de gezamenlijke provincies, Utrecht.

Onderzoeksrapport nummer 2025/OBN-2019-105-DK  
Driebergen, maart 2025

Deze publicatie is tot stand gekomen met een financiële bijdrage van BIJ12 en het Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur.

Deze uitgave is online gepubliceerd op [www.natuurkennis.nl](http://www.natuurkennis.nl)

### Auteursrecht

Teksten mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Foto voorzijde                natuurgebied 't Oerd op Ameland, augustus 2021  
Fotograaf                      Eva Lansu

### Wijze van citeren

*Lansu, E.M., Höfer, S, Rietkerk, M., Wassen, M.J., Lammers, E.J., Reijers, V.C., Giesen, W., Van der Heide, T., 2025. Ruimte voor Zand; Kennisbasis voor een nieuwe beheerstrategie ter behoud en herstel van een dynamisch en veerkrachtig kustlandschapsmozaïek in Nederland*  
*Onderzoeksrapport OBN-2019-105-DK, OBN Natuurkennis, Driebergen.*

### Samenstelling

E.M. Lansu	NIOZ
S. Höfer	Rijksuniversiteit Groningen
M. Rietkerk	Universiteit Utrecht
M. J. Wassen	Universiteit Utrecht
E. J. Lammers	Staatsbosbeheer
V.C. Reijers	Universiteit Utrecht
W. Giesen	consultant
T. van der Heide	NIOZ & Rijksuniversiteit Groningen

### Productie

Vereniging van Bos- en Natuurterreineigenaren (VBNE)  
Adres                              Princenhof Park 7, 3972 NG Driebergen  
Telefoon                         0343 – 745 250  
E-mail                              obn@vbne.nl

---

## Voorwoord

Behoud maar zeker ook het herstel van biodiversiteit behoort tot de kerndoelen van de overheid. Om dit doel te realiseren ontwikkelt en verspreidt het OBN Kennisnetwerk daarvoor toepasbare kennis over herstelmaatregelen voor Natura 2000, de aanpak van stikstof, de leefgebiedenbenadering, de ontwikkeling van nieuwe natuur én het cultuurlandschap.

Ook de natuur van ons kustlandschap gaat langzaam maar zeker steeds verder in kwaliteit achteruit. Het bijzondere aan deze natuurgebieden is dat ze nog vaak extra functies hebben zoals drinkwatervoorziening en veiligheid. Dit maakt het misschien nog wel extra urgenter om het systeem goed te begrijpen en maatregelen te onderzoeken die de natuur helpen versterken. Bovendien raken de gebieden meer en meer 'ingeklemd'. Terwijl de zeespiegel stijgt worden ze aan de landzijde begrensd door bebouwing, infrastructuur, bebossing, inpoldering en harde versterkingen. Het gevolg van deze kustbeknelling is dat het natuurlijk kustlandschap steeds minder ruimte krijgt, met negatieve gevolgen voor het functioneren, de natuurlijke processen en de biodiversiteit.

In dit onderzoek is onderzocht welke ruimte de natuur minimaal moet hebben om goed te kunnen functioneren. Daarom is uitgezocht wat, afhankelijk van lokale condities, de minimale breedte is van een functionerend kustlandschapsmozaïek. Ook is gekeken welke Nederlandse kustlijndelen nu breed genoeg zijn, en hoe we deze zouden moeten beheren. Ook is er gekeken of verbreding van te smalle kusten via nieuwe suppletie-methoden tot herstel van natuurlijke erosie-en-hersteldynamiek kan leiden.

De kennis en inzichten die dit rapport hebben gebracht, geeft beheerders en beleidsmakers veel meer mogelijkheden om op basis van gefundeerde kennis het gesprek te voeren over de gewenste inrichting van de kustzone. Daarnaast geeft het rapport handreikingen om die eventueel noodzakelijke herinrichting ook daadwerkelijk in te zetten.

Ik wens u veel leesplezier

Teo Wams

Voorzitter van de OBN Adviescommissie

---

# Inhoud

<b>Samenvatting</b> .....	<b>5</b>
<b>Summary</b> .....	<b>7</b>
<b>1. Inleiding</b> .....	<b>9</b>
1.1 Probleemstelling.....	9
1.2 Onderzoeksdoelen en kennisvragen .....	11
<b>2. Kennisvragen 1 &amp; 2: Welke breedte is minimaal nodig voor een biodivers duinlandschap?</b> 13	
2.1 Kustbeknelling wereldwijd .....	13
2.2 Kustbeknelling in Nederland .....	14
2.2.1 Breedte van de onverstoorde zones .....	14
2.2.2 Ecologische karakterisering mbv plots/transecten & benodigde breedte Nederlandse duinen....	16
2.2.3 Ecologische karakterisering mbv 'deep learning' & benodigde breedte Nederlandse duinen .....	23
2.2.4 Abiotische samenstelling van kustbodems & vegetatie .....	27
2.2.5 Benodigde breedte voor een biodivers duinlandschap.....	34
<b>3. Kennisvraag 3: Kan actief beheer worden geminimaliseerd door lange kustgradienten te herstellen?</b> .....	<b>35</b>
<b>4. Kennisvraag 4: Kunnen lange kustgradiënten worden hersteld door mega suppleties? .....</b>	<b>38</b>
<b>5. Kennisvraag 5: Waar kunnen mega-suppleties worden toegepast voor herstel van kustgradiënten?</b> .....	<b>42</b>
<b>6. Aanvullend onderzoek</b> .....	<b>45</b>
6.1 Inleiding .....	45
6.2 Aanvullend onderzoek 1: Veerkracht, vestiging en vitaliteit van helmgras .....	47
6.3 Aanvullend onderzoek 2: Herstelvermogen van plantengemeenschappen in de grijze duinen	53
<b>7. Conclusies &amp; implicaties voor duinbeheer</b> .....	<b>58</b>
<b>8. Literatuur</b> .....	<b>60</b>
<b>Bijlagen</b> .....	<b>62</b>
Bijlage 1. Cross-tabel, met nauwkeurigheid van voorspellingen per habitatype .....	63
Bijlage 2. PCA concentraties gecorrigeerd voor bulk density .....	64
Bijlage 3. Plant nutriënten.....	66

---

## Samenvatting

Kustlandschappen staan steeds meer onder druk. Terwijl de zeespiegel stijgt worden ze aan de landzijde begrensd door bebouwing, infrastructuur, bebossing, inpoldering en harde versterkingen. Deze inklemming staat internationaal als de 'coastal squeeze' bekend en wordt in het Nederlands aangeduid met 'kustbeknelling'. Het gevolg van kustbeknelling is dat het natuurlijk kustlandschap steeds minder ruimte krijgt, o.a. met gevolgen voor het functioneren, natuurlijke processen, en de biodiversiteit.

Het praktische kustbeheer wordt flexibeler, maar het huidig beheer richt zich in de meeste gevallen nog op het handhaven en stabiliseren van de huidige kustlijn (bijv. met behulp van relatief kleine maar frequente zandsuppleties). Naast deze onnatuurlijke vorm van zanddynamiek, is de kustzone op de meeste plaatsen simpelweg te smal geworden voor natuurlijke erosie- en hersteldynamiek. Op dit moment weten we echter niet (i) hoe breed een kustzone minimaal moet zijn om voldoende ruimte te bieden aan natuurlijke dynamiek, (ii) of dat regionaal verschilt gegeven de gebieds-specifieke processen, en (iii) hoe zandsuppleties van verschillende grootte en frequentie hierop aangrijpen.

Doel van het huidig onderzoek is deze vereiste kennis te ontwikkelen voor een vernieuwde beheerstrategie die ruimte biedt aan voor de biodiversiteit essentiële natuurlijke afbraak- en opbouwprocessen, terwijl kustveiligheid en andere cruciale functies, zoals wonen, werken, recreëren en drinkwatervoorziening behouden blijven. Hiervoor moet worden uitgezocht wat, afhankelijk van lokale condities, de minimale breedte is van een functionerend kustlandschapsmozaïek; welke Nederlandse kustlijndelen nu breed genoeg zijn, en hoe deze te beheren; en of verbreding van te smalle kusten middels nieuwe landschapsschaal-suppletie methoden tot herstel van natuurlijke erosie-en-hersteldynamiek kan leiden. Hierbij speelt de natuurlijke veerkracht van het kustecosysteem tegen klimaatsverandering en de daarmee verwachte zeespiegelstijging en toename van de intensiteit van stormen een belangrijke rol.

De resultaten van dit onderzoek tonen dat langs de Nederlandse kust alle habitatstypen voorkomen bij een breedte van de duinzone van minstens 1500m, maar 75% van de plantensoorten worden gemiddeld pas gevonden bij een duinbreedte van ongeveer 1800m, en 90% bij 2200m (tot maximaals zelfs 5100m). De verschillen in het bodemmilieu tussen habitattypen worden meestal veroorzaakt door een landinwaarts toenemende bodemontwikkeling langs een gradiënt van afnemende pH en vrijwel lineair toenemende concentraties van voedingsstoffen. Verschillen binnen het bodemmilieu van een habitatype zijn meestal gekoppeld aan variatie in de concentratie van alkalimetalen (bijv. Na en Ca). Hoe breder een duinzone, hoe diverser het bodemmilieu, wat dan weer gepaard gaat met een hogere diversiteit aan plantensoorten. Opvallend is dat op een paar uitzonderingen na alle habitats stikstofbeperkt zijn.

Wanneer er onvoldoende kustruimte beschikbaar is, kan strategisch beheer (bijv. plaggen, maaien, begrazing, enz...) de habitatdiversiteit vergroten en neemt de soortenrijkdom toe. Om bijvoorbeeld 75% van het diversiteitspotentieel te halen, is er langs 57% van de zandige kust op de Wadden, 43% van de Hollandse kust en 10% van de Delta kust voldoende ruimte. Langs de kusten waar



onvoldoende ruimte is om 75% van het diversiteitspotentieel te halen, is er gemiddeld 0.6 km verbreding nodig op de Wadden, 0.8 km in Holland en 2.3 km in de Delta. En wanneer er zou worden gestreefd naar 90% potentieel zou er een nog grotere verbreding nodig zijn, van 2200m (Wadden en Hollandse kust) tot 5100m (Delta). Er is echter nog te weinig ervaring in Nederland met megasuppleties om conclusies te trekken over hun doeltreffendheid in het herstellen van lange kustgradiënten.

Hoewel delen van de Nederlandse kust voldoende ruimte bieden voor een divers duinlandschap, zijn er ook gebieden waar ruimte ontbreekt. Bovendien blijkt uit ons onderzoek dat zelfs in gebieden met lange duinlandschapsgradiënten actief duinbeheer helpt om diversiteit te behouden. Het is dus van belang de nieuwe kennis over de minimale breedte te koppelen aan kennis over de vestiging en veerkracht van belangrijke plantensoorten en plantengemeenschappen. Daarom zijn aanvullende veldexperimenten uitgevoerd om beter inzicht te krijgen in hoe verschillende duinplanten en -gemeenschappen op verstoringen reageren.

Duinen, vooral jonge duinen, zijn dynamische omgevingen gekenmerkt door fysieke stress, frequente verstoringen en een lage diversiteit aan plantensoorten. Een kenmerkende soort voor jonge duinen is helmgras, dat hoge duinen bouwt door stuivend zand vast te leggen. Experimenten tonen dat overleving van vestigend helmgras op het strand wordt beperkt door erosie en begraving als gevolg van zanddynamiek, en dat hun groei hier juist wordt versterkt door zandinvang. Planten op hoge, landinwaartse duinen hebben een goede overleving door het gebrek aan zanddynamiek, maar groeien ook niet meer goed door een gebrek aan invang van vers zand. De oudere, gestabiliseerde grijze duinen vertonen een grotere diversiteit aan plantensoorten. Na verstoringen blijken plantengemeenschappen met een hogere soortendiversiteit zich beter te herstellen dan gemeenschappen met lagere diversiteit.

## Summary

Coastal landscapes are under increasing pressure. On the landward side, they are hemmed in by buildings, infrastructure, afforestation, land reclamation and solid constructions, while at the same time contending with sea level rise. This constriction is internationally known as the 'coastal squeeze' (in Dutch it is referred as 'kustbeknelling'). The consequence of this is that the natural coastal landscape receives less and less space, with consequences among others for functions, natural processes and biodiversity.

Practical coastal management is becoming more flexible, but current management in most cases still focuses on maintaining and stabilizing the current coastline (e.g., using relatively small but frequent sand nourishments). In addition to this unnatural form of sand dynamics, in most places the coastal zone has simply become too narrow for natural erosion and restoration dynamics. At the moment, however, (i) we do not know how wide a coastal zone must be to provide sufficient space for natural dynamics, (ii) nor whether it differs regionally given the area-specific processes, and (iii) how sand nourishments of different size and frequency respond to this.

The aim of the current research is to develop this required knowledge for a renewed management strategy that offers space for natural degradation and construction processes that are essential for biodiversity, while coastal safety and other crucial functions, such as living, working, recreation and drinking water supply are safeguarded. For this, it is necessary to find out: (i) what the minimum width of a functioning coastal landscape mosaic is, depending on local conditions; (ii) which parts of the Dutch coastline are now wide enough, and how should these be managed; and (iii) whether broadening coasts that are too narrow by means of new landscape-scale replenishment methods can lead to recovery of natural erosion and restoration dynamics. In this, it is important to take into account the natural resilience of the coastal ecosystem against climate change and expected sea level rise and increase in storm intensity.

Along the Dutch coast, all habitat types occur at a dune zone width of less than 1500m, but 75% of the plant species are only found at an average dune width of about 1800m and 90% at a width of 2200(-5100)m. The differences in the soil environment between habitat types are usually caused by increasing soil development inland along a gradient of decreasing pH, and almost linearly increasing concentrations of nutrients. Differences within the soil environment of a habitat type are usually linked to variation in the concentration of alkali metals (e.g., Na and Ca). The wider a dune zone, the more diverse the soil environment, which in turn goes hand in hand with a higher plant species diversity. It is noticeable that, with a few exceptions, all habitats are nitrogen-limited.

When space along the coast is insufficient, strategic management (e.g. sod removal, mowing, grazing, etc...) can increase habitat diversity and increase species richness. To achieve, for example, 75% of the diversity potential, there is sufficient space along 57% of the sandy coast in the Wadden region, 43% of the Dutch coast and 10% of the Delta coast. Along the coasts where there is

insufficient space to achieve 75% of the diversity potential, an average of 0.6 km is needed to widen along the Wadden, 0.8 km in Holland and 2.3 km in the Delta. However, there is still too little experience in the Netherlands with mega replenishments to draw conclusions about their effectiveness in restoring long coastal gradients. And if 90% potential were to be achieved, an even greater broadening would be required, from 2200m (Wadden and Dutch coast) to 5100m (Delta).

Although parts of the Dutch coast offer sufficient space for a diverse dune landscape, there are also areas where space is lacking. Moreover, our research shows that even in areas with long dune landscape gradients, active dune management helps to maintain diversity. Thus, it is important to link the new knowledge about the minimum required width to insights about the establishment, disturbance-and-recovery dynamics of and resilience of key dune plant species and plant communities. Therefore, two additional field experiments were conducted. In the dynamic foredunes stress response of the dune-forming marram grass at two different life stages was compared. In the stabilized backdune, variation of disturbance-recovery dynamics of plant communities were assessed along a succession gradient. to gain a better understanding of how different dune plants and communities respond to disturbances.

Dunes, especially young dunes, are dynamic environments characterized by physical stress, frequent disturbances, and low plant species diversity. A characteristic species for young dunes is marram grass, which builds high dunes by capturing drifting sand. In marram grass, the stimulating effect of burial on growth differs between juvenile and mature plants. High sedimentation stress at the beach restricts establishment of young plants while ceasing sand dynamics further inland limits the recovery of mature marram grass. These age-dependent responses to burial stress constrain the habitat range of marram grass. In the backdune, reduced physical stress allows a wider range of plants to establish, increasing biodiversity. However, with ongoing succession and dune aging species diversity eventually decreases towards the landward end of the backdune gradient. Experiments show that survival of established marram grass on the beach is limited by erosion and burial as a result of sand dynamics, and that their growth here is actually enhanced by sand capture. Plants on higher, inland dunes show a good survival rate due to the lack of sand dynamics, but also no longer grow well due to a lack of capture of fresh sand. The more mature, stabilized back dunes show a greater diversity of plant species. Following After disturbances, plant communities with higher species diversity appear tend to recover better than communities with lower diversity.



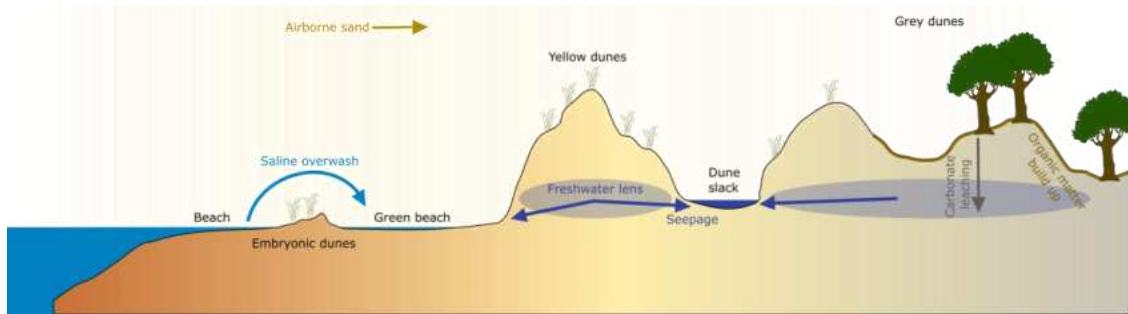
# 1. Inleiding

## 1.1 Probleemstelling

Duinen langs de kust vormen een waardevol ecosysteem dat zorgt voor natuurlijke bescherming tegen overstromingen, schoon drinkwater en een habitat voor vele unieke soorten. Een essentieel aspect van dit ecosysteem is de grootschalige zonering die ontstaat over de zee-naar-landgradiënt met afnemende fysieke stress. Echter, sinds de vorige eeuw staat het natuurlijk functioneren van kustlandschappen steeds meer onder druk. Dit is niet uniek voor Nederland, maar een wereldwijd probleem waarmee menig kustbeheerder worstelt (Luijendijk et al. 2018, Vouskoudas et al. 2020, Defeo et al. 2021).

Vanaf de landzijde worden kustlandschappen begrensd door bebouwing, infrastructuur, bebossing, inpoldering en, veelal harde, kunstmatige zeereepversterkingen, terwijl aan de zeezijde de zeespiegel stijgt. Hierdoor ontstaat een tweezijdige inklemming van het kustlandschap die internationaal als de 'coastal squeeze' bekend staat en vrij vertaald in het Nederlands kan worden aangeduid met 'kustbeknelling'. Het gevolg van deze kustbeknelling is dat de zone afneemt, waarin het natuurlijke kustlandschap de ruimte krijgt voor natuurlijke ontwikkeling en dynamiek.

Zandige kusten zoals de Nederlandse worden van nature juist gekarakteriseerd door langgerekte geomorfologische gradiënten van zee tot oude duinen, met daarbij in landwaartse richting een geleidelijk afnemende zanddepositie, zoutspray, windstress en overstromingsfrequentie. Deze grootschalige (vaak kilometerslange) gradiënten zijn van groot belang voor het ontstaan van kleinschaliger (tientallen tot honderden meters lange) gradiënten in sedimentcondities, zoutgehalte van het grond(water) en droogte (figuur 1). Deze kleinschaliger gradiënten ontstaan als gevolg van sediment- en nutriëntenaccumulatie door vegetatie, met duinvorming dichtbij zee en organische laagvorming verder landinwaarts. Verder worden deze kleinschalige gradiënten beïnvloed door stormen en overstromingen. Door deze opbouw- en afbraakdynamiek ontstaat een kustlandschap wat op landschapsschaal stabiel en veerkrachtig is, en wordt gekarakteriseerd door een mozaïek van schuivende kleinschalige gradiënten en bijbehorende gemeenschappen in verschillende successiestadia. Er is dus sprake van een stabiel systeem op landschapsschaal waarin zich dynamische lokale systemen bevinden.



Figuur 1.1. Dwarsdoorsnede van een natuurlijk functionerend kustlandschap.

Figure 1.1. Cross-section of a naturally functioning coastal landscape.

Boven op de langgerekte geomorfologische gradiënten van landwaarts toenemende hoogte en afnemende zanddepositie, starten biobouwende grassen zoals helm en biestarwe de duinvorming die zich zeewaarts kan uitbouwen, maar door stormen kan worden teruggezet. Vervolgens vormen zich in het duinlandschap meerdere kleinschalige gradiënten door de interactie tussen vegetatie en abiotische processen zoals overspoeling, infiltratie en kwel van zoet water en graduele uitloging van kalk. Hierdoor ontstaat een divers mozaïek van o.a. lage duintjes, groene stranden, hogere duinen en vochtige duinvalleien en bossen.

In het huidige, steeds meer vastgelegde en op veel plaatsen smaller wordende kustgebied is weinig ruimte voor natuurlijke opbouw- en afbraakdynamiek. Hierdoor verdwijnen de grootschalige gradiënten met hun typerende kleinschalige en dynamische landschapsmozaïeken met negatieve gevolgen voor de biodiversiteit en de veerkracht van het ecosysteem. Daarnaast wordt door het gebrek aan dynamiek het effect van de huidige hoge stikstofdepositie uitvergroot. Omdat er weinig afslag, erosie en overstuiving plaatsvindt, blijft het aangevoerde stikstof langdurig beschikbaar en vormen verruiging en vergrassing in veel Nederlandse kustduinen een groot probleem (Geelen et al. 2022).

Niet alleen de natuurfuncties van de kust, maar ook de recreatieve beleving en de drinkwaterproductie komen onder druk te staan bij een te zeer versmalde en vastgelegde kust. Daar staat tegenover dat ‘zachte’ kustverdediging op basis van zandsuppleties steeds vaker wordt gebruikt in plaats van harde structuren zoals (strek)dammen en dijken. Hoewel het praktische kustbeheer dus flexibeler wordt, richt het huidige suppletier regime zich echter in de meeste gevallen nog steeds op het handhaven en stabiliseren van de huidige kustlijn met behulp van relatief kleine maar frequente suppleties. Door deze benadering wordt de kustlijn dus relatief vaak verstoord door gepulseerde zandaddities, en krijgt natuurlijke erosie geen ruimte meer. Naast deze onnatuurlijke vorm van zanddynamiek, is de kustzone door menselijke ingrepen op de meeste plaatsen simpelweg te smal geworden om natuurlijke erosie- en hersteldynamiek toe te laten zonder dat het de kustveiligheid in gevaar brengt. Dit is een probleem dat in de toekomst zal toenemen door verdere zeespiegelstijging. Het is daarom van belang om een nieuwe beheerstrategie te ontwikkelen die meer ruimte biedt aan veerkrachtige kustlandschappen en hun functies voor zowel mens als natuur.

## 1.2 Onderzoeksdoelen en kennisvragen

Een nieuwe beheerstrategie zou zich in de eerste plaats moeten richten op het behoud van nog bestaande brede kuststroken, maar daarnaast ook op het (her)ontwikkelen c.q. herstellen van een voldoende brede kust op plaatsen waar deze nu te smal is. Om een beter inzicht te krijgen in het functioneren van duinecosystemen langs de Nederlandse kust, heeft de VBNE gevraagd onderzoek uit te voeren dat de kennisbasis moet leveren om toekomstige nieuwe en duurzame beheer- en herstelstrategieën op te baseren voor het zandige Nederlandse kustlandschap.

Het doel van het onderzoek is de vereiste kennis te ontwikkelen voor een vernieuwde beheerstrategie die ruimte biedt aan voor de biodiversiteit essentiële natuurlijke afbraak- en opbouwprocessen, terwijl kustveiligheid en andere cruciale functies, zoals wonen, werken, recreëren en drinkwatervoorziening behouden blijven.

Hiervoor moet worden uitgezocht wat, afhankelijk van lokale condities, de minimale breedte is van een functionerend kustlandschapsmozaïek; welke Nederlandse kustlijndelen nu breed genoeg zijn, en hoe deze te beheren; en of verbreding van te smalle kusten middels nieuwe landschapsschaal-suppletie methoden tot herstel van natuurlijke erosie-en-hersteldynamiek kan leiden.

Deze overkoepelende doelstelling is op te delen in een vijftal concrete onderzoeksvragen die verder terugkomen in de aanpak van het onderzoek (zie hoofdstukken 2 t.e.m. 5):

- 1) Wat is de minimaal benodigde breedte voor een goed functionerend kustlandschapsmozaïek en verschilt dit per deelregio (delta, vasteland, Wadden)?
- 2) Hoe verhoudt de biodiversiteit in een goed functionerend kustlandschapsmozaïek zich tot een sterk versmalde en gestabiliseerde kustlijn onder aangroeiende c.q. erosieve condities?
- 3) In hoeverre kan het herstel van lange kustgradiënten bijdragen aan het behalen van de Natura-2000-doelstellingen met zo weinig mogelijk actief beheer in de vorm van frequente ingrepen?
- 4) Kunnen infrequente, landschapsherstelgerichte suppleties bijdragen aan het duurzaam behoud van dynamische/veerkrachtige kustlandschapsmozaïeken met minimaal beheer, in combinatie met behoud van essentiële maatschappelijke functies (o.a. kustveiligheid, drinkwaterproductie)?
- 5) Welke kusttrajecten per deelregio (delta, vasteland, Wadden) zijn op basis van landschapsecologische criteria kansrijk voor het creëren van grootschalige gradiënten zonder dat dit andere functies bedreigt?

Voortgang van het project werd gepresenteerd in een tweetal tussenrapporten die zijn verschenen in april 2022 en in december 2023. Dit eindrapport geeft een overzicht van de belangrijkste uitkomsten,

m.n. de antwoorden op de vijf kennisvragen, aangevuld met een aantal andere verkregen inzichten (bonusvragen).

De structuur van het eindrapport volgt dat van de vijf kennisvragen en de bonusvragen. Hierbij zijn kennisvragen 1 en 2 samengevoegd omdat 'minimaal benodigde breedte voor een goed functionerend kustlandschapsmozaïek' nauw samenhangt met de biodiversiteit in een dergelijk landschap.

## 2. Kennisvragen 1 & 2: Welke breedte is minimaal nodig voor een biodivers duinlandschap?

In grote delen van de wereld bevindt de kustzone zich in een kritieke toestand, en dat geldt ook voor zandige kusten die van nature worden gekenmerkt door duinsystemen. Vanaf de landzijde krimpt het areaal aan natuurlijke ecosystemen door toedoen van veranderingen in landgebruik, met zowel verlies als versnippering van het gebied tot gevolg (Silva et al. 2020, Defeo et al. 2021).

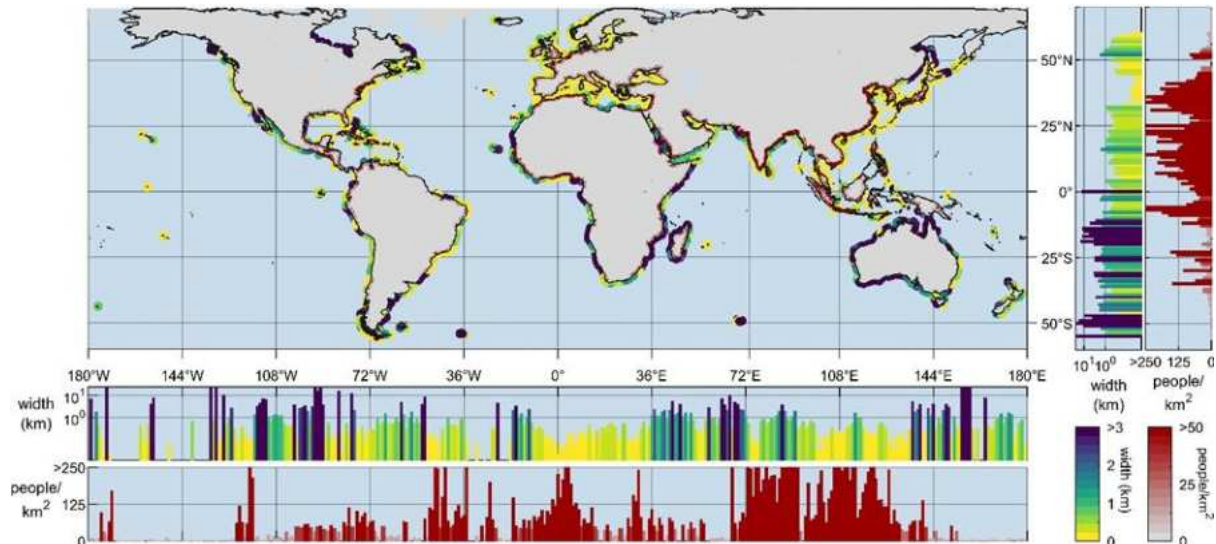
Ook vanaf de zeezijde worden duinsystemen bedreigd. In de eerste plaats zorgt de zeespiegelstijging ervoor dat duingebieden in toenemende mate bekneld raken tussen een stijgende zee enerzijds, en zeewaarts uitbreidende infrastructuur anderzijds. Recent onderzoek toont aan dat veel zandige kusten netto sterk eroderen (Luijendijk et al. 2018), met de mogelijkheid dat zandstranden binnenkort op veel plaatsen zelfs kunnen verdwijnen (Vousdoukas et al. 2020, Defeo et al. 2021). Hoewel natuurlijke erosie- en hersteldynamiek belangrijk is voor een gezond duinecosysteem, zet structurele erosie van de stranden natuurlijk ook de duinen onder druk. Eerder in de tachtiger jaren was het fenomeen van wereldwijde stranderosie duidelijk na de studies van de International Geographical Union-werkgroep over de dynamiek van kusterosie (1972-1976) en de Commission on the Coastal Environment (1976-1984). Uit recent onderzoek blijkt dat 24% van de zandstranden ter wereld netto-erosie ondervindt terwijl slechts 48% stabiel is, en dat bij 28% sprake is van accretie (Luijendijk et al. 2018).

Bij voldoende zandaanvoer is er sprake van accumulatie van sediment, vorming van duinsystemen, het van nature voorkomen van strand- en duinvegetatie, en het vormen van natuurlijke barrières. Bij een tekort aan zandaanvoer treedt stranderosie op. Wanneer dit structureel is, leidt het doorgaans ook tot verlies van duinareaal, met bijbehorend verlies van biodiversiteit en andere ecosysteemdiensten zoals kustbescherming en drinkwateropslag (Silva et al. 2020, Defeo et al. 2021).

### 2.1 Kustbeknelling wereldwijd

Om de Nederlandse situatie in bredere context te plaatsen is de wereldwijde mate van kustbeknelling van zandige kusten geanalyseerd. Daarbij is onderscheid gemaakt tussen onverstoorde (zonder enige infrastructuur of bebouwing), licht verstoorde (met bijv. voet- en fietspaden) en matig verstoorde zandige kustzones (met bijv. voet- en fietspaden en autowegen). Verharde wegen zijn geanalyseerd met behulp van 'Open Street Map' (OSM, een collaboratief project; [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)) terwijl het voorkomen van bebouwing is bepaald met de Global Urban Footprint dataset (Esch et al. 2017). Langs transecten loodrecht op de kustlijn is vervolgens de breedte van deze zones bepaald. Aan de analyse is ook toegevoegd de relatie met bevolkingsdichtheid langs de kust.

Figuur 2.1 (gepubliceerd in Lansu et al. 2024) laat zien langs welke kusten wereldwijd kustbeknelling het meest voorkomt en waar meestal de zone met onverstoord duingebied <1km en vaak zelfs <500m. Deze beknelde gebieden zijn vooral te vinden langs de oostkust van de Verenigde Staten, Brazilië, in Europa en langs een groot deel van de kusten van Azië. De overige delen van Amerika, Afrika en Oceanië lijken minder last te hebben van kustbeknelling.



Figuur 2.1. Mate van kustbeknelling en bevolkingsdichtheid wereldwijd.  
 Figure 2.1. Coastal squeeze and population density worldwide.

## 2.2 Kustbeknelling in Nederland

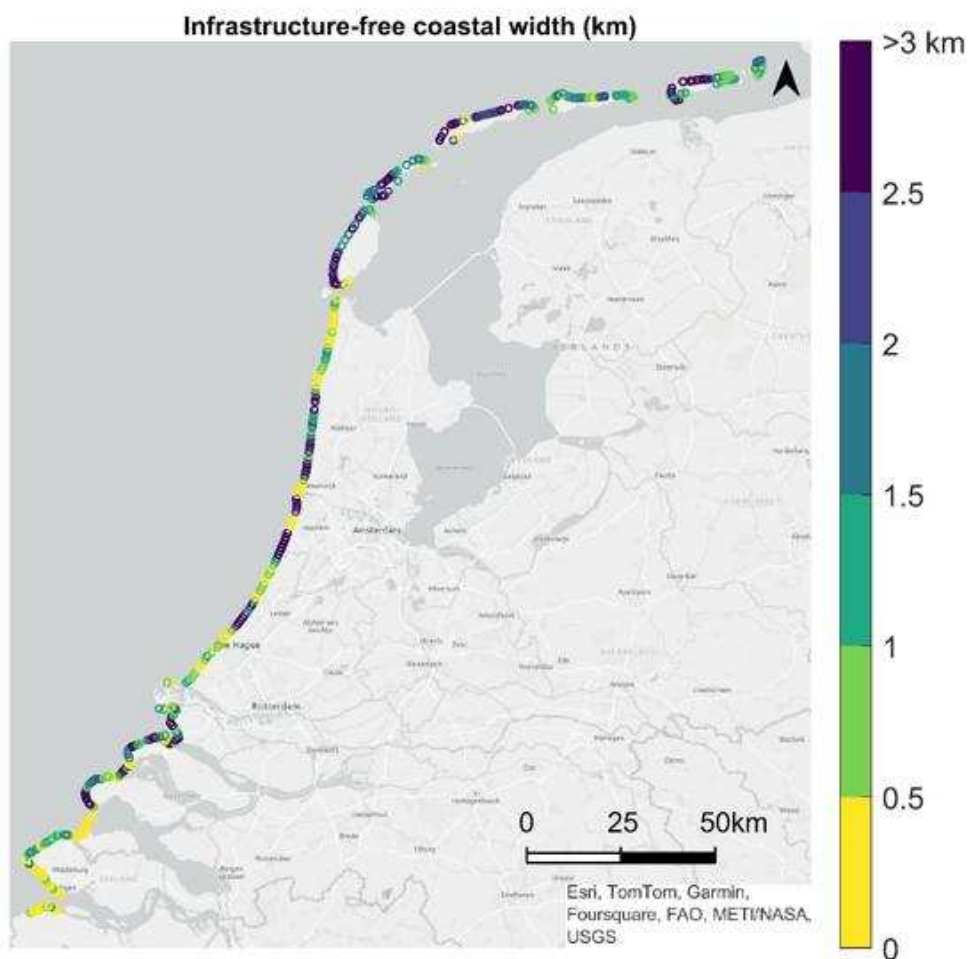
### 2.2.1 Breedte van de onverstoorde zones

Om de mate van kustbeknelling te bepalen zijn 429 denkbeeldige transecten<sup>1</sup> geplaatst loodrecht langs de Nederlandse kust op een onderlinge afstand van 1.0 km. Langs ieder transect is bepaald waar een zone onverstoord (zonder enige infrastructuur of bebouwing), licht verstoord (met bijv. verharde voet- en fietspaden) en verstoord is (met verharde wegen, bebouwing, enzovoorts). De breedte van de onbeknelde zone is hier opgevat als de som van de onverstoorde en de licht verstoorde zone.

<sup>1</sup> In het eerste tussenrapport is een andere methode gebruikt om de transecten te berekenen en was er sprake van 613 transecten. Destijds werd een inmiddels verouderde beeld van de kustlijn (GSHHS) gebruikt dat nu is vervangen door de kustlijn van OpenStreetMap uit 2023. De zandige kustlijn dataset van Luijendijk et al. (2018) is nog steeds gebruikt om te bepalen waar de Nederlandse kust zandig is en waar transecten berekend moeten worden. Verder is de afstand tussen de transecten aangepast – die stonden bij de eerste bepaling iets te dicht op elkaar (<1km) en staan nu precies 1,0km afstand. Met deze aanpassingen is er nu sprake van 429 transecten langs de gehele Nederlandse kustlijn.



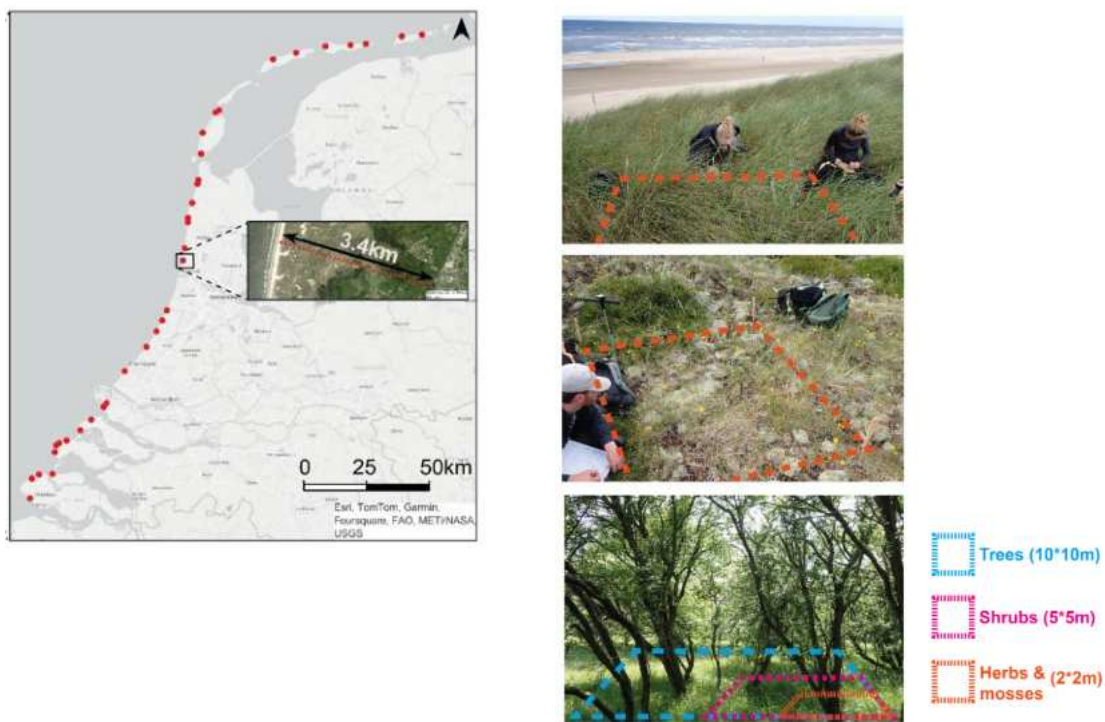
Figuur 2.2 geeft de breedte (in km) weer van de onbeknelde kustzone (d.w.z. onverstoorde en licht verstoorde zones samen) langs de Nederlandse kust. Met een gemiddelde breedte van de onverstoorde zone van 281m steekt Nederland redelijk ongunstig af bij de rest van Europa en is onder het Europese gemiddelde van 351m. De lichtverstoorde zone daarentegen, is met 830m ongeveer 30% breder dan het Europese gemiddelde van 560m. Vergelijken met de rest van Europa zijn er in Nederland minder autowegen, maar juist meer verharde voet- en fietspaden in de duinen.



*Figuur 2.2. Breedte van de onbeknelde kustzone in Nederland.*  
*Figure 2.2. Width of the zone in the Netherlands unaffected by coastal squeeze.*

## 2.2.2 Ecologische karakterisering mbv plots/transecten & benodigde breedte Nederlandse duinen

Om een antwoord te geven op de onderzoeksvraag 'wat is de benodigde breedte van een duinsysteem?' zijn de duinsystemen in Nederland gekarakteriseerd. Eerst zijn er in totaal 35 representatieve transecten langs de Nederlandse kust geselecteerd: 11 op de Wadden, 12 langs de Hollandse kust en 12 in het deltagebied (zie Figuur 2.3 en Tabel 2.1). Per regio (Wadden, Hollandse kust, Delta) is een gelijke verdeling van transecten nagestreefd, niet alleen qua ruimtelijke verdeling maar ook qua lengteverdeling (Figuur 2.4). De kortste transecten meten 200-300 meter (locaties DB, DR, TXR; zie Tabel 2.1) terwijl de langste transecten een lengte hebben van 2500-4300 m. De gemiddelde transectlengte is 1429m.



*Figuur 2.3. Locaties van de 35 transecten en grootte van de plots per vegetatielaag.*

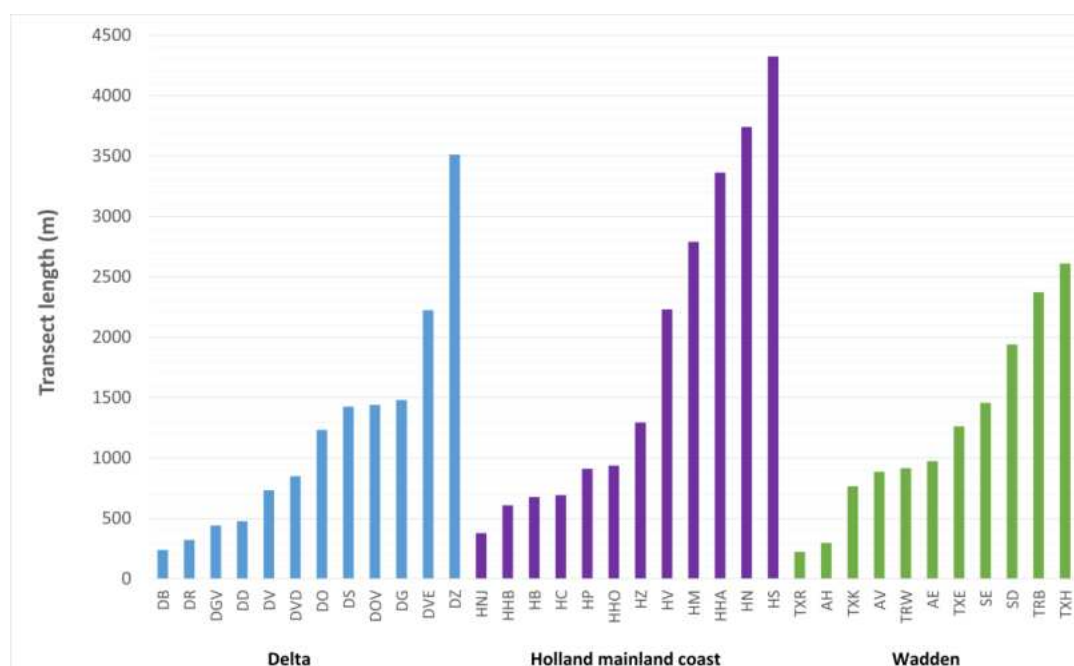
*Figure 2.3. Location of the 35 transects and size of the plots per vegetation layer.*

Tabel 2.1. Overzicht van de 35 transecten.

Table 2.1. Overview of the 35 transects.

Nr.	Afkorting	Regio	Locatie naam	Transect lengte (m)	Nr.	Afkorting	Regio	Locatie naam	Transect lengte (m)
1	DB	Delta	Banjaard	239	19	HZ	Hollandse kust	Zandmotor	1294
2	DR	Delta	Renesse	321	20	HV	Hollandse kust	Vogelwater	2231
3	DGV	Delta	Valkenisse	441	21	HM	Hollandse kust	Meijendel	2790
4	DD	Delta	Domburg	477	22	HHA	Hollandse kust	Hazenduin	3364
5	DV	Delta	Visschershoek	733	23	HN	Hollandse kust	Amsterdamse Waterleidingd.	3741
6	DVD	Delta	Verklikkerduinen	849	24	HS	Hollandse kust	Schoorl	4325
7	DO	Delta	Oranjezon	1232	25	TXR	Wadden	Texel De Robbenjager	223
8	DS	Delta	Voornes duin Zuid	1425	26	AH	Wadden	Ameland Midden	298
9	DOV	Delta	Voornes duin Noord	1440	27	TXX	Wadden	Texel De Koog	766
10	DG	Delta	Duinen van Goeree	1479	28	AV	Wadden	Ameland West	886
11	DVE	Delta	Verklikkerduinen Oost	2224	29	TRW	Wadden	Terschelling West	915
12	DZ	Delta	Kop van Schouwen	3512	30	AE	Wadden	Ameland Oost	974
13	HNJ	Hollandse kust	Noordduinen Julianadorp	378	31	TXE	Wadden	Texel Eierland	1262
14	HHB	Hollandse kust	Hondsbossche duinen	608	32	SE	Wadden	Schiermonnikoog Oost	1457
15	HB	Hollandse kust	Botgat	677	33	SD	Wadden	Schiermonnikoog West	1940
16	HC	Hollandse kust	Coepelduynen	693	34	TRB	Wadden	Terschelling Boschplaat	2374
17	HP	Hollandse kust	Pettemerduinen	910	35	TXH	Wadden	Texel De Hors	2610
18	HHO	Hollandse kust	Hollands Duin	937					

Vervolgens zijn langs deze transecten vanaf het strand tot aan de bebouwde infrastructuur om de 100m vegetatieopnames gemaakt (notering van bedekking per soort plus totale bedekking) in een totaal van 541 plots en zijn er monsters genomen van de vegetatie, humuslaag en bodem. Daarbij is ook de relatieve bedekking van elke gevonden plantensoort genoteerd. Dit is gedaan voor de moslaag (plot van 2x2m), kruidlaag (plot van 2x2m), struiklaag (plot van 5x5m, houtige vegetatie > 60cm hoog) en boomlaag (plot van 10x10m, houtige vegetatie > 4m hoog; zie inzet in Figuur 2.3). Ter plekke zijn per plot metingen verricht aan bodemdichtheid, diepte van de bodemhorizonten en diepte van de grondwaterspiegel.

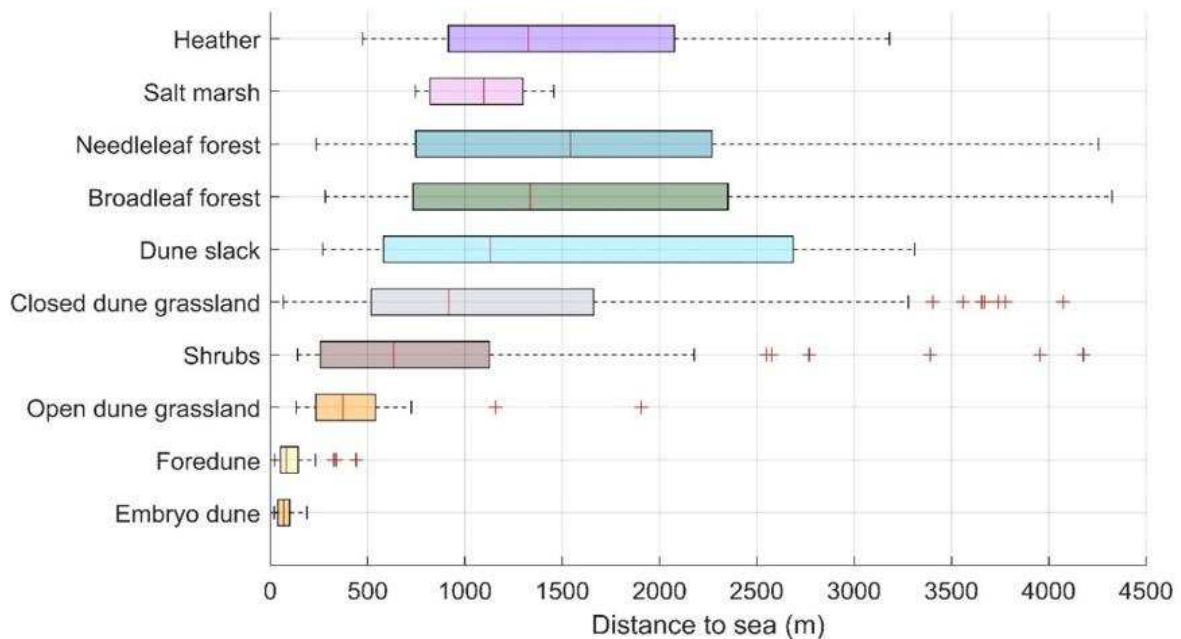


Figuur 2.4. De 35 transecten en hun lengte (in meters) opgesplitst naar regio.

Figure 2.4. The 35 transects and their length (in meters), per region.

In deze studie zijn metingen aan biota van de duinvegetaties beperkt gebleven tot de flora en vegetatie in de 541 plots. De samenhang tussen biodiversiteit en breedte van de (relatief) ongestoorde duinstrook is voorts bepaald op verschillende niveau's van diversiteit, namelijk dat van vegetatie-/habitattypen, plantengenera en plantensoorten.

Figuur 2.5 laat de verdeling zien van de 10 voornaamste (brede) vegetatietypen<sup>2</sup> qua afstand tot aan de zee: van embryonale duinen, die vooral direct aan zee voorkomen, tot aan de heidevegetaties (heather) die vooral voorkomen op afstanden >900m van zee.



Figuur 2.5. Brede habitattypen en voornaamste voorkomen op afstand tot aan de Noordzee.

Figure 2.5. Broad habitat types and main occurrence in distance to the North Sea.

Legenda:

- Rode middellijn = mediaan (50ste percentiel); beginlijn gekleurde balk = eerste kwartiel (25ste percentiel); eindlijn gekleurde balk = derde kwartiel (75ste percentiel); gekleurde balk = interkwartielbereik; linker whisker = minimum (25ste percentiel - 1.5\*interkwartielbereik); rechter whisker = maximum (75ste percentiel + 1.5\*interkwartielbereik); kruisjes = uitschieters groter dan het maximum of kleiner dan het minimum.
- Heather = heidevegetatie (kraai- of struikheide; mainly H2140 en H2150); salt marsh = schorren en zilte graslanden (H1330); needleleaf forest = naaldbos (no dune habitat type); broadleaf forest = duinbossen (no dune habitat type or H2180); dune slack = vochtige duinvalleien (H2190); closed dune grasslands = vegetatie met bomen & struiken <25% bedekking, totale bedekking >50% (H2130 or not classified); shrubs = struwelen (H2160); open dune grasslands = vegetatie met bomen & struiken <25% bedekking, totale bedekking <50% (H2130); foredune = de eerste rij witte duinen vanaf de zee gezien (H2120); embryo dune = embryonale duinen (H2110).

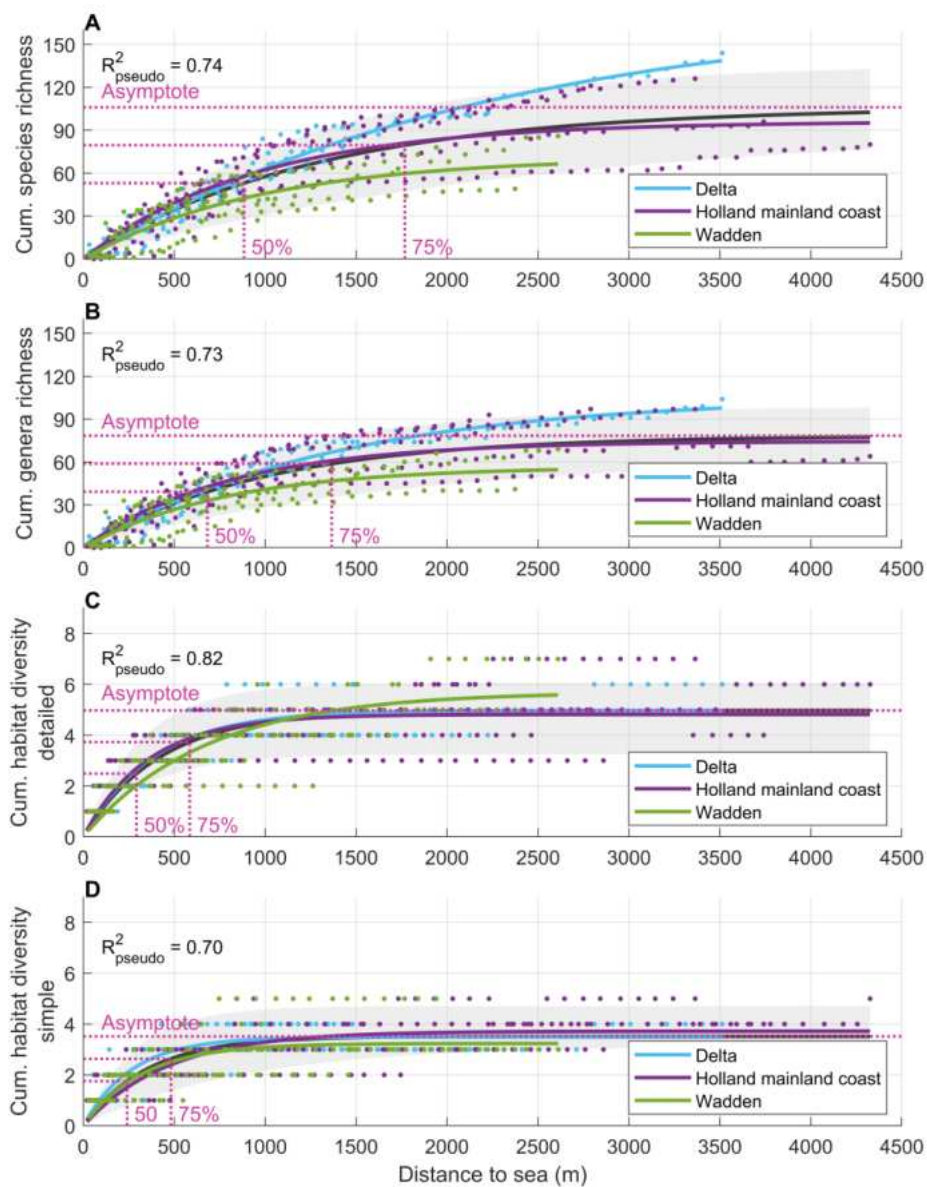
<sup>2</sup> Er is gekozen voor een grovere indeling omdat de eerder gehanteerde Natura-2000 indeling (e.g. in de tussenrapporten) ongeschikt bleek om vegetatie-opnames te categoriseren. De Natura-2000 indeling is moeilijk te kwantificeren en meer geschikt om het duinlandschap in te delen op basis van directe observaties in het veld.

Figuur 2.6 geeft de biodiversiteit weer aan de hand van vier verschillende parameters (plantensoorten, plantengenera, gedetailleerde habitats, gesimplificeerde habitats<sup>3</sup>), zowel opgesplitst per regio (Wadden, Hollandse kust, Delta) als gemiddelden voor de hele kust. Als gekeken wordt naar plantensoorten, dan wordt 75% van de biodiversiteit gemiddeld bereikt bij een duinbreedte van 1800m, waarbij op de Wadden (1500m) en langs de Hollandse kust (1400m) dit al bij geringere breedtes wordt bereikt dan in de Delta (3100m). Bij plantengenera wordt 75% van de biodiversiteit gemiddeld bereikt bij een duinbreedte van 1400m. Als alleen naar habitats wordt gekeken, dan wordt 75% van de habitatdiversiteit nog weer bij geringere breedtes bereikt: bij gedetailleerde habitats bij 600m en bij gesimplificeerde habitats zelfs al bij een duinbreedte van minder dan 500m. Deze analyse illustreert dat de mate van detail (soorten, genera, of habitats) waarin de analyse wordt uitgevoerd, bepalend is voor de transectlengte waarbij 75% van de diversiteit wordt bereikt.

Figuur 2.7 laat de invloed zien van de 'sampling interval' (d.w.z. de afstand tussen de plots) op de uitkomst. De zwarte lijn geeft de sampling interval van 100m weer, zoals in de praktijk is uitgevoerd, terwijl de rode lijn de uitkomst weergeeft als een sampling interval van 200m was gehanteerd. Bij diversiteit aan plantensoorten zou bij de 200m interval 75% van de diversiteit worden bereikt bij een breedte van bijna 2000m, terwijl dit bij een 100m interval 1800m wordt bereikt. Voor metingen aan genera verschuift dit van 1400 naar bijna 1600m.

---

<sup>3</sup> 'Gedetailleerde habitats' zijn gekarakteriseerd op basis van veldwaarnemingen, terwijl 'gesimplificeerde habitats' zijn gekarakteriseerd op basis van luchtfoto's en 'machine learning analyse' (zie 2.2.4).



Figuur 2.6. Afstand tot aan de zee en biodiversiteit, gemeten a.d.h.v. aantal plantensoorten (A), plantengenera (B), gedetailleerde habitats (c) en gesimplificeerde habitats (D). Verder opgesplitst naar regio (Wadden, Hollandse kust & Delta) waarbij de zwarte lijn de gemiddelde waarde aangeeft.

Figure 2.6. Distance to the sea and biodiversity, measured by number of plant species (A), plant genera (B), detailed habitats (c) and simplified habitats (D). Further broken down by region (Wadden, Holland mainland coast & Delta) whereby the black line indicates the average value.



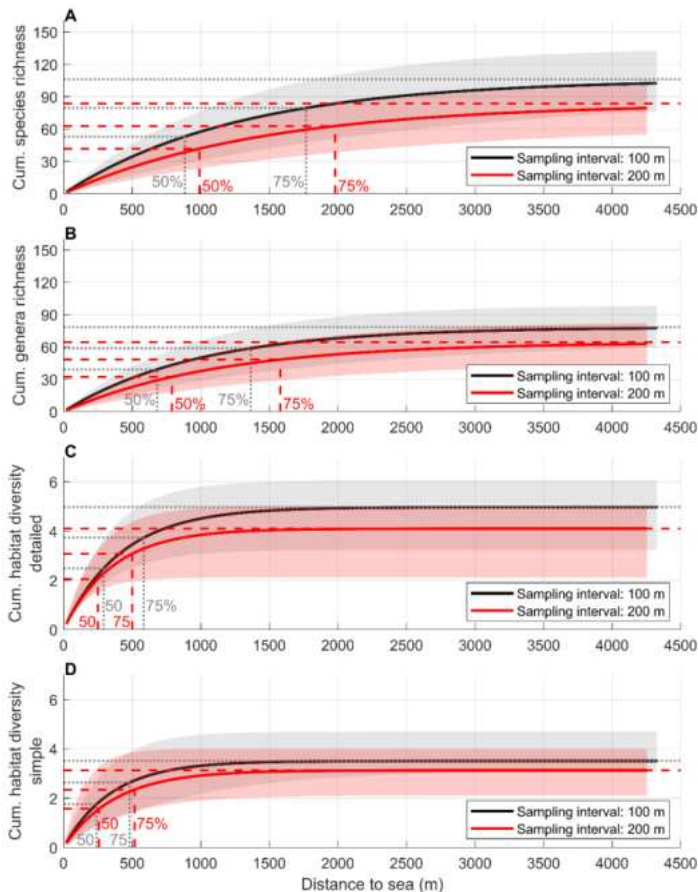
N.B. Bij gedetailleerde habitatdiversiteit zijn 10 verschillende habitats onderscheiden, zoals aangegeven in Figuur 2.5, terwijl de gesimplificeerde bepaling van de habitatdiversiteit uitgaat van maar 5 habitats, namelijk kaal zand, gras, struiken, loofbos en naaldbos.

Bij habitatdiversiteit wordt de 75% eerder bereikt bij een interval van 200m dan bij 100m, al zijn de verschillen klein<sup>4</sup>.

*Figuur 2.7. Afstand tot aan de zee en biodiversiteit, gemeten adhv aantal plantensoorten (A), plantengenera (B), gedetailleerde habitats (c) en gesimplificeerde habitats (D), voor alle drie regio's samen. De zwarte lijn geeft de sampling interval van 100m weer terwijl bij de rode lijn een sampling interval van 200m is gehanteerd.*

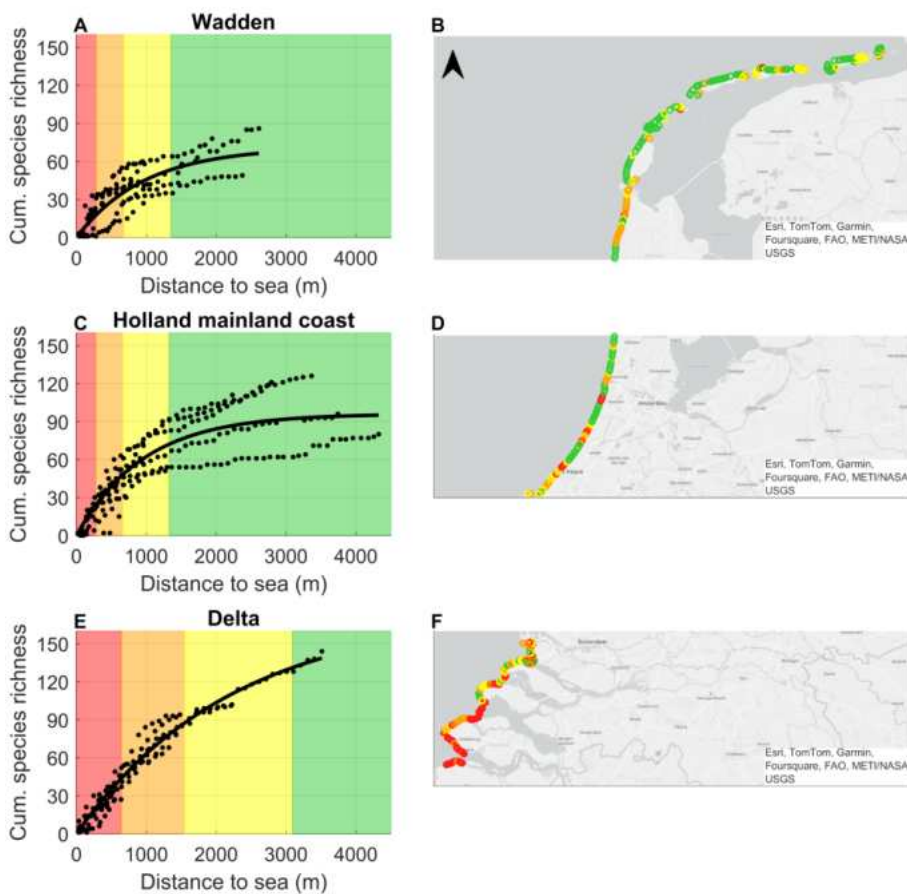
*Figure 2.7. Distance to the sea and biodiversity, measured by number of plant species (A), plant genera (B), detailed habitats (c) and simplified habitats (D) for all three regions together. The black line indicates the average value. The black line shows the sampling interval of 100m, while the red line shows a sampling interval of 200m.*

N.B. Bij gedetailleerde habitats (gekaracteriseerd op basis van veldwaarnemingen) zijn 10 verschillende habitats onderscheiden, zoals aangegeven in Figuur 2.5, terwijl de gesimplificeerde bepaling van de habitatdiversiteit (op basis van deep learning en luchtfoto's; zie 2.2.4) uitgaat van maar 5 habitats, namelijk kaal zand, gras, struiken, loofbos en naaldbos.



<sup>4</sup> Wanneer de plots 200m (ipv 100m) uit elkaar liggen, worden veel soorten en genera in eerste instantie 'gemist', die later in het transect alsnog gevonden worden. Daardoor vlakt de accumulatiecurve later af. Echter, de accumulatie van de gedetailleerde habitatdiversiteit reageert anders: een groter sampling interval zorgt ervoor dat 'kleinere' habitats - zoals dune slacks, broadleaf forests of heather – regelmatig 'overgeslagen' worden. Ze worden dus niet later gesampled (zoals bij de plantensoorten en -genera), maar volledig gemist in het transect. Dit zorgt ervoor dat de asymptoot lager ligt en deze iets dichterbij zee bereikt wordt. Tot slot heeft het vergroten van de sampling interval nauwelijks effect op de accumulatie van de versimpelde habitatdiversiteit. Waarschijnlijk komt dit doordat de versimpelde habitats voldoende groot zijn in omvang: ze worden niet overgeslagen, wanneer de plots 200m uit elkaar liggen.

Figuur 2.8 geeft de relaties weer tussen planten soortenrijkdom en de afstand tot de zee voor de drie regio's (Wadden, Hollandse kust, Delta). De kaarten geven de voorspelde soortenrijkdom weer op basis van die relaties en de breedte van de onbeknelde kustzone uit Figuur 2.2. De voorspelde soortenrijkdom is ten op zichte van de potentiële soortenrijkdom in die regio. De potentiële soortenrijkdom is gedefinieerd als het theoretisch aantal plantensoorten dat een transect (gemiddeld) kan behalen, wanneer de transectlengte niet beperkend is. Bij groene kustlijnen wordt ten minste 75% van de potentiële soortenrijkdom bereikt terwijl bij de rode kustlijnen minder dan 25% wordt bereikt. Als een ecosysteem arm is aan soorten is het ook logisch dat 75% van de potentiële soortenrijkdom eerder wordt bereikt dan als het rijk is aan soorten. De Wadden halen het beste hun potentie qua soortenrijkdom, terwijl de Delta het slechtst presteert.



Figuur 2.8. De berekende soortenrijkdom, gebaseerd op de infrastructuur-vrije breedte (Figuur 2.2). Per regio is de lokale afstand tot de zee – soortenrijkdom relatie gebruikt. De kaart geeft de soortenrijkdom weer ten op zichte van de potentiële rijkdom (zie asymptoten Figuur 2.6). 0-25% rood, 25-50% oranje, 50-75% geel en 75-100% groen.

Figure 2.8. The calculated species richness, based on the infrastructure-free width (figure 2.2). For each region the local distance to the sea – species richness relationship is used. The map shows species richness in relation to potential richness (see asymptotes, figure 2.6). 0-25% red, 25-50% orange, 50-75% yellow and 75-100% green. %.

N.B. Voor de Wadden zijn de benodigde kustbreedtes 0.3 km (25%), 0.7 km (75%) en 1.4 km (75%). Voor de Hollandse kust zijn de benodigde kustbreedtes 0.3 km (25%), 0.7 km (75%) en 1.3 km (75%). Voor de Delta regio zijn de benodigde kustbreedtes 0.6 km (25%), 1.5 km (75%) en 3.1 km (75%).

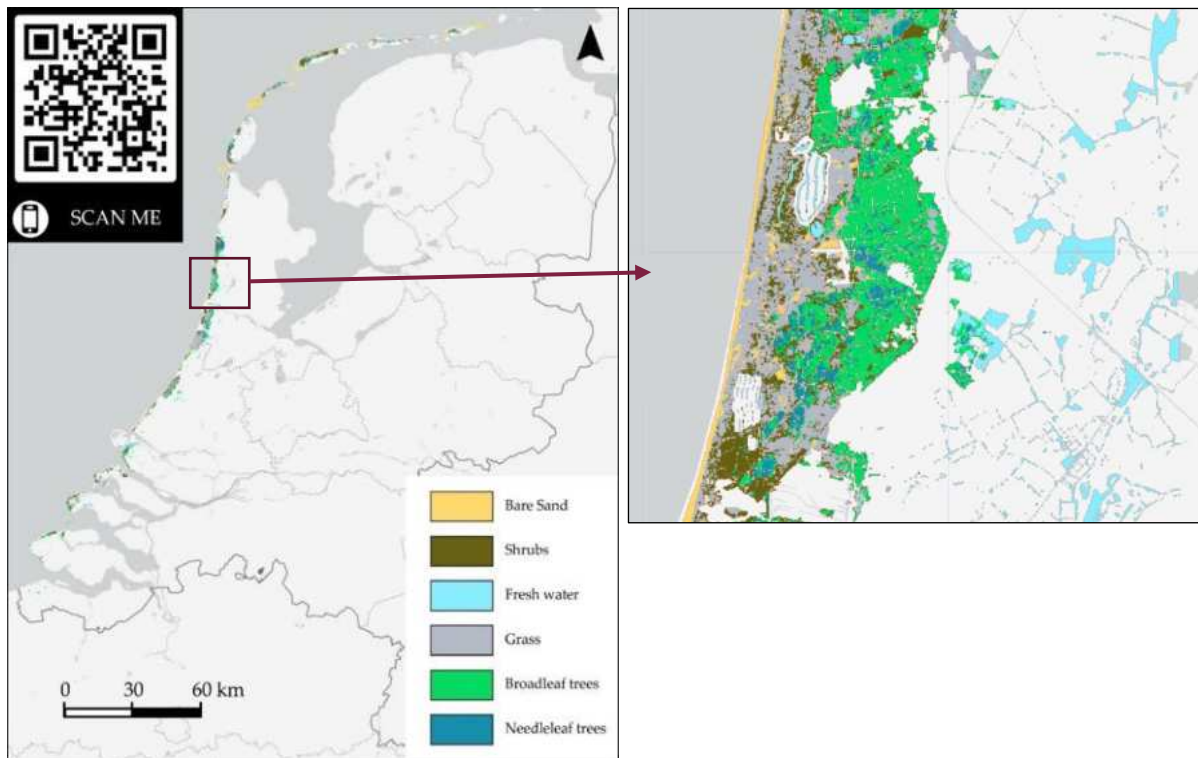
### 2.2.3 Ecologische karakterisering mbv 'deep learning' & benodigde breedte Nederlandse duinen

Als aanvulling op het empirische onderzoek langs de 35 transecten, is de Nederlandse duinvegetatie vlakdekkend in kaart gebracht met behulp van een innovatieve nieuwe methode: zogenaamde 'deep learning', waarbij aan de hand van analyse van multispectrale beelden vegetatie wordt gekarakteriseerd. Deze aanpak is toegepast voor analyse van de gehele Nederlandse kustlijn waarbij gebruik is gemaakt van zogenaamde Convolutional Neural Networks voor automatische classificatie van kustduinvegetatie door een computermodel. Hierbij zijn als inputgegevens gebruikt: orthofotomozaïeken inclusief infrarood (genomen in de periode 15-05-2020 t/m 15-08-2020; resolutie van 25 cm), digitaal oppervlaktemodel en vegetatiehoogtemodel (gemeten in 2020; resolutie 50 cm) en een landgebruikskaart (geproduceerd in 2019; resolutie 5m).

Vervolgens werd in de Nederlandse kustzone het gebied geselecteerd, dat op de landgebruikskaart aangemerkt was als 'natuur'. Voor dit gebied werden vervolgens de inputgegevens gestapeld in rasters met zeven ruimtelijke lagen: 1. rood, 2. groen, 3. blauw, 4. infrarood, 5. digitaal oppervlaktemodel, 6. vegetatiehoogte, en 7. afstand tot de zee. Voor training van het computermodel is een vlakdekkend masker nodig, dat de verschillende vegetatietypes weergeeft. Hiervoor is een selectie van de luchtfoto's visueel geanalyseerd en is handmatig aangegeven waar de volgende vegetatietypes zich bevinden: kaal zand, struiken, zoetwater, grasland, loofbomen en naaldbomen. Vervolgens is een deep learning model getraind met behulp van het rekencluster van het NIOZ. Bij evalueren van het model bleek dat gebruik maken van alle zeven lagen (kanalen) de meest nauwkeurige voorspellingen oplevert. In 88% van de gevallen gaf het model een juiste interpretatie van de duinvegetatie<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Dit verschilt per habitattype – zie Figuur 3.11 van het tweede tussenrapport, en Bijlage 1, Tabel 1.

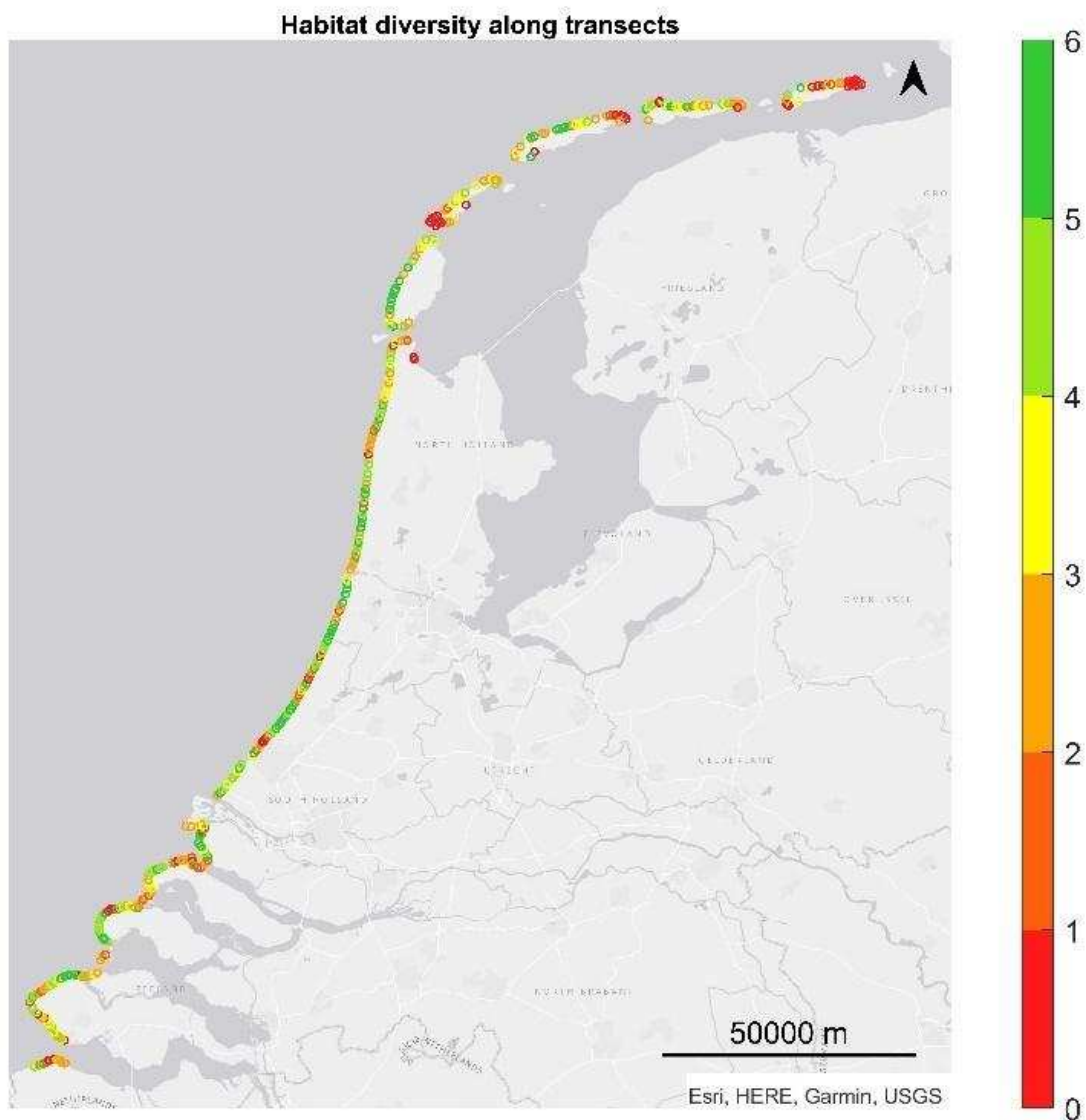


*Figuur 2.9. Op deep learning gebaseerde gesimplificeerde kartering van de vegetatie langs de gehele Nederlandse kust.  
Figure 2.9. Deep learning-based simplified mapping of vegetation along the entire Dutch coast.*

N.B. Door de QR-code te scannen komt men op de gedetailleerde kaart waarbij kan worden ingezoomd (<https://evalansu.users.earthengine.app/view/nlcoastalhabitats>); de rechterkaart toont een inzooming van een klein deel van de kaart.

In Figuur 2.10 is uitgegaan van de 429 transecten die gebruikt zijn om de breedte van de onbeknelde kustzone langs de hele Nederlandse kust te bepalen (zie Figuur 2.2). Langs deze transecten is habitat diversiteit berekend door te sampelen in de door deep learning gekarteerde Nederlandse kust (zie Figuur 2.9). Met deze transecten is de habitat diversiteit berekend: er is bepaald hoeveel unieke habitats de transecten op de habitatkaart doorkruisen.

Dat levert een kaart op waarop de diversiteit aan habitats is aangegeven dat varieëert van rood (slechts 1 habitattypen) tot groen (6 habitattypen aanwezig).

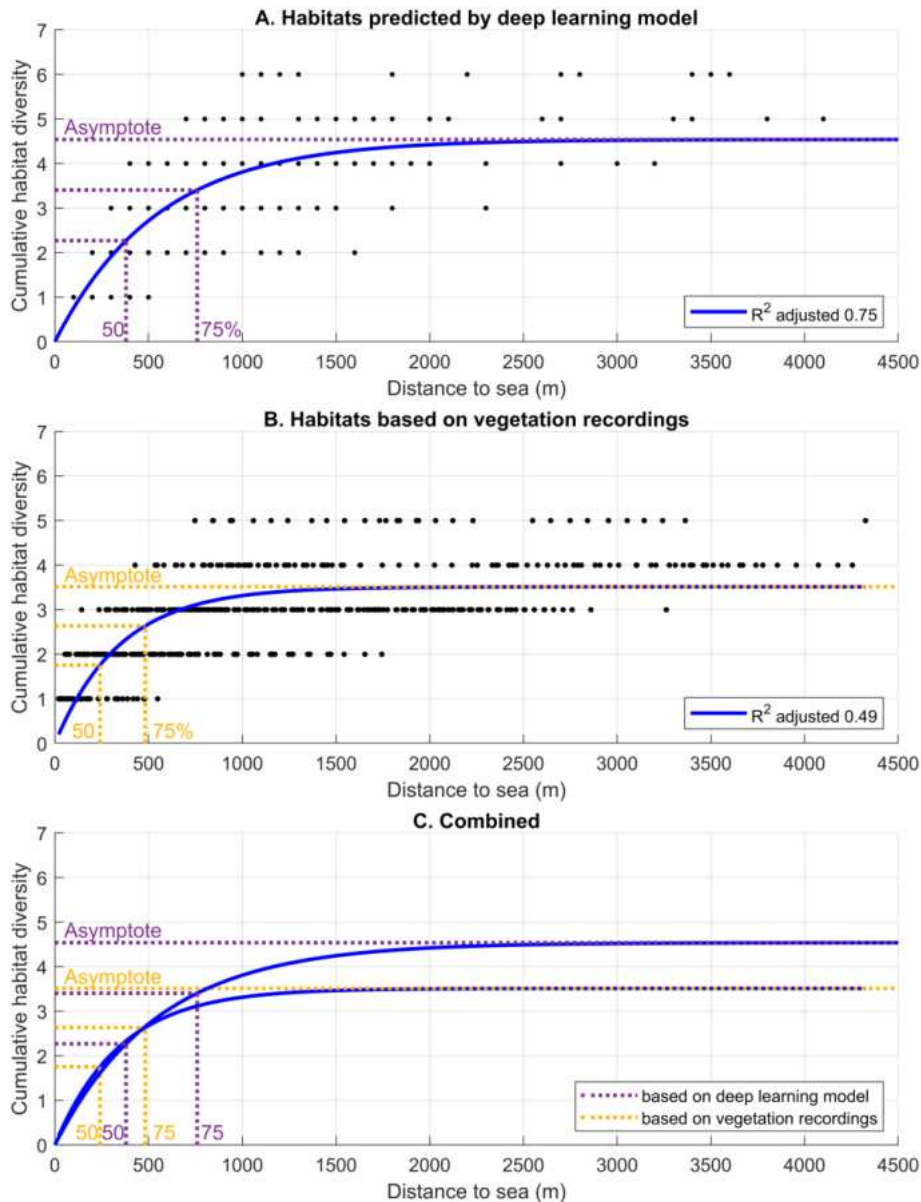


*Figuur 2.10. Habitatdiversiteit langs de Nederlandse kust, gebaseerd op gesimplificeerde kartering mbv deep learning.*  
*Figure 2.10. Habitat diversity along the Dutch coast, based on simplified mapping using deep learning.*

Figuur 2.11 geeft de diversiteit aan habitats weer als functie van afstand tot de zee, waarbij twee methodes zijn gebruikt. De bovenste grafiek (2.11A) is op basis van de door deep learning gegenereerde habitat kaart, terwijl de middelste grafiek gebaseerd is op een habitat indeling van de vegetatie-opnames uit het veld (2.11B). Om de methodes met elkaar te kunnen vergelijken, is de deep learning gegenereerde kaart bemonsterd langs transecten met een sampling interval van 100m (2.11A), net zoals het sampling interval tussen de vegetatie-opnames (2.11B). Om de 'punten' op de door deep learning gegenereerde kaart te bemonsteren, is de meest voorkomende habitat bepaald in een 'range' van 10m. Tot slot, een laatste verschil is dat er voor Figuur 2.11B langs slechts 35 transecten de habitats zijn bepaald, terwijl de deep learning gegenereerde kaart langs wel 429 transecten bemonsterd is. Figuur 2.11A bevat dus veel meer punten dan 2.11B, ook al is dat niet direct zichtbaar omdat de punten sterk overlappen.



Hoewel de methodes erg verschillend zijn, is het resultaat vergelijkbaar (2.11C). Bij de deep learning aanpak wordt 75% van de habitatdiversiteit bereikt op een afstand van 750m van zee, terwijl met informatie uit de vegetatie-opnames deze diversiteit al op een kleinere breedte wordt bereikt, bij 500m van de zee. Dus ook hier geldt: hoe simpeler de indeling (zes habitats bij deep learning of vijf habitats bij vegetatie opnames), hoe dichter bij de zee de habitatdiversiteit verzadigt.



Figuur 2.11. Twee methodes om habitatdiversiteit te bepalen. Op de deep learning kaart (bestaande uit zes klassen: kaal zand, gras, struiken, loofbos, naaldbos en zoetwater) zijn langs 429 transecten de habitats om de 100m gesampled (A). Ook zijn de habitats bepaald aan de hand van de vegetatie-opnames in het veld. Langs 35 transecten is om de 100m het habitat bepaald (vijf voorkomende klassen: kaal zand, gras, struiken, loofbos, naaldbos) (B). Om deze relaties te kunnen vergelijken, worden ze ook samen weergegeven (C).

Figure 2.11. Habitat diversity as function of distance to sea, determined using 429 transects and the six classified habitats on the deep learning habitat map (A) and determined using the 35 fieldtransects, which consisted of five different habitats (B). To compare the relations, they are also displayed together (C).



## 2.2.4 Abiotische samenstelling van kustbodems & vegetatie

Zoals aangegeven in 2.2.3 zijn langs de 35 transecten vanaf het strand tot aan de bebouwde infrastructuur om de 100m vegetatieopnames gemaakt. In totaal zijn van 541 plots monsters genomen van vegetatie en bodem. Vegetatie, habitats en biodiversiteit zijn besproken in 2.2.3-2.2.4, en dit hoofdstuk gaat verder in op de (a)biotische samenstelling van deze bodem- en plantenmonsters.

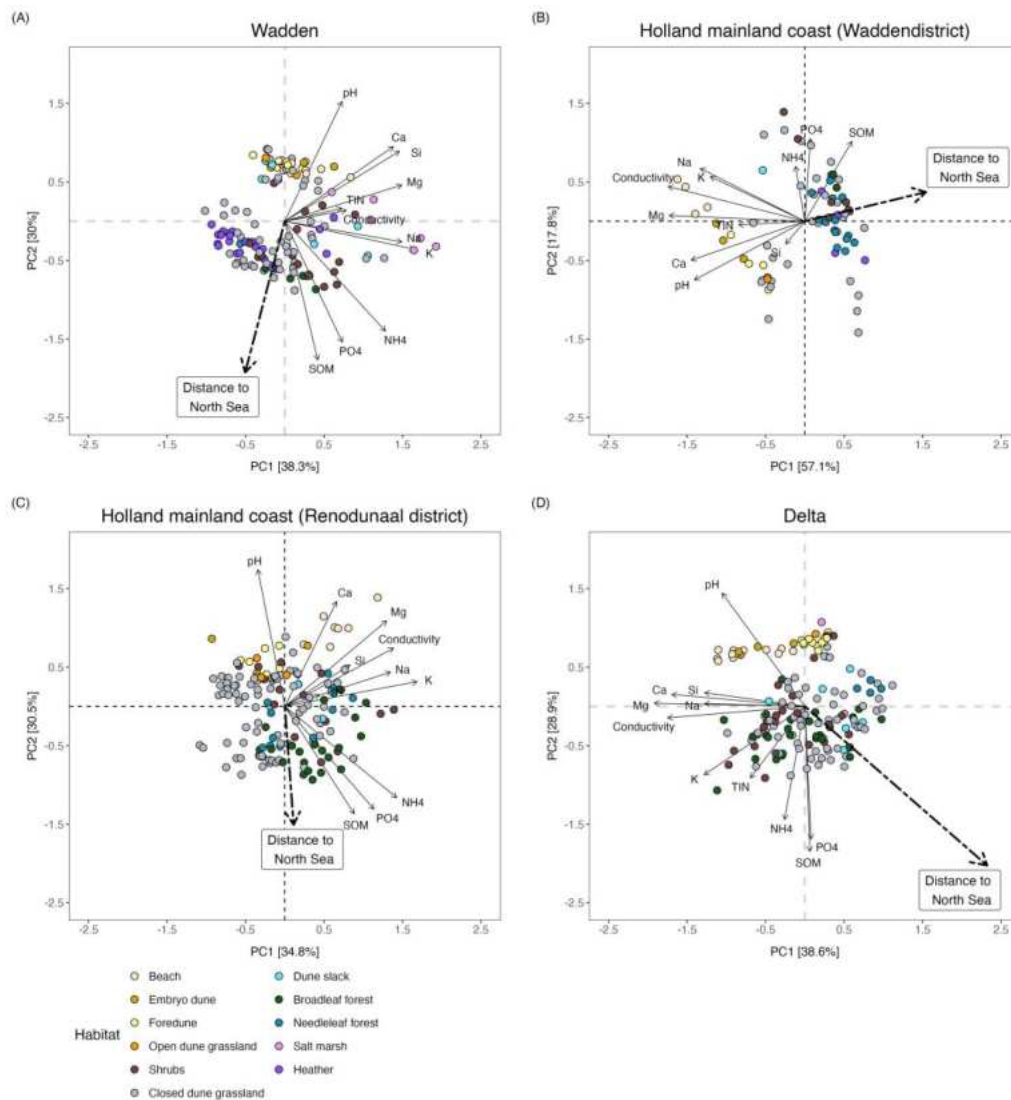
Hiervoor is allereerst in het lab de (a)biotische samenstelling bepaald van de bodemmonsters (Ca, K, Mg, Na, NH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, PO<sub>4</sub>, Si, pH, geleidbaarheid mS en % SOM (soil organic matter = organische stof in de bodem)) en van de plantenmonsters (N, P, K levende bovengrondse biomassa, en aantal plantensoorten). Vervolgens zijn de verschillen in samenstelling onderzocht aan de hand van (i) het bodemmilieu en hoe dit relateert aan de afstand tot de zee en, (ii) nutriënten concentraties van de plantengemeenschappen. Er is gekozen om een multivariate techniek te gebruiken voor de analyse van het bodemmilieu. Met deze methode kunnen meerdere relaties tussen parameters tegelijk worden geanalyseerd en kunnen algehele patronen van verschillen tussen monsterpunten worden weergegeven. Hiervoor worden eerst alle bodemvariabelen getransformeerd naar een dimensieloze standaardvorm, zodat verschillen in meetmethoden of eenheden worden uitgesloten. Voor deze analyse werd de concentraties gemeten in mg/g bodem gebruikt. Er is echter dezelfde analyse uitgevoerd met de concentraties gecorrigeerd voor de bulkdichtheid per bodemmonster, uitgedrukt in mg/ml bodem. Aangezien de resultaten zeer sterk op elkaar lijken en de gecorrigeerde analyse meer potentiële meetfouten introduceert, is deze alleen ter vergelijking opgenomen in Bijlage 2 (Figuur 1). Tenslotte werd in dit onderzoek niet alleen onderscheid gemaakt tussen de drie kustregio's, maar ook tussen de twee floradistricten: het Waddendistrict (kalkarm) en het Renodunaal district (kalkrijk), om rekening te houden met de van nature voorkomende verschillen in kalkgehalte langs de Nederlandse kust. Dus transecten ten noorden van Bergen aan Zee behoren tot het Waddendistrict, terwijl de transecten ten zuiden van Bergen aan Zee tot het Renodunaal district behoren.

### Samenstelling bodemmilieu

Om de samenstelling van het bodemmilieu te onderzoeken, is een Principale Component Analysis (PCA) uitgevoerd. Met behulp van deze multivariate analyse worden de bodemparameters samengevoegd tot zogenaamde principale components (PC). Deze componenten geven een samenvattend overzicht van de variatie in alle bodemparameters. De resultaten van de PCA-analyse zijn weergegeven in Figuur 2.12 voor de drie regio's (Wadden, Hollandse Kust, Delta), waarbij de richting en lengte van de zwarte pijlen de richting en sterkte van de invloed van elke bodemparameter aangeven. Als pijlen in dezelfde richting wijzen, zijn de parameters positief gerelateerd, een rechte hoek geeft aan dat er geen relatie is, en een tegenovergestelde richting wijst op een negatieve relatie. De punten vertegenwoordigen elk bemonsterd plot per kustregio, en de kleuren geven het bijbehorende habitattypen aan. De afstand tussen de punten is bepaald op basis

van de verschillen tussen de gemeten waarden. Een grote afstand tussen twee punten duidt op een groot verschil, terwijl punten die dicht bij elkaar liggen op elkaar lijken.

Globaal gezien tonen de PCA-resultaten voor de drie regio's (Wadden, Hollandse Kust, Delta) vergelijkbare patronen in de samenstelling van het bodemmilieu. In het geval van de transecten langs de Nederlandse kust blijkt dat de concentratie van (aard)alkalimetalen het grootste deel van de variatie in het bodemmilieu verklaart (spreiding langs PC1), en dat dit vooral verschil binnen de habitattypen beïnvloed. Daarentegen werd het verschil tussen habitattypen (PC2) voornamelijk bepaald door variaties in pH, beschikbare voedingsstoffen (PO<sub>4</sub>, NH<sub>4</sub>) en organische stof. Bij voorbeeld, vroege successiestadia zoals strand, embryonale duinen en voorduinen bevinden zich meestal dicht bij de kop van de pH-pijl, wat aangeeft dat deze habitattypen een hogere pH hebben. Habitattypen zoals struweel, haai, of de bossen liggen daarentegen verder van de kop van de pH-pijl, wat erop wijst dat ze een lagere pH hebben. Tegelijkertijd wijst de pijl van het percentage organische stof (SOM) in de tegenovergestelde richting van de pH-pijl. Dit betekent dat struweel, heide en bossen grotere hoeveelheden organische stof bevatten en een lagere pH hebben dan strand, embryonale duinen of voorduinen. Een uitzondering vormen de transecten langs de Hollandse kust in het Waddendistrict (Figuur 2.12 – B). Hier blijkt dat het kleinere aantal monsterpunten en de grotere variatie (Bijlage 2, Tabel 1) ervoor zorgt dat de invloed van de bodem-pH iets sterker samenvalt met PC1, naast de invloed van (aard)alkalimetalen. Desondanks vertoont het algemene patroon sterke overeenkomsten met de andere regio's. Wanneer de patronen van het bodemmilieu worden gerelateerd aan de afstand van elk monsterpunt tot de Noordzee, blijkt dat deze afstand (zwarte gestippelde pijl) bijna lineair gerelateerd is aan de afname van de pH en de toename van voedingsstoffen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat een bredere duinzone een diversere samenstelling van het bodemmilieu ondersteunt.



*Figuur 2.12. PCA-resultaten van de samenstelling van het bodemmilieu langs de 35 transecten van de (A) Wadden, (B) Waddendistrict Hollandse Kust, (C) Renodunaal district Hollandse Kust, en (D) Delta. De twee PC-assen (PC1 en PC2) laten zien hoeveel van de waargenomen variabiliteit in de gegevens wordt verklaard (in %). De gekleurde punten vertegenwoordigen elk bemonsterd punt langs het transect en het bijbehorende habitattyp. De lengte en richting van de zwarte pijlen geven de sterkte aan van alle bodemparementers bij het verklaren van de waargenomen variabiliteit langs de twee PC-assen. De gestippelde zwarte pijl geeft de relatie weer tussen de afstand tot de noordzee en de bodemsamenstelling.*

*Figure 2.12. PCA results of the composition of the soil environment along the 35 transects of (A) the Wadden, (B) Holland mainland coast (Wadden district), (C) Holland mainland coast (Renodunaal district), and (D) Delta. The two PC axes (PC1 & PC2) show how much of the observed variability in the data is explained (in %). The colored points represent each sample point along the transect and its associated habitat type. The length and direction of the black arrows indicate the strength of all soil parameters in explaining the observed variability along the two PC axes. The dotted black arrow visualizes the relation of Distance to the North Sea to the soil composition.*

### Samenstelling vegetatie

Vervolgens is de samenstelling van de nutriënten in het plantenmateriaal (25 x 25 cm deelmonster per 2 x 2 m vegetatieplot) geanalyseerd. Hierbij lag de focus op de concentraties van stikstof (N), fosfaat (P) en kalium (K), evenals hun verhoudingen in de levende bovengrondse biomassa. Alleen habitattypen gedomineerd door vaatplanten of graslanden werden in deze analyse meegenomen. Struiken, loof- en naaldbossen werden uitgesloten omdat bij deze categorieën niet konden garanderen dat alle lagen gelijk vertegenwoordigd waren binnen het vegetatiemonster. Om het effect van het natuurlijke verschil in kalkgehalte langs de Nederlandse kust op de nutriëntenconcentratie in de plantengemeenschappen te verduidelijken, werd, zoals voor het bodemmilieu, een onderscheid gemaakt tussen het Waddendistrict (kalkarm) en het Renodunaaldistrict (kalkrijk). Extreme uitschieters (outliers:  $\geq 3 \times$  Inter Quartiel Range) zijn voorafgaand aan verdere analyse verwijderd.

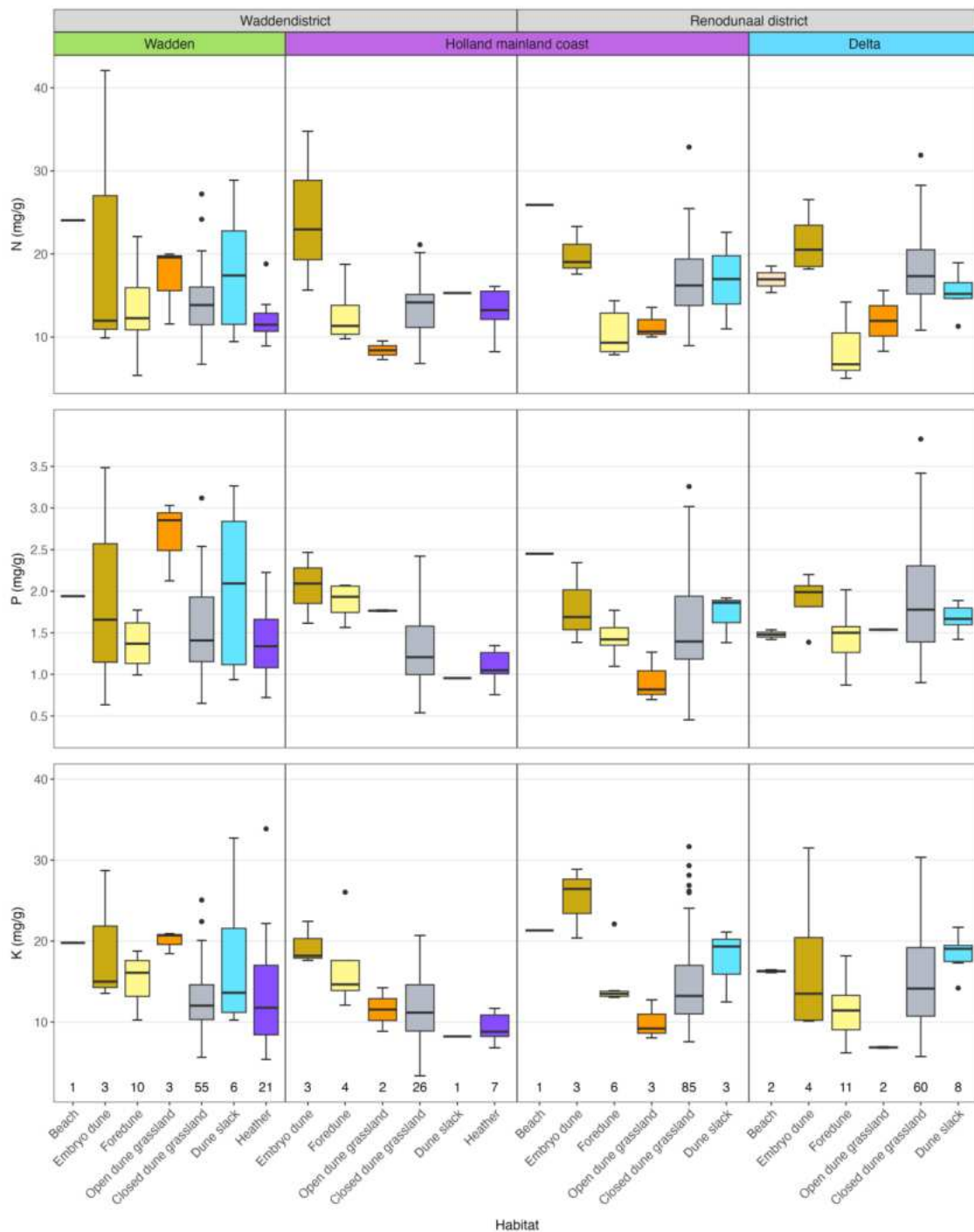
Figuur 2.13 toont in een boxplot de concentraties van stikstof (bovenkant), fosfaat (midden) en kalium (onderkant), gemeten als mg nutriënt per gram drooggewicht van de bovengrondse levende biomassa voor de verschillende habitattypen in de twee floradistricten. De volgorde van de habitattypen is gebaseerd op hun voornaamste voorkomen in relatie tot de afstand tot de Noordzee, zoals weergegeven in Bijlage 3, Figuur 1, waarbij het strand aan de linkerkant staat, als het dichtstbijzijnde punt bij de Noordzee.

In de Wadden verschillen de concentraties van stikstof, fosfaat en kalium weinig tussen de habitattypen. Alleen het verschil in concentraties tussen de voorduinen, het 'open duingrasland' en het 'gesloten duingrasland' is iets duidelijker, waarbij het 'open duingrasland' een iets hogere concentratie vertoont. Daarentegen blijkt dat zowel in het Waddendistrict als in het Renodunaal district van de Hollandse kust de nutriëntconcentraties eerst afnemen van het strand naar het 'open duingrasland', om daarna weer iets toe te nemen in het 'gesloten duingrasland'. Dit geldt echter niet voor de P- en K-concentraties in het Waddendistrict, waar de concentraties in het 'open duingrasland' meer lijken op die in het 'gesloten duingrasland'. In het Delta vertonen de nutriëntconcentraties zich relatief gelijk aan die in het Renodunaal district na de Hollandse kust. Over het algemeen liggen de concentraties van N, P en K (zie Bijlage 3, Tabel 1) in het geoogste plantenmateriaal binnen het bereik dat werd waargenomen door Wassen et al. (2021) in een grote dataset, die verschillende kruidachtige ecosystemen omvat, waaronder duingraslanden, duinplassen en heide.

Op basis van de nutriëntconcentraties hebben we vervolgens de verhoudingen per habitattypen en regio berekend, omdat deze een betere indruk geven van welke nutriënten beperkend zijn in het systeem. De uitkomsten zijn weergegeven in Figuur 2.14. N/P-verhoudingen tonen dat, op een paar uitzonderingen na, in alle habitats stikstofbeperkte omstandigheden heersen (zie Bijlage 3, Figuur 2). In geen van de habitattypen werd kaliumbeperking waargenomen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat langs de gehele Nederlandse kustlijn plantengemeenschappen in de duinen voornamelijk stikstof gelimiteerd zijn (zie Bijlage 3, Tabel 2). Voor de productiviteit van de lokale

plantengemeenschap lijkt het er voornamelijk op dat, wanneer stikstof beperkt is, het systeem ofwel een paar soorten kan ondersteunen die veel biomassa produceren, of veel soorten die minder biomassa produceren (zie Bijlage 3, Figuur 3).

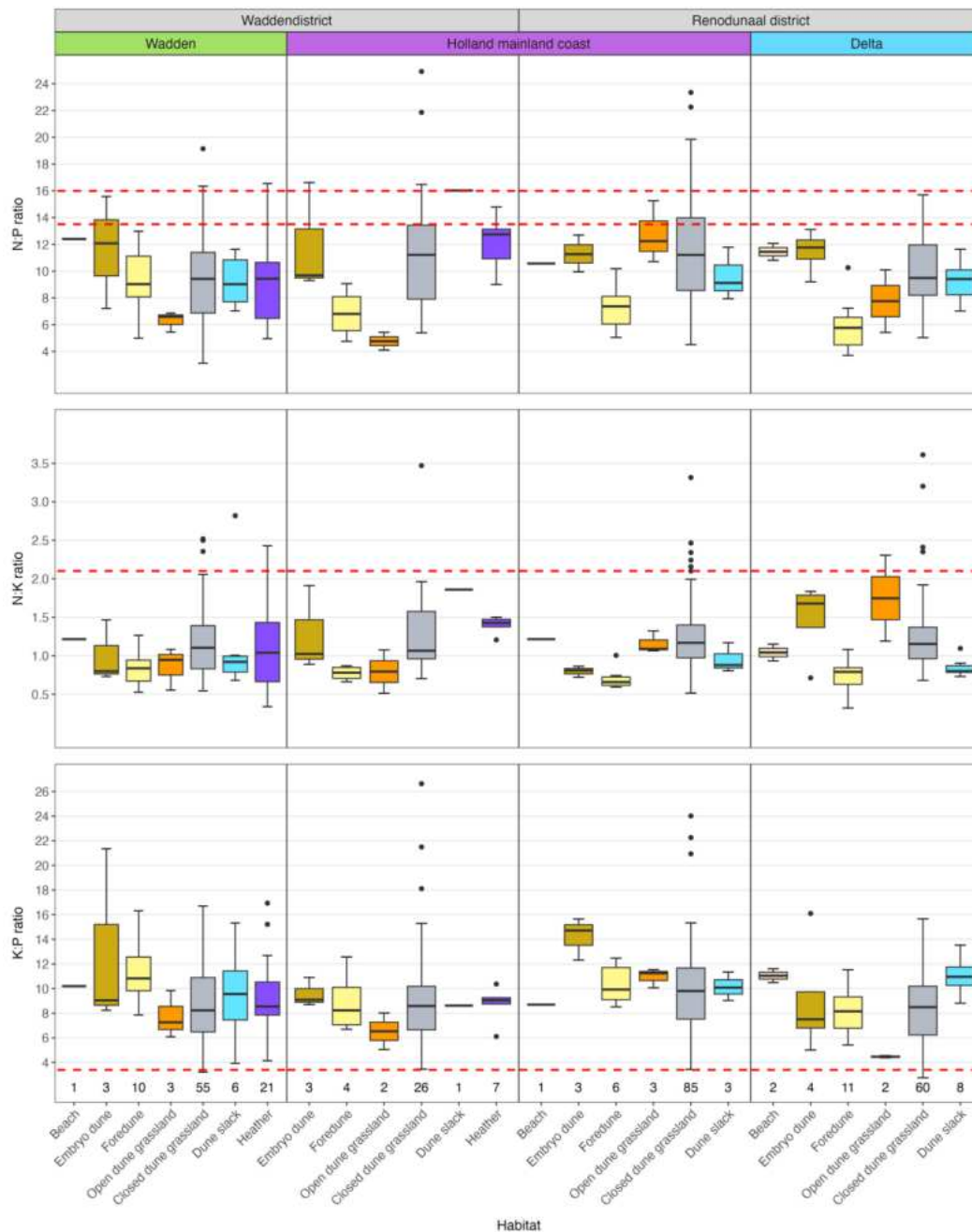
Over het algemeen geven de analyses van de bodem- en plantensamenstelling aan dat er geen duidelijke verschillen bestaan tussen regio's en tussen habitattypen. Zowel in de duinbodem als in de planten blijkt dat, langs de zee-naar-land gradiënt, kleinschalige variatie en lokale omgevingsfactoren van groter belang zijn voor het bepalen van de verschillen binnen habitattypen in het Nederlandse duinlandschap dan regionale of floradistrict-afhankelijke variaties. Aangezien de verschillen tussen habitattypen worden ondersteund door langere duingradiënten, bevestigt deze analyse het idee dat een breder duinlandschap een meer divers duinsysteem kan ondersteunen.



Figuur 2.13. Nutriëntenconcentraties in bovengrondse biomassa per habitattypen voor elke kustregio en gescheiden op basis van bloemendistrict. De getallen onderaan het perceel boven de habitattypen geven het aantal monsterpunten per habitattypen aan. Boven – concentratie stikstof uitgedrukt als mg N per gram drooggewicht van de plant. Midden – concentratie fosfor als mg P per gram drooggewicht van de plant. Onder – concentratie kalium (K) als mg K per gram drooggewicht van de plant.

Figure 2.13. Nutrient concentrations in above-ground biomass per habitat type for each coastal region and separated based on floral district. The numbers on the bottom of the plot above the habitat names indicate the numbers of sample points per habitat type. Top – concentration of nitrogen expressed as mg N per gram plant dry weight. Middle - concentration of phosphorus as mg P per gram plant dry weight. Bottom – concentration of potassium (K) as mg K per gram plant dry weight.





Figuur 2.14. Stikstof (N):Fosfor (P), Stikstof (N):Kalium (K) en Kalium (K):Fosfor (P) verhoudingen berekend op basis van concentraties van mg nutriënten per gram drooggewicht van de plant. Rode stippellijnen geven grenswaarden aan voor nutriëntenbeperking op basis van waarden gebruikt door Wassen et al. (2020). Boven - N:P verhoudingen, waarden tussen  $13,5 \leq n \leq 16$  geven co-beperking van zowel N als P aan. Waarden  $> 16$  geven P-beperking aan ten opzichte van N en waarden lager dan  $< 13,5$  geven N-beperking aan ten opzichte van P. Midden - N:K verhoudingen, met behulp van de kritische waarde van 2,1 met waarden  $> 2,1$  die K-beperking ten opzichte van N aangeven. Onder - K:P verhoudingen, met behulp van de kritische waarde van 3,4 met waarden  $> 3,4$  die P-beperking ten opzichte van K aangeven.

Figure 2.14. Nitrogen (N):Phosphorus (P), Nitrogen (N):Potassium (K), and Potassium (K):Phosphorus (P) ratios calculated based on concentrations of mg Nutrient per gram plant dry weight. Red dashed lines indicate cut-off values for nutrient limitation based on values used by Wassen et al. (2020). Top - N:P ratios, values between  $13.5 \leq$  and  $\leq 16$  indicates co-limitation of both N and P. Values  $> 16$  indicates P-limitation relative to N and values lower than  $< 13.5$  indicates N-limitation relative to P. Middle - N:K ratios, using the critical value of 2.1 with values  $> 2.1$  indicating K-limitation relative to N. Bottom - K:P ratios, using the critical value of 3.4 with values  $> 3.4$  indicating P-limitation relative to K.

### 2.2.5 Benodigde breedte voor een biodivers duinlandschap

Een antwoord op de kennisvraag “Welke breedte is minimaal nodig voor een biodivers duinlandschap?” vraagt om nuances. Op habitatniveau zien we dat alle langs de Nederlandse kust voorkomende habitats voorkomen bij een duinbreedte van minder dan 1500m. Echter, bij een breedte van 1500m stijgt de soorten accumulatiecurve nog aanzienlijk, waarbij 75% van de plantensoorten gemiddeld wordt bereikt bij een breedte van ongeveer 1800m. Bovendien verschilt dit aanzienlijk per regio – de curve vlakt het eerst af in het Wadden district (75% van de plantensoorten bij 1400m), maar stijgt juist veel langer door in de Delta (75% van de plantensoorten bij 3100m). Bovendien moet worden benadrukt dat “75% van de soortenrijkdom” niet kan worden gezien als een wetenschappelijke grenswaarde of als beleidsmatig doel. De in dit onderzoek gekozen waarden dienen slechts ter illustratie om te tonen hoe kustbreedte de biodiversiteit beïnvloedt.

### 3. Kennisvraag 3: Kan actief beheer worden geminimaliseerd door lange kustgradienten te herstellen?

Bij de derde kennisvraag staat centraal: “In hoeverre kan het herstel van lange kustgradienten bijdragen aan het behalen van de Natura-2000-doelstellingen met zo weinig mogelijk actief beheer in de vorm van frequente ingrepen?” Om de invloed van duinbeheer op soortenrijkdom te kwantificeren is in 2022 een vragenlijst naar lokale duinbeheerders gestuurd met vragen over beheersmaatregelen, vooral maatregelen die van invloed zijn op de 35 eerder onderzochte transecten (zie 2.2). Daarbij werden de volgende zeven (7) ingrepen opgenomen, die veel worden toegepast in de Nederlandse duingebieden: plaggen, maaien, klepelen van vegetatie, verwijderen van struiken, begrazing, kerven van duinen en het graven van stuifkuilen. Er werd gevraagd naar het aantal verschillende interventies dat in de afgelopen 20 jaar in de omgeving (250 meter) van het transect is uitgevoerd. De score per transect varieerde tussen 0 (geen interventies) en 7 (alle gespecificeerde interventies uitgevoerd).

Uit deze enquête blijkt dat er gemiddeld 2,5 soorten interventies werden uitgevoerd in de omgeving van de 35 onderzochte transecten (Tabel 3.1). De meest voorkomende ingrepen waren verwijdering van struiken (22 duingebieden), begrazing (18 duingebieden) en maaien (17 duingebieden). Een eenvoudig lineair regressiemodel met “transectlengte” en “aantal interventies per km transect” als verklarende variabelen kan 77% van de waargenomen variantie in soortenrijkdom verklaren (Tabel 3.2). Omdat alle variabelen genormaliseerd zijn, kunnen de standaard schattingen vergeleken worden. Ze suggereren dat transectlengte het grootste deel van de variantie in soortenrijkdom (0,94) verklaart, maar dat het aantal beheersmaatregelen per km transect (0,37) een belangrijk positief effect kan hebben. Bovendien zijn transectlengte en het aantal maatregelen per km positief gecorreleerd: 6% van de waargenomen variantie in het aantal beheersmaatregelen per km wordt verklaard door transectlengte.

*Tabel 3.1. Beheerinterventies uitgevoerd op de transectlocaties in Nederland (n=35). Hierbij zijn interventies opgenomen die gericht zijn op het resetten van vegetatiesuccessie en het vergroten van de sedimentdynamiek. De getallen geven het aantal transecten aan waarbij interventies zijn uitgevoerd.*

*Table 3.1. Management interventions performed at the transect sites in the Netherlands (n=35). Interventions were included that target resetting of vegetation succession and increasing sediment dynamics. The numbers indicate the number of transects at which interventions were performed.*

Interventies	Frequentie
Plaggen	8
Maaien	17
Klepelen	6
Begrazen	18
Verwijderen struiken	22
Kerven	8
Graven stuifkuilen	8

Tabel 3.2. Het lineaire regressiemodel om de totale soortenrijkdom van de transecten te verklaren. Om een normale verdeling van regressieresiduen te benaderen, zijn de verklarende variabelen vierkantswortel getransformeerd en genormaliseerd.

Table 3.2. The linear regression model to explain total species richness of the transects. To approach a normal distribution of regression residuals, the explaining variables are square root transformed and normalized.

Lineair regressiemodel: soortenrijkdom  $\sim 1 + \text{transectlengte} * \text{aantal ingrepen per km transect}$

	St. Estimate	SE	P value
<b>Intercept</b>	0.08	0.09	0.4
<b>Transectlengte (km)</b>	0.94	0.09	5.35E-12
<b>Aantal interventies per km transect</b>	0.37	0.11	2.70E-03
<b>Transectlengte: Aantal interventies per km transect</b>	0.32	0.13	1.50E-02
Aantal observaties: 35			
R-kwadraat: 0.79			
Aangepast R-kwadraat: 0.77			

N.b. St. Estimate = Standard Estimate, SE = Standard Error, P-value = “the probability, for a given statistical model that, when the null hypothesis is true, the statistical summary would be equal to or more extreme than the actual observed results”

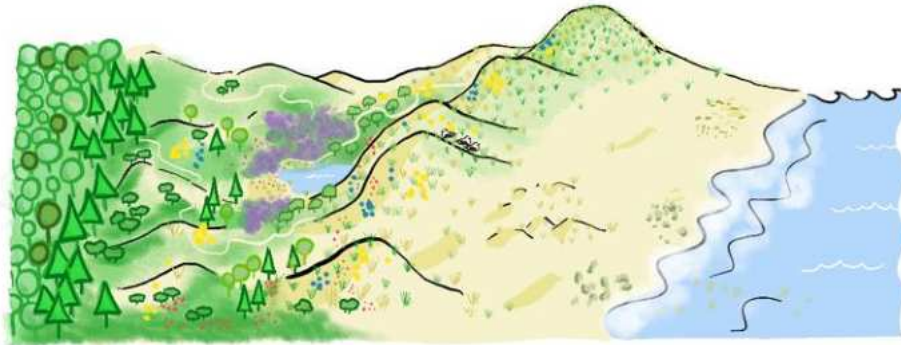
Figuur 3.1 geeft een conceptueel overzicht weer van drie verschillende landschapstypen:

- een intact duinecosysteem met een zelfgeorganiseerd habitatrijk landschap;
- een gedeeltelijk aangetast duinsysteem, aangetast door menselijke infrastructuur, waar beheeringrepen de habitatdiversiteit en soortenrijkdom vergroten; en
- een sterk gedegradeerd systeem waar managementinterventies niet meer effectief zijn.

Uit 2.2 blijkt dat bij voldoende kustruimte een biodivers duinlandschap zich ‘zelf’ kan ontwikkelen. Echter, de hierboven getoonde analyse toont dat het aantal beheersinterventies ook positief correleren met de soortenrijkdom, én dat kustbreedte en beheersinterventies elkaar hierin versterken. Bij een brede kust zijn beheersinterventies dus zelfs effectiever dan bij een smalle kust. Niettemin, kunnen beheersinterventies bij een smaller wordende kust het verlies van soortenrijkdom (tot op zekere hoogte) mitigeren.

Het is duidelijk dat een aanzienlijk deel van de Nederlandse kust in de categorie valt waar sprake is van gedeeltelijke aantasting, maar waar door ingrepen zoals plaggen, maaien, klepelen van vegetatie, verwijderen van struiken, begrazing, kerven van duinen en het graven van stuifkuilen, de diversiteit aan soorten en habitats kan worden vergroot. Overigens zijn deze maatregelen niet alleen van belang om het verlies aan kustbreedte op te vangen – veel zijn ook belangrijk om bijvoorbeeld de negatieve effecten van stikstofdepositie te mitigeren.

### WIDE WITHOUT INTERVENTIONS



### INTERMEDIATE WITH INTERVENTIONS



### NARROW WITHOUT INTERVENTIONS



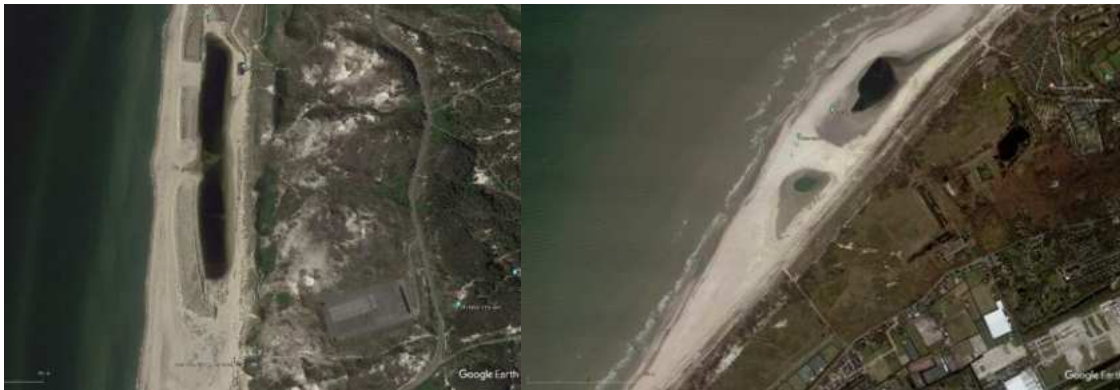
*Figuur 3.1. Conceptueel overzicht van drie verschillende landschapstypen: a. een intact duinecosysteem met een zelfgeorganiseerd habitatrijk landschap; b. een gedeeltelijk aangetast duinsysteem, aangetast door menselijke infrastructuur, waar beheeringrepen de habitatdiversiteit en soortenrijkdom vergroten; en c. een sterk gedegradeerd systeem waar managementinterventies niet meer effectief zijn.*

*Figure 3.1. Conceptual overview of three landscape types: a. an intact dune ecosystem with a self-organized habitat-rich landscape; b. a partly degraded dune system – encroached by human infrastructure – where management interventions increase habitat diversity and species richness; and c. a heavily degraded system where management interventions are not effective any more.*

## 4. Kennisvraag 4: Kunnen lange kustgradiënten worden hersteld door mega suppleties?

Megasuppleties zijn in Nederland maar op twee locaties uitgevoerd langs de Nederlandse kust: bij de Hondsbossche Duinen en bij de Zandmotor DeltaDuin. De Hondsbossche en Pettemer Zeewering (nabij Schoorl) is in 2015 versterkt met 30 miljoen kubieke meter zand en daarna hernoemd tot 'Hondsbossche Duinen'. De Zandmotor DeltaDuin is een in 2011 bij Ter Heijde (net ten westen van den Haag) aangelegde kunstmatige strandvlakte in de vorm van een schiereiland waarbij 21,5 miljoen kubieke meter zand is opgespoten (Figuur 4.1).

Omdat twee locaties met megasuppleties slechts een beperkt beeld geven van kustontwikkeling, zijn de Hondsbossche Duinen en de Zandmotor DeltaDuin vergeleken met twee locaties langs de Nederlandse kust waar op natuurlijke wijze kustaanwas (accretie) plaatsvindt: De Hors en De Balg. De Hors is een uitgestrekte strandvlakte aan het zuidpuntje van Texel. Met het door de zee opgeworpen zand ontstaan lage duintjes die, zodra ze hoog genoeg zijn begroeid raken, o.a. met biestaruwegras. De Hors is het enige gebied op Texel waar momenteel op deze grote schaal nieuwe duinen ontstaan en een zeer breed dynamisch strand aanwezig is. De Balg is het meest oostelijke puntje van Schiermonnikoog en wordt vaak aangeduid als 'het breedste strand van Europa'. Bij laagwater komt de oostpunt van het eiland droog te liggen en stroomt het water van de geulen terug de Noordzee in (Figuur 4.2).



*Figuur 4.1. De twee grootschalige zandsuppleties in Nederland: Hondsbossche Duinen (links) en de Zandmotor DeltaDuin (rechts).*

*Figure 4.1. The two mega-scale sand replenishments in the Netherlands: Hondsbossche Duinen (left) and the Zandmotor DeltaDuin (right).*





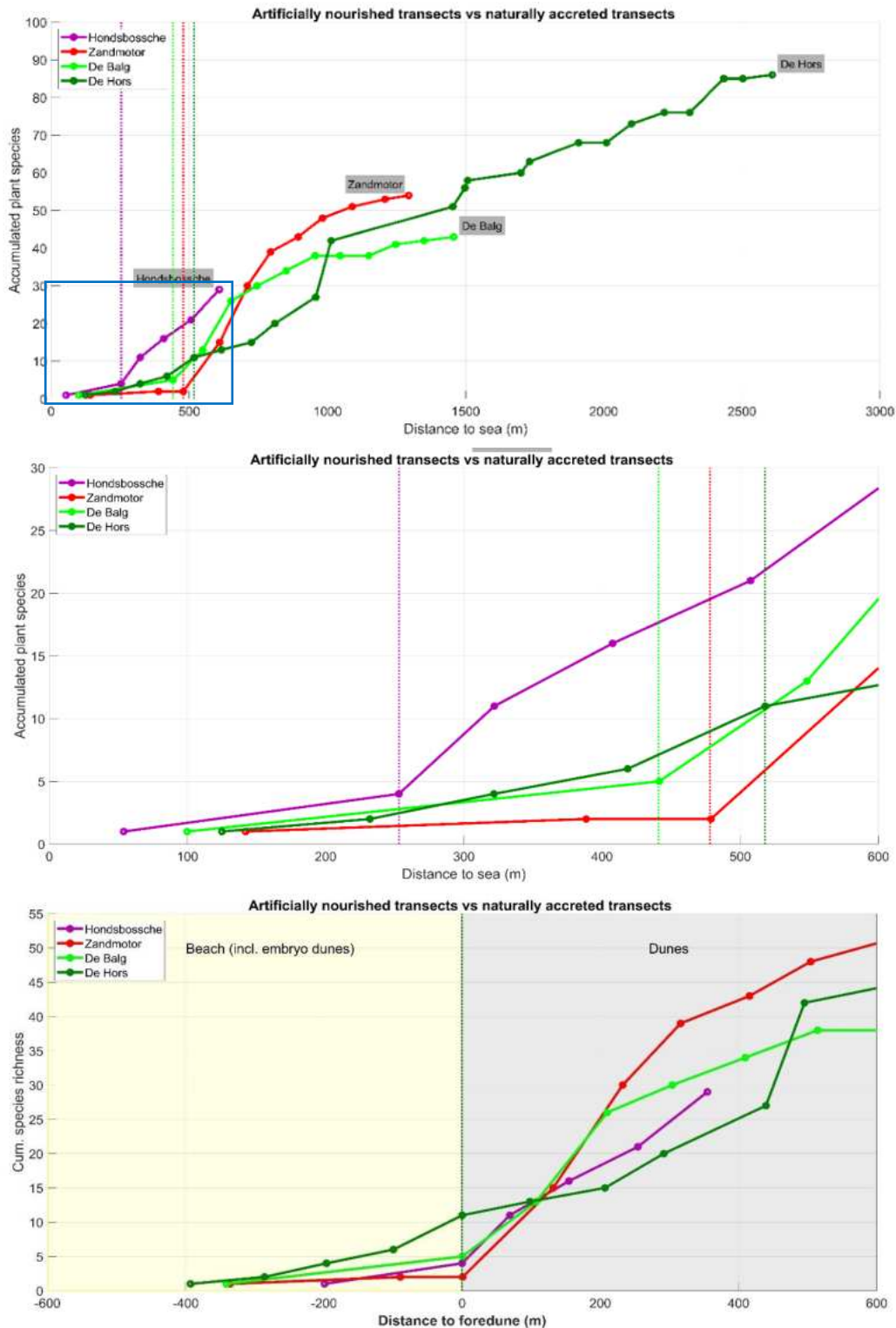
Figuur

4.2. Twee locaties langs de Nederlandse kust die op natuurlijke wijze uitbouwen De Hors (links) en De Balg (rechts).  
 Figure 4.2. Two locations along the Dutch coast that are expanding naturally are De Hors (left) and De Balg (right).

Figuur 4.3 geeft transecten in kunstmatig opgespoten kustlocaties (Hondsbossche Duinen, Zandmotor DeltaDuin) weer versus locaties die op natuurlijke wijze aangroeien (De Hors, De Balg). Op 4.3C geeft op de x-as de afstand weer tot de witte duin, wat deze transecten makkelijker met elkaar te vergelijken maakt. Hierbij is duidelijk dat met name De Hors, die natuurlijk aangroeit, een grotere diversiteit bereikt (tot aan het witte duin) dan de andere locaties. Verder zijn de verschillen gering.

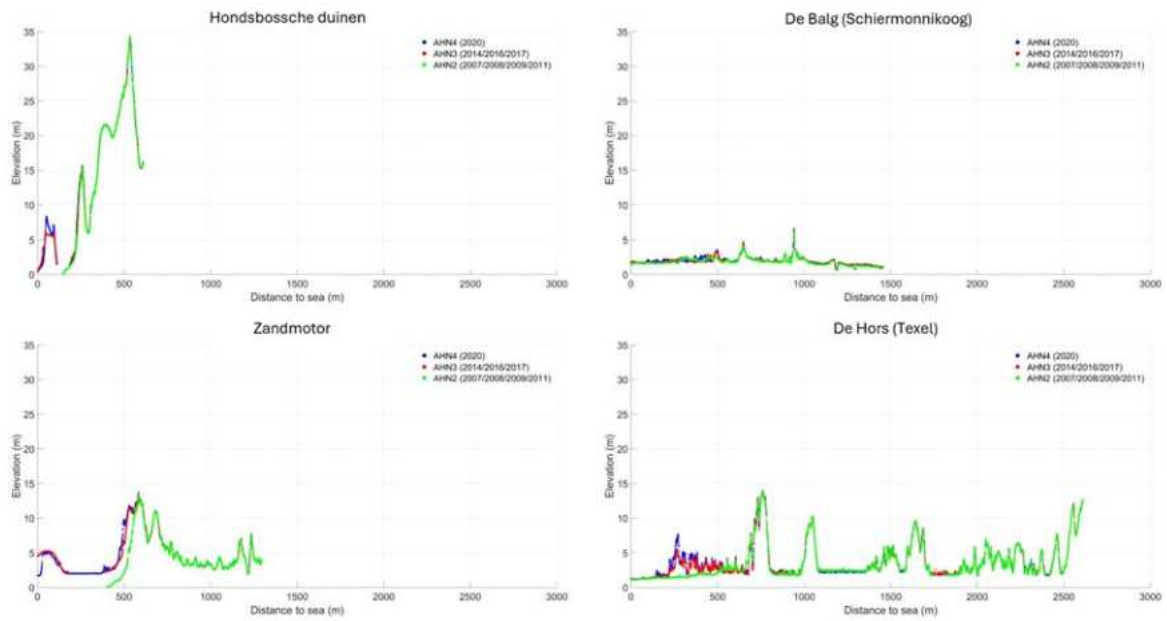
De hoogteprofielen van de Zandmotor en de Hondbossche waren vóór de suppletie al steiler dan die van de Balg en de Hors. Maar, de megasuppleties hebben de profielen nog eens flink hoger gemaakt. Die verhoging heeft ervoor gezorgd dat de zee het strand van de veel minder vaak (geldt voor Hondsbossche) tot vrijwel nooit (geldt voor de Zandmotor) kan overspoelen. Daardoor blijven de zanddynamiek en de aanvoer van plantenzaden beperkt op deze gesuppleerde stranden (zie variatie in hoogte in Figuur 4.4).

Behalve de morfologie, speelt ook de leeftijd van de strand-duin systemen een rol. De Hors en de Balg hebben langer de tijd gehad om zich te ontwikkelen dan de Hondbossche Duinen en de Zandmotor DeltaDuin, en het is waarschijnlijk dat soortenrijkdom meer te maken heeft met overspoeling en aanvoer van zaden. Er kan echter geen onderscheid worden gemaakt tussen het effect van leeftijd en het effect van zand opspuiten. Daarom zijn de verzamelde gegevens niet toereikend om conclusies te trekken omtrent herstellen van lange kustgradiënten d.m.v. mega suppleties.



Figuur 4.3. Transecten in kunstmatig opgespoten kustlocaties (Hondsbossche Duinen, Zandmotor DeltaDuin) versus locaties die op natuurlijke wijze aanwassen (De Hors, De Balg). A (boven) = met afstand tot aan de zee op de x-as; B (midden) = ingezoomd op linkerdeel van A; en C (onder) = met afstand tot aan de witte duin op de x-as.

Figure 4.3. Transects artificially replenished coastal locations (Hondsbossche Duinen, Sand Motor DeltaDuin) versus locations that accrete naturally (De Hors, De Balg). A (top) = with distance to the sea on the x-axis; B (centre) = part of A zoomed in; C (bottom) = with distance to the foredune on the x-axis.



*Figuur 4.4. Hoogte (y-as) versus afstand van zee (x-as) langs transecten in kunstmatig opgespoten kustlocaties (Hondsbossche Duinen, Zandmotor DeltaDuin) en locaties die op natuurlijke wijze aanwassen (De Hors, De Balg).  
 Figure 4.4. Height (y-axis) versus distance from the sea (x-axis) along transects in artificially replenished coastal locations (Hondsbossche Duinen, Zandmotor DeltaDuin) and locations that accrete naturally (De Hors, De Balg).*

## 5. Kennisvraag 5: Waar kunnen mega-suppleties worden toegepast voor herstel van kustgradiënten?

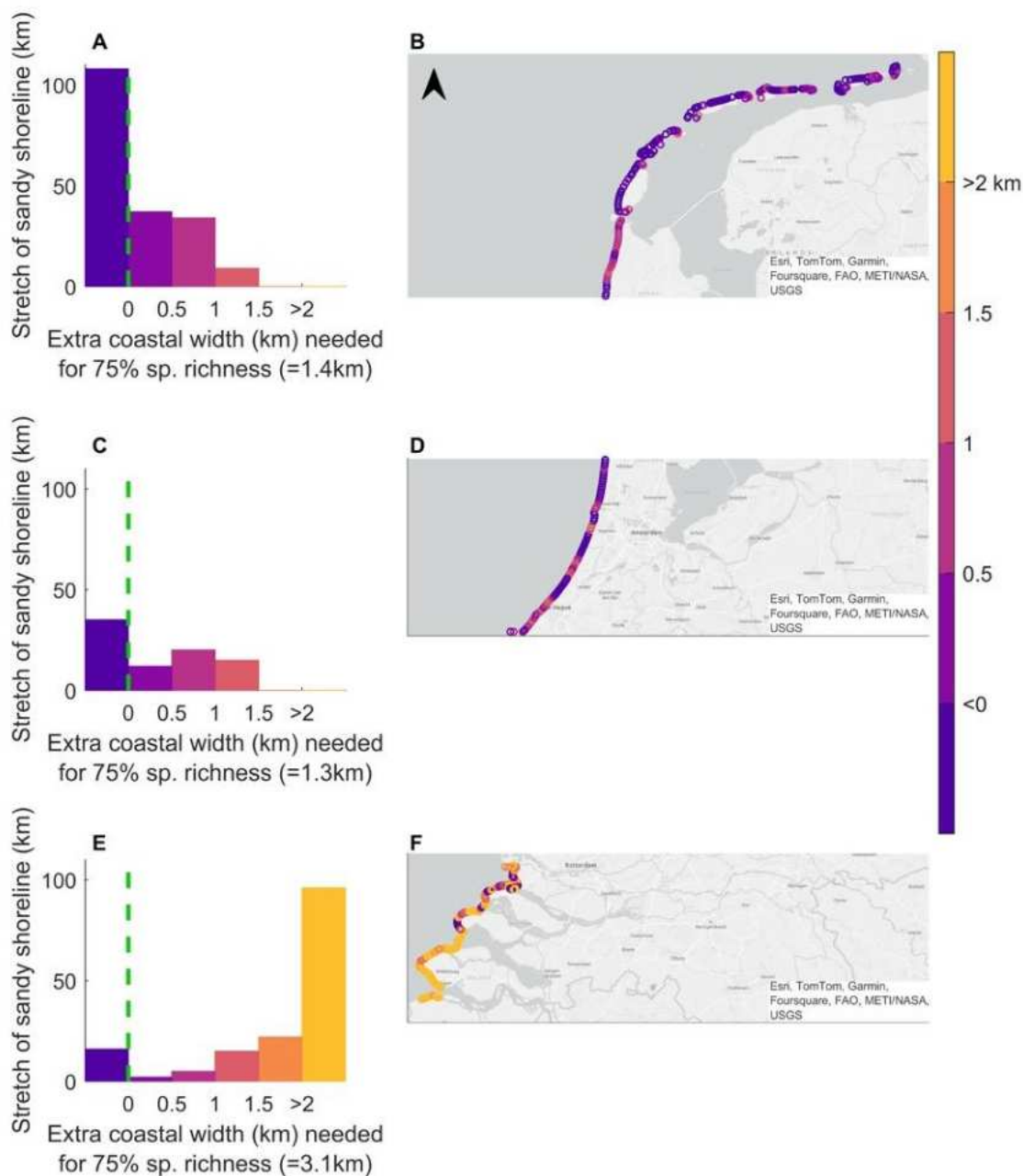
Waar de kustruimte ontoereikend is, kunnen zandsuppleties mogelijk de vereiste kustruimte creëren. Suppleties kunnen in het algemeen de zandbeschikbaarheid verhogen, maar dat in het geval van hoge vastgelegde primaire duinen, zijn wellicht aanvullende maatregelen nodig blijven om zandtransport naar achteren mogelijk te maken. De megasuppleties zijn vooral ook van belang om nieuwe aangroei (zoals bij de Hors) mogelijk te maken. Daar zit vooral de meerwaarde, want dit kan leiden tot een dynamischer duinhabitat, en daardoor mogelijk herstel van kustgradiënten.

Gebaseerd op de al aanwezige infrastructuur-vrije kustbreedte (Figuur 2.2) en de vereiste kustbreedte vanuit het perspectief van soortenrijkdom (Figuur 2.8), is berekend hoeveel kustbreedte er 'ontbreekt'. Om bijvoorbeeld 75% van de potentiële soortenrijkdom te bereiken, zijn de kustbreedtes van Figuur 5.1 nodig. Wanneer men bijvoorbeeld 90% van de potentiële soortenrijkdom zou willen bereiken, zijn kustbreedtes nodig zoals aangegeven in Figuur 5.2.

Om 75% van het diversiteitspotentieel te halen, is er langs 57% van de zandige kust in de Wadden, 43% van de Hollandse kust en 10% van de Delta kust voldoende ruimte. Langs de kusten waar onvoldoende ruimte is om 75% van het diversiteitspotentieel te halen, is er gemiddeld 0.6 km verbreding nodig op de Wadden, 0.8 km in langs de Hollandse kust en 2.3 km in de Delta. Een verbreding van een kilometer, zoals bij de Zandmotor gerealiseerd is, zou dus gemiddeld voldoende zijn om 75% van het diversiteitspotentieel te ondersteunen op de Wadden en langs de Hollandse kust. In de delta zou een verbreding van ruim twee keer de Zandmotor nodig zijn om de benodigde ruimte te creëren.

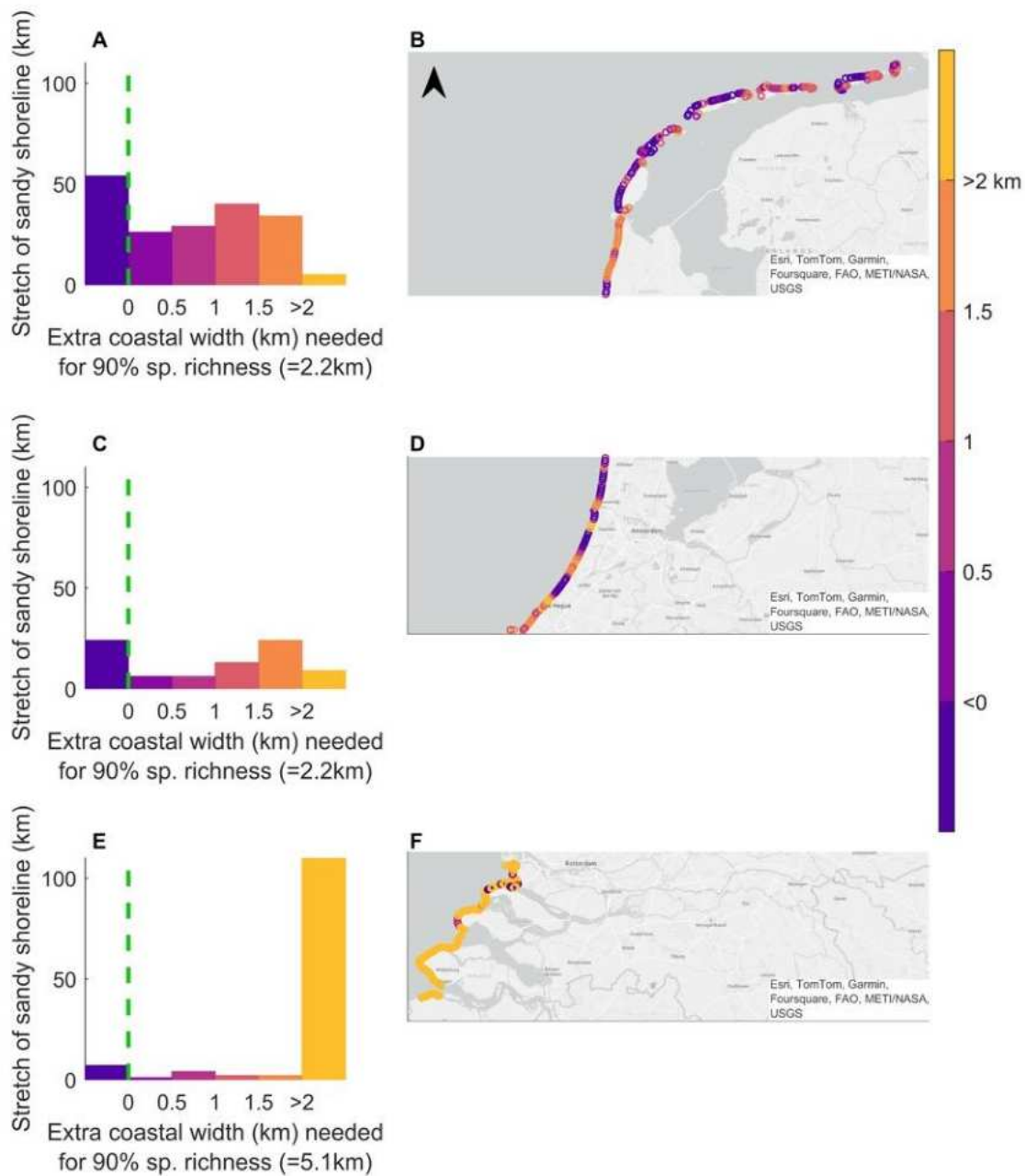
Om 90% van het diversiteitspotentieel te halen, is er langs 29% van de zandige kust op de Wadden, 29% van de Hollandse kust en 4% van de Delta kust voldoende ruimte. Langs de kusten waar onvoldoende ruimte is om 90% van het diversiteitspotentieel te halen, is er gemiddeld 1.1 km verbreding nodig op de Wadden, 1.4 km langs de Hollandse kust en 4.1 km in de Delta.

We merken op dat hierbij puur vanuit een ecologisch perspectief op kustbreedte gekeken wordt, en andere belangen, zoals die van bijvoorbeeld recreanten, economie of veiligheid niet zijn meegenomen in deze analyses. Ook kunnen de kosten een grote belemmering zijn, en beschikbare ruimte; bij de Deltakust, bijvoorbeeld, liggen er veel geulen direct voor de kust, waardoor kustuitbouw/(mega)suppleties niet mogelijk zijn. Uiteraard is een verlaging van het ambitieniveau tot bijvoorbeeld het behalen van een biodiversiteit van bijvoorbeeld 75% langs een bepaald percentage van de Nederlandse kust makkelijker te realiseren. Maar zoals eerder ook al opgemerkt zijn dit soort arbitraire keuzes niet aan ons.



*Figuur 5.1. Kustverbreding die nodig is om plaats te bieden aan 75% van de potentiële soortenrijkdom langs de Nederlandse kust. Grafieken A, C en E geven weer hoeveel kilometer kust breed genoeg is (links van de groene lijn) en hoeveel kilometer kust verbreding nodig heeft (rechts van de groene lijn).*

*Figure 5.1. Coastal widening that is necessary to preserve 75% of species biodiversity along the Dutch coast. Graphs A, C and E show how many kilometres of coastline are wide enough (to the left of the green line) and how many kilometres of coastline need to be widened (to the right of the green line).*



Figuur

5.2. Kustverbreding die nodig is om plaats te bieden aan 90% van de potentiële soortenrijkdom langs de Nederlandse kust. Grafieken A, C en E geven weer hoeveel kilometer kust breed genoeg is (links van de groene lijn) en hoeveel kilometer kust verbreding nodig heeft (rechts van de groene lijn).

Figure 5.2. Coastal widening that is necessary to preserve 90% of species biodiversity along the Dutch coast. Graphs A, C and E show how many kilometres of coastline are wide enough (to the left of the green line) and how many kilometres of coastline need to be widened (to the right of the green line).



## 6. Aanvullend onderzoek

### 6.1 Inleiding

Met de voorafgaande vijf kennisvragen is het belang aangetoond van een minimale breedte voor het bestaan van een functionerend kustlandschapsmozaïek. Bovendien heeft het onderzoek het nut van actief duinbeheer voor het onderhoud van een divers duinecosysteem benadrukt. Tegelijkertijd is duidelijk dat een deel van de Nederlandse kust op dit moment onvoldoende ruimte biedt voor een divers duinecosysteem. Actief duinbeheer en herstel zal onontbeerlijk zijn in de toekomst.

Het natuurlijk duinlandschap wordt gekarakteriseerd door een grootschalige zonering van habitattypen die ontstaan over de zee-naar-landgradiënt met afname van fysieke stress en toename van biologische stress (Doing 1985, Torca et al. 2019). Deze gradiënt kan globaal gezien in tweeën worden gesplitst, in (i) de jonge, dynamische voorduinen van het strand naar de zeereep en, (ii) de opvolgende gestabiliseerde achterduinen (vooral grijze duinen en heide-/struweelontwikkeling). Vanuit biologisch opzicht onderscheiden de voor- en achterduinen zich vooral door hun plantengemeenschappen.

De voorduinen worden gedomineerd door een klein aantal aan biobouwende plantensoorten zoals duingrassen. Duingrassen zijn biobouwers omdat ze hun omgeving veranderen door een terugkoppeling met fysieke omgevingsfactoren waardoor ze hun eigen groei en overleving bevorderen. Bijvoorbeeld, op het strand vangen en accumuleren duingrassen door de wind opgestoven zand, waardoor embryonale duinvorming ontstaat (Van Puijenbroek et al. 2017). Voortdurende begraving stimuleert de groei van deze begraving-tolerante planten, waardoor zandaccumulatie en/of verminderde erosie verder wordt bevorderd, en waardoor de duinhoogte en -stabiliteit toenemen (Durán & Moore 2013, Hesp 2002, Maun 1998, Psuty, 2008).

In de loop van de tijd zorgt de verhoging van de witte duinen en de begroeiing met planten voor een vermindering van fysieke stress (Durán & Moore 2013, Hesp 2002, Psuty 2008). Bij gebrek aan verse zandafzetting begint het duingras te verouderen omdat de terugkoppeling tussen sediment en groei wordt belemmerd (Marshall 1965, Wallén 1980). Tegelijkertijd vergemakkelijkt de verminderde fysieke stress de vestiging van minder tolerante planten, hetgeen de weg vrijmaakt voor de overgang naar het tweede deel van het duinlandschap, namelijk de stabiele, meer diverse grijze duinen (Bonte et al. 2021, Hesp 2002, Psuty 2008, Torca et al. 2019). Onder zuurdere condities (bijv. in het Waddendistrict) zien we de ontwikkeling van een heidelandschap. Kenmerkend voor de grijze duinen is vooral een diverse combinatie van (korst)mossen, kruiden en grassen. Dit vergroot niet alleen de plantendiversiteit, maar biedt ook een unieke habitat voor dieren zoals vlinders en vogels.

Het vermogen van duingrassen om duinen te vormen, en het vestigen van nieuwe plantensoorten in de gestabiliseerde achterduinen (waardoor successie wordt gestimuleerd), is van belang voor een functionerend kustlandschapsmozaïek. Daarom is het voor toekomstige nieuwe en duurzame

beheer- en herstelstrategieën van belang de nieuwe kennis over de minimale breedte te koppelen aan vereiste kennis over de vestiging en veerkracht van belangrijke plantensoorten en plantengemeenschappen. Het onderzoek is daarom uitgebreid met twee aanvullende experimenten om een beter inzicht te krijgen in (i) vestiging en veerkrachtdynamiek van duinvormende helmgras (*Calamagrostis* [*Ammophila*] *arenaria*) en, (ii) veerkracht van grijze duinen plantengemeenschappen.

## 6.2 Aanvullend onderzoek 1: Veerkracht, vestiging en vitaliteit van helmgras

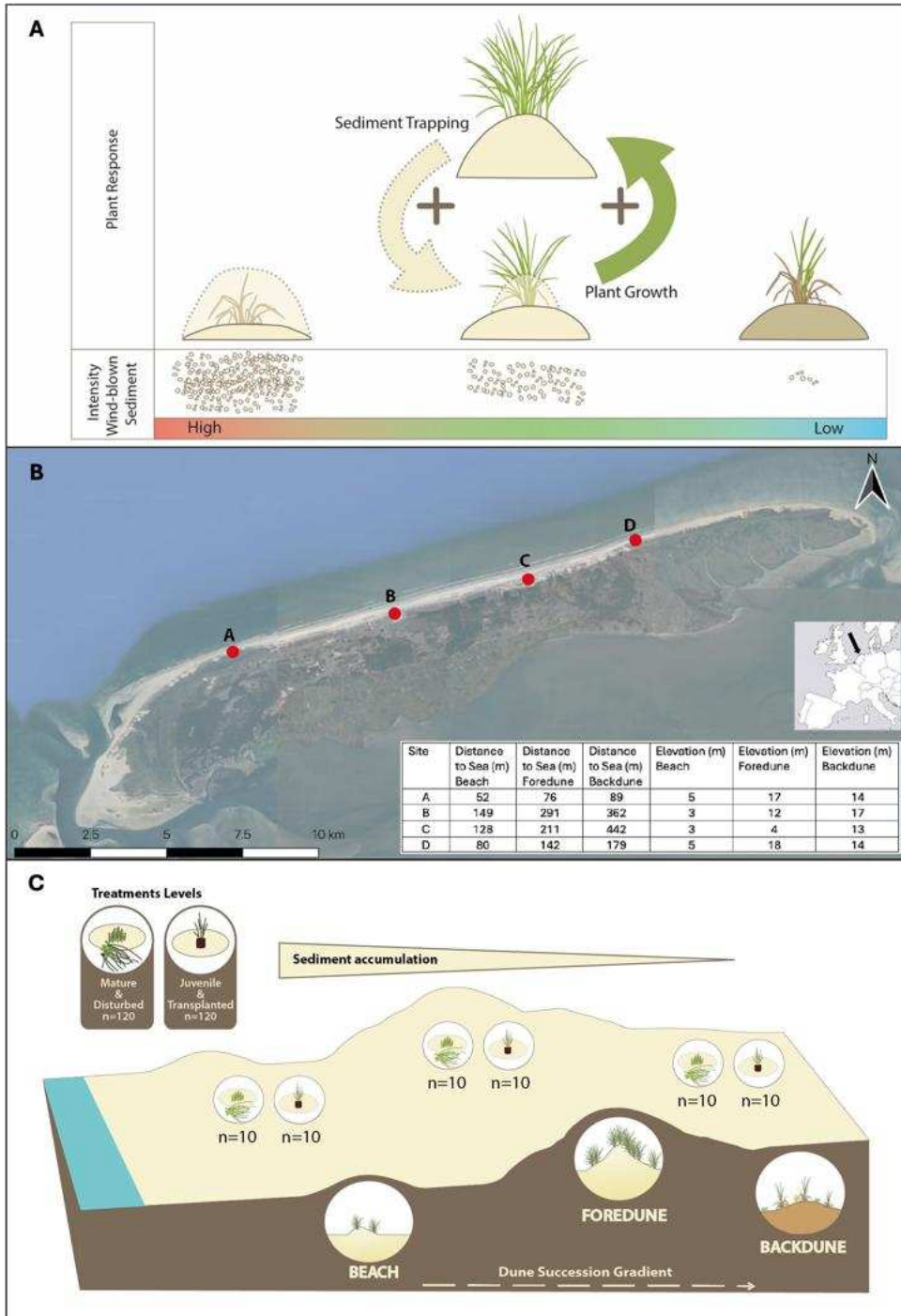
In Nederland worden de in 6.1 beschreven processen van duinvorming gedomineerd door de biobouwer helmgras (Figuur 6.1 – A), dat vooral voorkomt in vroege successiestadia van het grootschalige zee-naar-land duinlandschap en verdwijnt in de minder stressvolle en stabielere achterduinen. Omdat helmgras zo belangrijk is voor de duinvorming en kustveiligheid is er in het verleden veel onderzoek naar volwassen helmgrasplanten gedaan. Echter, het blijkt dat juveniel of verstoord helmgras anders reageert op omgevingsfactoren dan volwassen planten. Beheer van de zeereep omvat o.a. het gebruik van juveniele transplantaten en het verwijderen van gevestigd helmgras, en het is van belang beter inzicht te krijgen in hoe helmgras zich in verschillende levensfasen gedraagt. Daarom is in een tweejarig veldexperiment onderzocht hoe habitatmodificatie – weergegeven als positie op de jonge duingradiënt – helmgras beïnvloedt tijdens twee kritische levensfasen: (i) het vestigen van juveniele transplantaten en (ii) de veerkracht van volwassen planten tegen verstoring door verwijdering van bovengrondse biomassa.

Het veldexperiment werd uitgevoerd op vier locaties op het Nederlandse Waddeneiland Terschelling (Figuur 6.1 - B), en in drie verschillende habitattypen die verschillende opeenvolgende zones langs de duingradiënt vertegenwoordigen (d.w.z. strand, voorduin en begin van de achterduinen) (Figuur 6.1 – C). In een tweeledige opzet werden gedurende het eerste jaar (april tot september 2021) twee tests uitgevoerd: (i) het vestigingssucces van 120 juveniele, getransplanteerde helmgrasplanten, en (ii) de veerkracht van 120 reeds gevestigde, volwassen helmgrasplanten tegen verstoring door verwijdering van bovengrondse biomassa. In het tweede jaar werd onderzocht hoe de ontwikkeling van de overlevende en nu reeds gevestigde transplantaten zich tijdens de tweede groeiseizoen (april tot juli 2022) verhoudt vergeleken met hun eerste groeiseizoen.

Voor beide behandelingen werden aan het begin en het einde van het veldexperiment gegevens verzameld over het aantal overlevende individuen en drie belangrijke bovengrondse morfologische plantkenmerken (scheutenaantal, scheutdiameter, maximale scheutlengte). Een plant werd beschouwd als een ‘overlever’ als deze bij de laatste meting van het groeiseizoen kon worden teruggevonden en er dan ten minste één zichtbaar levende scheut aanwezig was. Per plant werden alle levende scheuten geteld, de scheutdiameter gemeten en de scheutlengte van scheutbasis tot hoogste bladpunt gemeten. Voor de vestigingsbehandeling werden helmgras transplantaten van ongeveer 4 maanden oud gebruikt ( $n = 40$  per habitat) die zijn gekocht bij een lokale kwekerij. Ernstige verstoring van volwassen helmgras ( $n = 40$  per habitat) werd nagebootst door alle bovengrondse biomassa af te knippen en te verwijderen.

Daarnaast werd op zes tijdstippen de verandering in bedniveau (cm) in elke plot bepaald als indicatie voor accumulatie-erosie dynamiek. Om het effect van sedimentstabilisering (hier weergegeven als accumulatie-erosie dynamieken) op het vestigen van juveniele, en veerkracht van volwassen planten tijdens het eerste groeiseizoen te testen, werd de standaardafwijking van de zes metingen van verandering in bedniveau (in cm) berekend. Een grote standaardafwijking duidt op een sterkere accumulatie-erosie dynamiek en grote fluctuaties in bedniveau in de tijd. Daarentegen geeft een

kleine standaardafwijking stabiele condities in bedniveau aan en een zwakke accumulatie-erosie dynamiek.

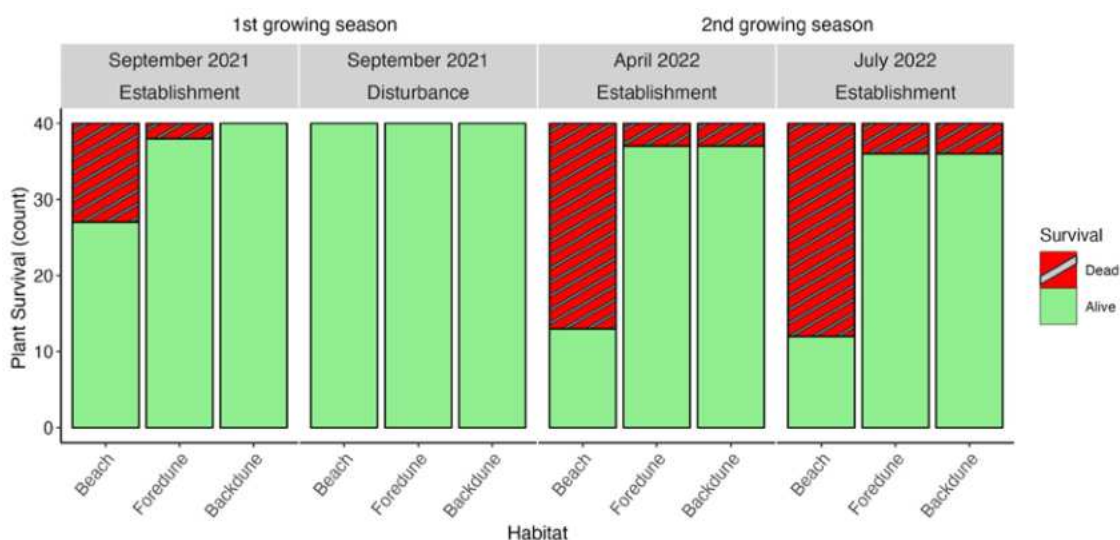


Figuur 6.1. A. onderliggend proces van sediment invang, begraving en groei. B. de ligging van de vier proeflocaties op Terschelling en hun eigenschappen. C geeft de proefopstelling weer, waarbij het zijprofiel toont van de veronderstelde vermindering van de sediment stress gradiënt langs de biogeomorfologische duingradiënt.

Figure 6.1. A. Conceptualization of the sediment-growth feedback of marram grass. B. the location of the four sites on Terschelling and their characteristics. C Visualization of the experimental setup showing the side profile of the hypothesized reduction of the sediment stress gradient along the dune succession gradient.

Figuur 6.2 toont de overleving van helmgras. Er was een duidelijk verschil in overlevingskans van helmgras over de duingradiënt en tussen de groeiseizoenen. Tijdens het eerste jaar, van april tot september 2021, overleefden van de oorspronkelijke 120 juveniele transplantaten (n = 40 per habitat) significant minder planten (67.5%) op het strand dan in de voorduinen (95%) en achterduinen (100%). Daarentegen overleefden alle volwassen helmgrasplanten (100%) het groeiseizoen na verstoring, ongeacht hun positie langs het duinlandschap gradiënt.

Tijdens het tweede jaar (april–juni 2022), veranderde het patroon van overlevingskansen van de juveniele transplantaten. Zodra de transplantaten eenmaal waren gevestigd, hadden de dynamische omstandigheden op het strand geen invloed meer op hun overleving. In de voor- en achterduinen bleef het afsterven van de transplantaten echter gestaag toenemen. De resultaten geven aan dat hoewel de achterduinen het 'veiligst' en strand het 'onveiligst' zijn voor juveniele transplantaties om zich met succes te vestigen in het eerste seizoen, draait dit effect binnen een tweede groeiseizoen al om.



Figuur 6.2. Van links naar rechts: de eerste twee grafieken tonen de overleving van juveniele transplantaties (=vestigingsexperiment) en van volwassen verstoord helmgras (=veerkracht experiment) aan het einde van het 1e groeiseizoen september 2021 (161 dagen); de derde grafiek geeft de overleving van alle transplantaties na het winterseizoen in april 2022 (375 dagen); de vierde grafiek toont het aantal overlevende transplantaties aan het einde van het experiment in juli 2022 (461 dagen).

Figure 6.2. From left to right: the first two plots show the survival of juvenile transplants and mature disturbed marram at the end of the 1st growing season September 2021 (161 days), the third plot indicates the survival of all transplants after the winter season in April 2022 (375 days) and the fourth plot shows the number of surviving transplants at the end of the experiment in July 2022 (461 days).

### Morfologische plantkenmerken ontwikkeling

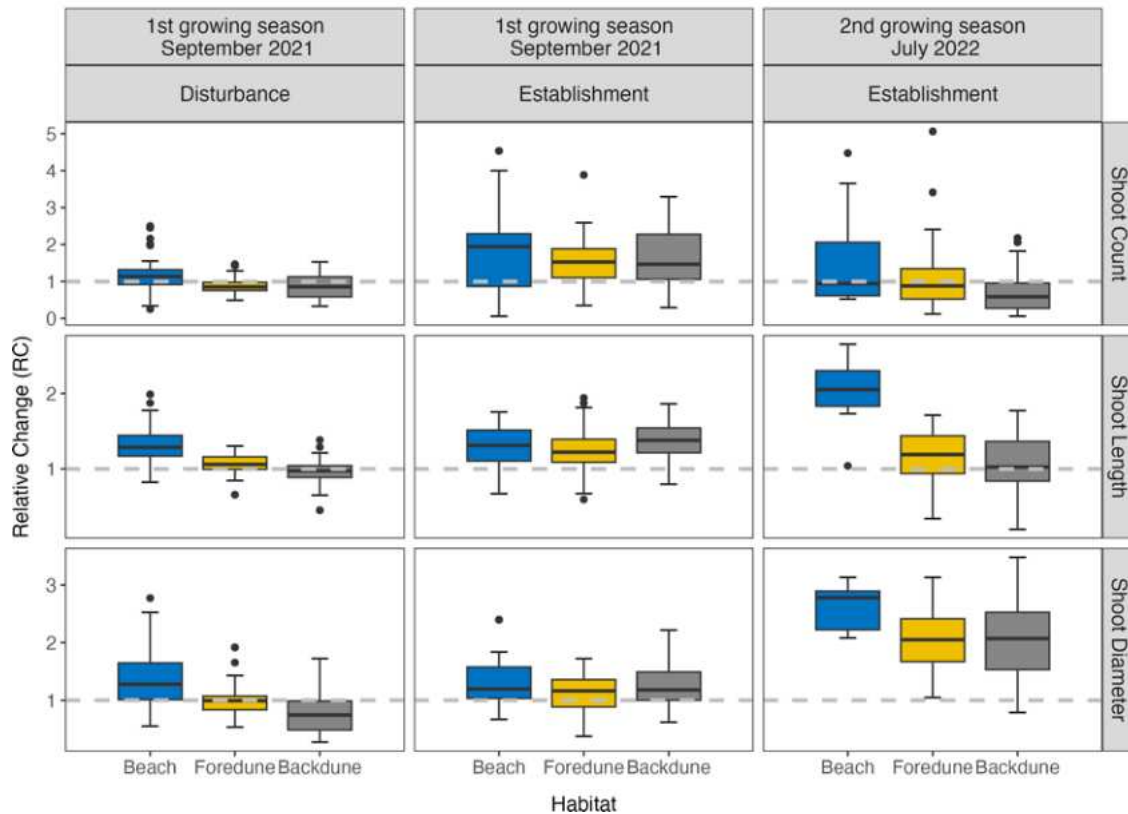
Figuur 6.3 geeft het effect weer van positie langs de de duingradiënt op morfologische ontwikkeling (relative change (RC) van de drie plantkenmerken (scheutaantallen, -lengte en -diameter) voor respectievelijk de verstorings- en transplantatiebehandelingen. Volwassen helmgras (linkerkolom

Figuur 6.3) herstelde het best aan het strand ( $RC > 1$ ) en vertoonde gemiddeld meer, dikkere en langere scheuten dan vóór hun verstoring in april 2021. Daarentegen slaagden de meeste helmgrassen in de witte duin en grijze duinen er niet in om volledig te herstellen ( $RC < 1$ ). Ook waren de verschillen tussen witte- en grijze duinen minder uitgesproken. Alleen de scheutdiameter herstelde beter in de witte duinen dan in de grijze duinen, hoewel de diameter in beide habitaten gemiddeld afnam.

Daarentegen vertoonden tijdens het eerste groeiseizoen de overlevende juveniele transplanten in het vestigingsexperiment (transplant) gemiddeld een toename in alle drie plantkenmerken, met bijna geen significante verschillen over de duingradiënt (middelste kolom Figuur 6.3). De enige uitzondering hierop was dat juveniele transplanten op het strand dikkere scheuten ontwikkelden dan in de voorduinen.

Tijdens het tweede groeiseizoen treden echter zichtbare verschillen op in de ontwikkeling van de nu gevestigde transplanten, vooral tussen planten aan het strand enerzijds, en die van de voor- en achterduinen anderzijds (rechterkolom, Figuur 6.3). Hoewel de verandering in scheutaantallen niet significant verschillen, vertoonden gevestigde transplanten op het strand tijdens het tweede seizoen significant dikkere en langere scheuten dan transplanten in zowel de witte- als de grijze duinen. Het patroon van ontwikkeling van morfologische plantkenmerken van juveniele transplanten lijkt in het tweede groeiseizoen meer op dat van herstellend volwassen helmgras.

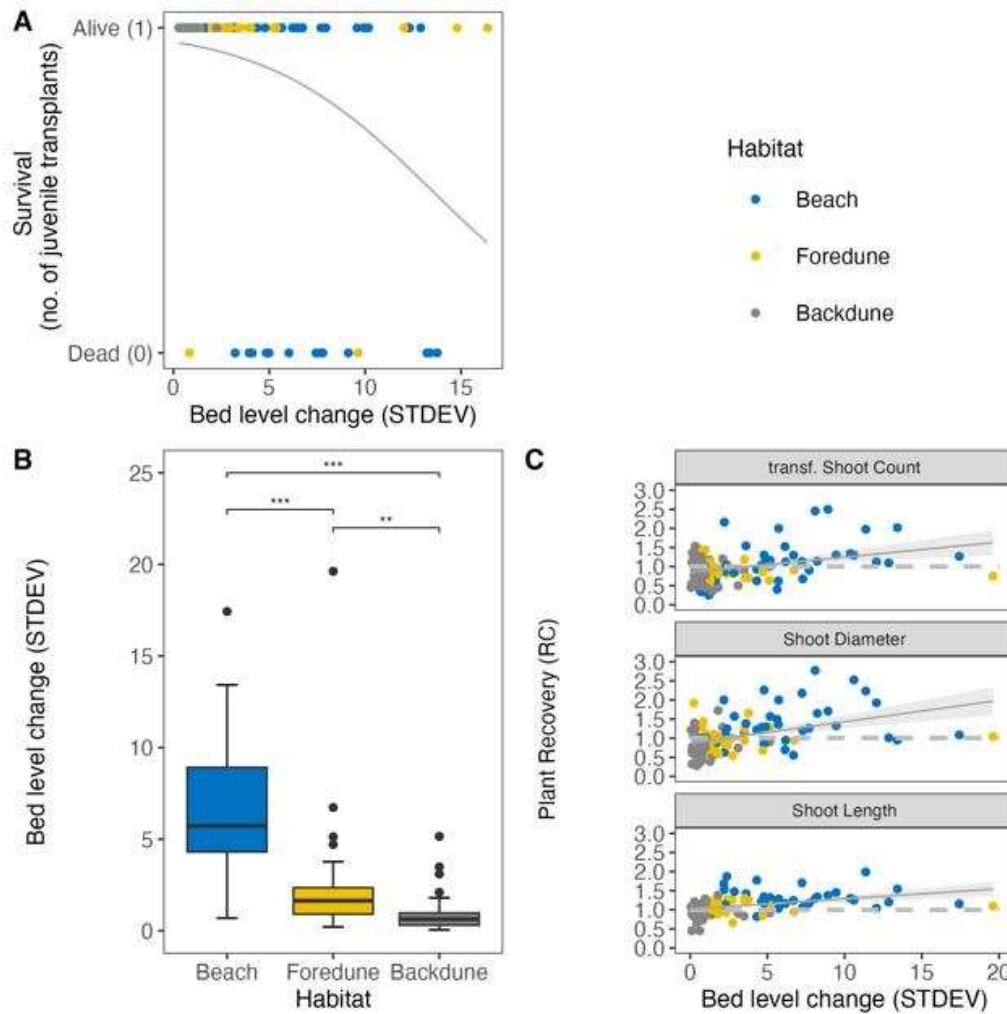




*Figuur 6.3. De eerste twee kolommen tonen de relatieve verandering in alle drie plantparameters (één per rij) ten opzichte van de startconditie in april 2021 voor de volwassen verstoorde en juveniele transplantaties aan het einde van het eerste groeiseizoen in 2021, gemeten in het veld en per locatie (strand, witte- en grijze duinen). De laatste kolom gaf de relatieve verandering aan van alle overlevende transplantaties aan het einde van het tweede groeiseizoen 2022 ten opzichte van hun startconditie in april 2021.*

*Figure 6.3. The first two columns show the relative change in all three plant parameters (one per row) compared to the starting condition in April 2021 for the mature disturbed and juvenile transplants at the end of the first growing season in 2021 measured in the field and per location (beach, foredune, backdune). The last column indicated the relative change of all surviving transplants at the end of the second growing season 2022 compared to their starting condition in April 2021.*

Ten slotte werd geëvalueerd in hoeverre de vestiging van juveniele transplanten en de veerkracht van volwassen planten in het eerste groeiseizoen worden beïnvloed door lokale accumulatie-erosie dynamiek (STDEV bed level change). Gevonden werd dat hogere accumulatie-erosie dynamiek, vooral karakteristiek voor het dynamische strand, de kans op vestiging van juvenielen significant verslechterden (Figuur 6.4 -A). Daarentegen belemmerde de afname van accumulatie-erosie dynamiek over de duinlandschapsgradiënt (Figuur 6.4 – B) het herstelvermogen van volwassen helmgras (Figuur 6.4 – C).



Figuur 6.4. Effect van sedimentaanwas-erosiedynamiek (bodemniveauperandering STDEV) op het vestigingssucces van juveniele helmgrastransplantaties (A) en de verschillen in accretie-erosiedynamiek langs de duingradiënt op de verstoringsplots (B) en de relatie met het herstel van volwassen helmgras (C). Significantie codes: 0 '\*\*\*', 0,001 '\*\*', 0,01 '\*', 0,05 '.', 0,1 'NS.

Figure 6.4. Effect of sediment accretion-erosion dynamics (bed level change STDEV) on the establishment success of juvenile marram grass transplants (A) and the differences in accretion-erosion dynamics along the dune gradient at the disturbance plots (B) and the relation to the recovery of mature marram grass (C). Significance codes: 0 '\*\*\*', 0.001 '\*\*', 0.01 '\*', 0.05 '.', 0.1 'NS.

### 6.3 Aanvullend onderzoek 2: Herstelvermogen van plantengemeenschappen in de grijze duinen

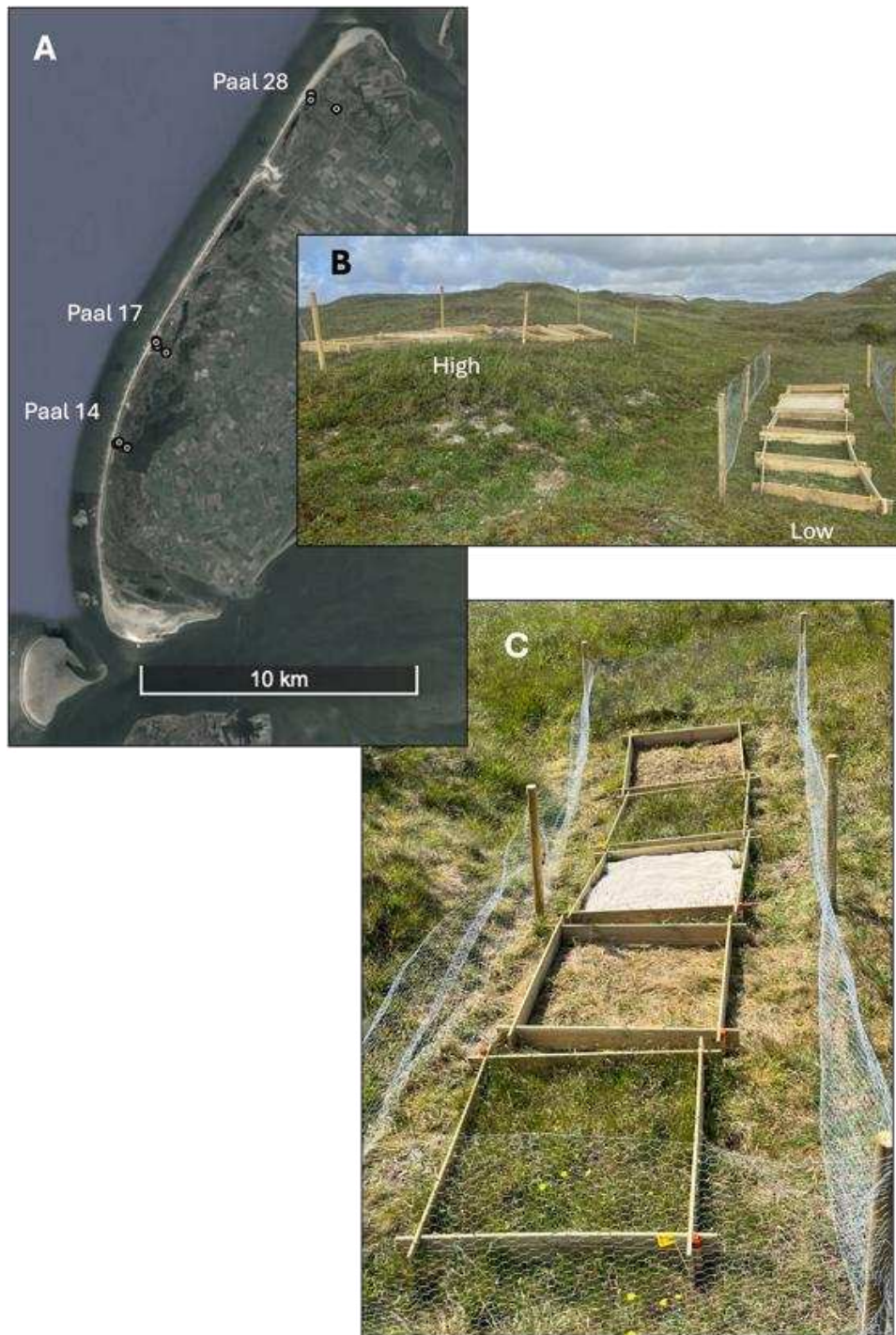
Grijze duinen vormen verreweg het meest voorkomende habitatype in de Nederlandse duinen, en vertegenwoordigen bijna 42% van alle 541 plots die in de eerste fase van het project zijn bemonsterd (zie eerste Tussenrapport, april 2022). Tegelijk zijn de grijze duinen ook het rijkst qua aantallen plantensoorten (gemiddeld 16,0, met een range van 2-34 soorten) bestaande uit een brede combinatie van (korst)mossen, kruiden en grassen, afhankelijk van hoe ver het bodemvormingsproces en de successie al zijn gevorderd. Desondanks is dit habitatype in gevaar gekomen door kustbeknelling, verlies van natuurlijke dynamiek en overwoekering door grassen en struiken. Om de weerbaarheid van vegetatie van de grijze duinen tegen zowel natuurlijke (bijv. verstuiving, begrazing) als ook menselijke (bijv. wandelen) verstoringen te beoordelen, werd tussen half mei en half augustus 2023 een experiment uitgevoerd op drie locaties op het Waddeneiland Texel (Figuur 7.1 - A).

De grijze duinen werden langs de duinlandschapsgradiënten in drieën verdeeld (front, middle, back) op basis van afneemende bodem pH. Per deel werden dicht bij elkaar twee proeflocaties geselecteerd, één hoger en één lager gelegen, elk met vijf 1x1 m plots met een homogeen vegetatietype (zonder struiken) (Figuur 6.5). Voor elke plot werden alle plantensoorten geïdentificeerd en werd het bedekkingspercentage geschat van (i) dood plantaardig materiaal, (ii) kale grond en (iii) levend plantaardig materiaal (mos- als de kruidenlaag) voor en naar verstoring (begin mei en eind augustus). Op elke proeflocatie werd per plot een van vijf behandelingen uitgevoerd:

- De controleplots kregen geen enkele behandeling, behalve de afbakening door het houten frame.
- Bij de knipbehandeling wordt alle biomassa 1,5 cm boven de grond afgeknipt en van de plot verwijderd.
- In betredingsplots werd 100 keer door een persoon (54 kg gewicht, schoenmaat 39, profieldiepte 0,5 cm) over de plot gelopen. Dit werd gestandaardiseerd door de plot in vier stroken in opwaartse, neerwaartse, linker- en rechterraichting in te delen en elke strook 25 keer in elke richting te betreden.
- Voor de verstuivingsbehandeling werden 10 L (~1 cm dikte) schoon strandzand (vrij van schelpen en veek) gelijkmatig over de plot gestrooid.
- Voor de begraving behandeling 100 L (~10 cm dikte) schoon strandzand gelijkmatig over de plot verdeeld.

Voor elke behandeling werd het verstoringseffect (Disturbance Effect) berekend als het verschil in de plantengemeenschappen (% kale bodembedekking, % dode materiaalbedekking, % totale levende biomassa, absoluut aantal soorten, aantal mossoorten, en aantal kruiden-/grassoorten) tussen de controlplot en elk van de vier verstoringen in augustus. Hoe lager het verstoringseffect (Disturbance Effect), hoe meer de experimentele plot vergelijkbaar was met de controleplot (0 = geen verschil, en 1 = maximaal verschil). Tenslotte werd geanalyseerd in hoeverre de soortendiversiteit van elke plot

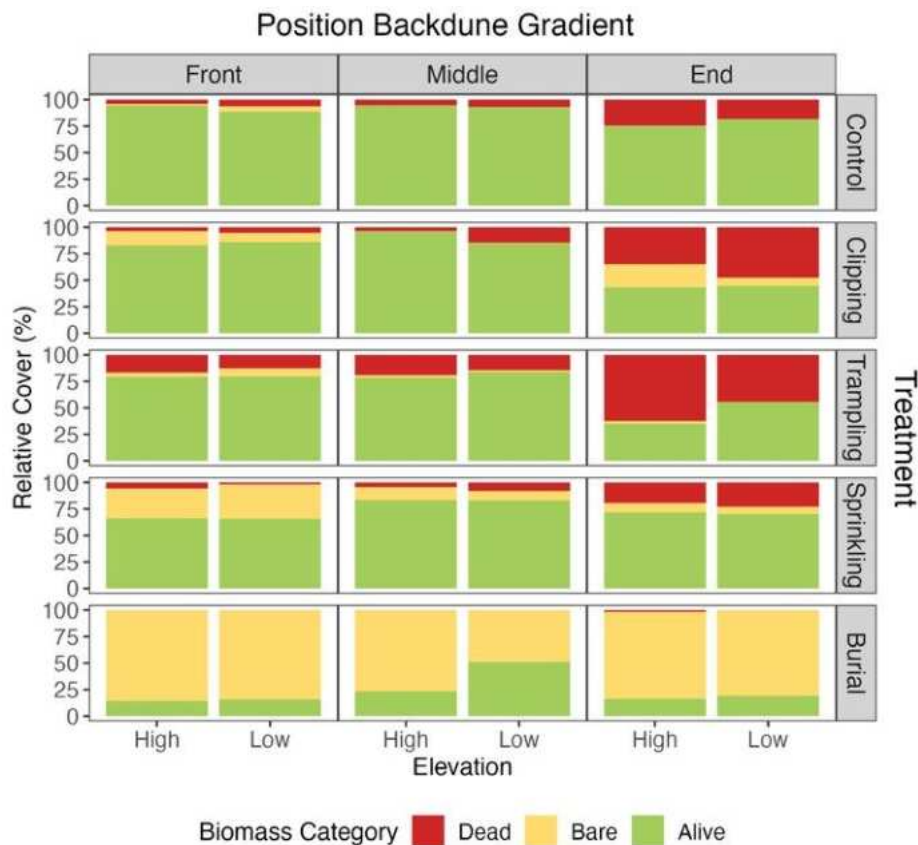
vóór de verstoring verband hield met het herstelpotentieel na verstoring. Hiervoor werd berekend de lineaire relatie tussen het verstoringseffect (Disturbance Effect) en het totale aantal plantensoorten in mei 2023, voor de verstoring.



*Figuur 6.5. De drie locaties van het verstoringsexperiment op het Waddeneiland Texel en de positie van het grijze duingedeelte (witte stip) op elke locatie (A). Op elke locatie en op elke sectie werden twee proeflocaties (B) aangelegd. Elke proeflocatie kreeg vijf behandelingen (C).*

*Figure 6.5. The three locations of the disturbance experiment on the Wadden Island of Texel, and the position of the grey dune section (white dot) at each location (A). At each location and each section two sample plots (B) were installed. Each sample plot received five treatments (C).*

Figuur 6.6 geeft het aandeel weer van elk type bedekking (kaal, dood plantaardig materiaal, levende planten) in zowel de experimentele plots met de vier typen verstoring als in de controleplots. Opvallend is dat de vegetatie op de proeflocaties die verder landinwaarts liggen in de grijze duinen een veel hogere relatieve bedekking aan 'dood plantaardig materiaal' vertoont dan op de proeflocaties die dichterbij de zee liggen. Bovendien is de relatieve bedekking van kale bodem voor alle vier verstoringen groter in vergelijking met de controleplots. Het patroon van de relatieve bedekking van de verstoringen in vergelijking met de controleplots suggereert dat het effect van knippen en lopen groter is aan het einde van de grijze duinen gradiënt. Daarentegen blijkt verstuing aan het begin van de gradiënt een groter effect te hebben, terwijl begraving langs de gehele duingradient het grootste verschil geeft. Hoewel er kleine verschillen zijn tussen hoger en lager gelegen proeflocaties, lijkt de hoogteligging geen duidelijke invloed te hebben op de relatieve bedekking.

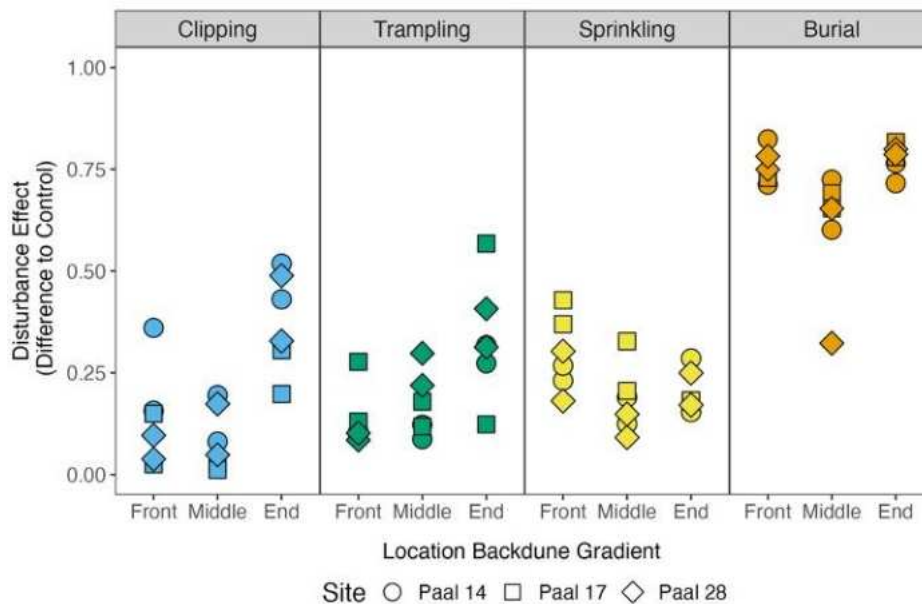


Figuur 6.6. Gecombineerde geschatte relatieve bedekkingspercentage van dood plantaardig materiaal (rood), kale grond (geel) en levende biomassa (groen) voor de hoger en lager gelegen proeflocaties (hoog, laag) langs de grijze duingradiënt (van links naar rechts) en behandeling (van boven naar beneden) op de drie locaties op Texel.  
 Figure 6.6. Combined estimated relative percent coverage of dead (red), bare soil (yellow), and live biomass (green) for the higher and lower elevated sample locations (high, low) along the grey dune gradient (left to right) and treatment (top to bottom) at the three locations on Texel.



Wanneer we inzoomen op hoe de relatieve bedekking zich vertaalt naar het herstelvermogen (Figuur 6.7), valt op dat plantengemeenschappen aan het begin van de grijze duinengradient (front) zich beter herstellen van knippen en lopen (verstoringseffect dicht bij 0) dan die aan het einde van de duinengradient (end). Dit blijkt echter omgekeerd te zijn voor het herstel na verstuiwing. Ondanks het verschil in herstelvermogen tussen de vier verstoringen, blijkt dat de plantengemeenschappen in het midden van de grijze duinen zich in gelijke mate herstellen van knippen, lopen en verstuiven, en het beste herstellen van begraving.

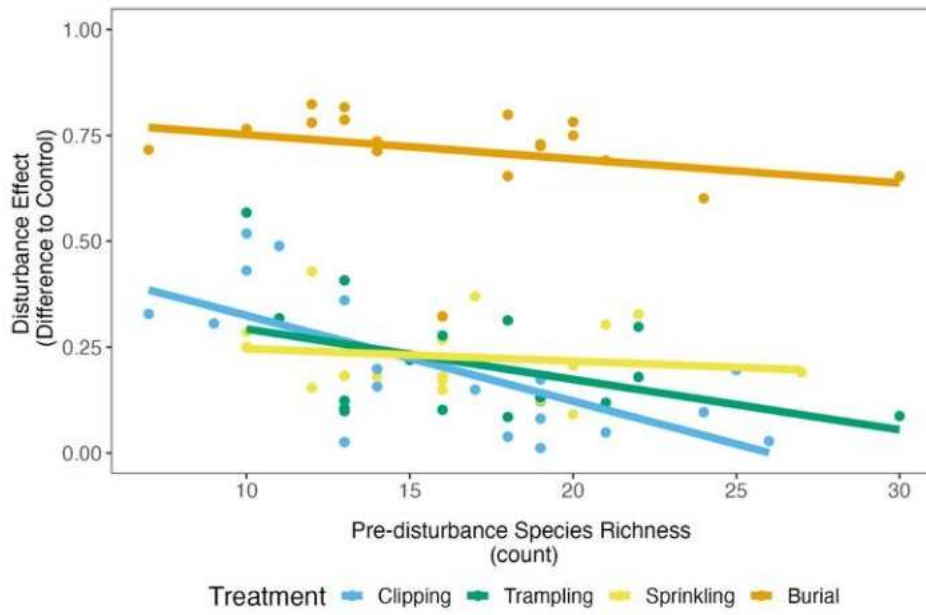
Het betere herstel van de plantengemeenschappen in het midden van de grijze duinen gradiënt houdt verband met een grotere plantensoortenrijkdom, zoals geïllustreerd in Figuur 6.8. Alle vier de behandelingen vertonen een afname in verstoringseffect (Disturbance Effect) bij een toename van de diversiteit aan plantensoorten vóór de verstoring in mei. Het blijkt dat plantengemeenschappen met een hogere diversiteit aan plantensoorten beter herstellen van alle vier verstoringen.



Figuur 6.7. Herstel van grijze duinplantengemeenschappen na verstoring langs de achter-duingradiënt drie maanden na verstoring (augustus 2023). Verstoringseffect = 0 geen verschil t.o.v. de controleplot, Verstoringseffect = 1 geen gelijkis met de controleplot.

Figure 6.7. Recovery of grey dune plant communities to disturbance along the back-dune gradient three months after disturbance (August 2023). Disturbance Effect = 0 no difference compared to the control plot, Disturbance Effect = 1 no similarity with the control plot.





Figuur 6.8. De relatie tussen het verstoringseffect (verschil met de controlplots in augustus) van de vier behandelingen (knippen, vertrappen, bestuiven, begraven) en de plantsoortendiversiteit (aantal soorten) vóór verstoring in mei.  
 Figure 6.8. The relation between the Disturbance Effect (difference to the control plot), of the four treatments (clipping, trampling, sprinkling with sand, burial and the plant species diversity (number of species) prior to disturbance in May.

## 7. Conclusies & implicaties voor duinbeheer

1. Benodigde breedte voor een biodivers duinlandschap.  
Op habitatsniveau zien we dat alle langs de Nederlandse kust voorkomende habitats voorkomen bij een duinbreedte van minder dan 1500m. Echter, bij een breedte van 1500m stijgt de soorten-accumulatiecurve nog aanzienlijk; 75% van de plantensoorten wordt gemiddeld pas bereikt bij een breedte van ongeveer 1800m, en 90% bij een breedte van 2200m (Wadden en Hollandse kust) tot 5100m (Delta). Hierbij moet worden aangetekend dat naast breedte ook (ongestoorde) ouderdom en substraat een belangrijke rol speelt in de ontwikkeling van een biodivers duinlandschap door de bodem- en vegetatieontwikkeling die plaatsgevonden heeft over honderden jaren (zie ook 2).
2. Afstand tot de zee, bodemgesteldheid en reactie van biotische omgeving. Verschillen tussen habitats worden meestal gekenmerkt door verschillen in pH, die bijna lineair afneemt naarmate de afstand tot zee toeneemt. Hierdoor nemen bodemontwikkeling en concentraties aan beschikbare voedingsstoffen toe. Hoe breder een duinzone hoe diverser het bodemmilieu, wat dan weer gepaard gaat met een hogere diversiteit aan habitattypen en plantensoorten. Hoewel een bredere kustzone in alle drie regio's (Wadden, Hollandse kust, Delta) een hogere diversiteit in de samenstelling van het bodemmilieu mogelijk maakt, benadrukken de bevindingen het belang van de regionale context bij het interpreteren van ecologische gegevens. Ze geven aan dat zowel bodem- als vegetatiefactoren in beschouwing moeten worden genomen om een duidelijk beeld te krijgen van de duinecologie.
3. Minimaliseren actief beheer door herstel lange kustgradienten.  
Het bieden van voldoende kustruimte faciliteert de ontwikkeling van een duinlandschap dat rijk is aan habitats en soorten. Daarnaast bevordert ook strategisch beheer (ingrepen zoals plaggen, maaien, klepelen van vegetatie, verwijderen van struiken, begrazing, kerven van duinen en het graven van stuifkuilen) de diversiteit. Maar, beheer blijkt effectiever naarmate het duinlandschap breder is. Daarom versterken kustruimte en beheer elkaar en zijn ze niet zomaar uitwisselbaar
4. Herstel lange kustgradiënten door megasuppleties.  
Er zijn langs de Nederlandse kust slechts twee voorbeelden van megasuppleties (Zandmotor en Hondbossche duinen) en deze laten zich moeilijk vergelijken met locaties met natuurlijke aanwas van de kust (zoals De Balg en De Hors) omdat er grote verschillen zijn in hoogteligging en tijdsduur van ontwikkeling. Daarom zijn de verzamelde gegevens ontoereikend om conclusies te trekken. Bij het ontwerpen van nieuwe megasuppleties kan echter nog meer dan voorheen rekening gehouden worden met de geomorfologie zodat deze de natuurlijke aanwaslocaties reflecteert.

5. Toepassing mega-suppleties voor herstel van kustgradiënten.  
Momenteel wordt langs 57% van de zandige kust in de Wadden, 43% van de Hollandse kust en 10% van de Delta kust 75% van het diversiteitspotentieel (uitgedrukt in soortenrijkdom) behaald. Wanneer, ter illustratie, deze 75% als doelstelling zou worden genomen, is er gemiddeld 0.6 km verbreding nodig op de Wadden, 0.8 km langs de Hollandse kust en 2.3 km in de Delta. Wanneer wordt gestreeft naar 90% of zelf 100% van het potentieel, zouden nog grotere delen van de kust nog meer moeten worden verbreed. Uiteindelijk liggen zowel de keuze voor streefwaarden en de locaties waar suppleties wenselijk zijn in handen van beheerders en beleidsmakers.
  
6. Vestiging en veerkracht van helmgras.  
Voor helmgras verandert de invloed van zandstabilisering met de levensfase van het gras. Enerzijds wordt het vestigen van juveniele transplanten door het stabiliseren van zand verbeterd. Anderzijds, wordt door zandstabilisering zowel de veerkracht van verstoorde volwassen helmgras als de groei van reeds gevestigde transplanten belemmerd. Door deze interne terugkoppelingen verandert de rol van helmgras vanaf het stand landinwaarts, en dit bevordert de successie en daarmee de biodiversiteit langs de kustgradiënt.
  
7. Herstelvermogen plantengemeenschappen in grijze duinen.  
Het effect van verstoringen op plantengemeenschappen van de grijze duinen verandert langs de zee-naar-landgradiënt. Jongere plantengemeenschappen dicht bij de zee hebben minder last van knippen en vertrappen dan oudere gemeenschappen verder landinwaarts, terwijl deze laatste minder last hebben van verstuiving. In het algemeen herstellen plantengemeenschappen met een hogere diversiteit aan soorten beter na verstoringen dan gemeenschappen met lagere diversiteit.

## 8. Literatuur

Bonte, D., Batsleer, F., Provoost, S., Reijers, V., Vandegehuchte, M. L., Van De Walle, R., Dan, S., Matheve, H., Rauwoens, P., Strypsteen, G., Suzuki, T., Verwaest, T., & Hillaert, J. (2021). Biomorphogenic Feedbacks and the Spatial Organization of a Dominant Grass Steer Dune Development. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fevo.2021.761336>

Defeo, O., A. McLachlan, D. Armitage, M. Elliott and J. Pittman (2021) Sandy beach social-ecological systems at risk: regime shifts, collapses, and governance challenges. *Front Ecol Environ* doi:10.1002/fee.2406.

Doing, H. (1985). Coastal fore-dune zonation and succession in various parts of the world. *Vegetatio*, 61(1–3), 65–75. <https://doi.org/10.1007/BF00039811>

Durán, O., & Moore, L. J. (2013). Vegetation controls on the maximum size of coastal dunes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(43), 17217–17222.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1307580110>

Esch, T., W. Heldens, A. Hirner, M. Keil, M. Marconcini, A. Roth, J. Zeidler, S. Dech and E. Strano (2017) Breaking new ground in mapping human settlements from space – The Global Urban Footprint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Volume 134, December 2017, Pages 30-42. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.10.012>

Geelen, L., B. Arens, A. Kooijman, M. Nijssen, D. Groenendijk, H. van der Hagen en M. Janssen (2022) Ecologisch herstel in de duinen – knoppen om aan te draaien. *Vakblad Natuur, Bos en Landschap*, feb. 2022, #182, blz. 16-19. <https://edepot.wur.nl/564515>

Hesp, P. (2002). Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48(1–3), 245–268. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00184-8)

Lansu, E.M., Reijers, V.C., Höfer, S., Luijendijk, A., Rietkerk, M., Wassen, M. J. van der Heide, T.. (2024). A global analysis of how human infrastructure squeezes sandy coasts. *Nat Commun* 15, 432 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44659-0>

Luijendijk, A.; Hagenaars, G.; Ranasinghe, R.; Baart, F.; Donchyts, G.; Aarninkhof, S. (2018), The State of the World's Beaches. *Scientific Reports* 8, 6641. DOI:10.1038/s41598-018-24630-6. [www.nature.com/scientificreports/](http://www.nature.com/scientificreports/)

Marshall, J. K. (1965). *Corynephorus Canescens* (L.) P. Beauv. As a Model for the *Ammophila* Problem. *The Journal of Ecology*, 53(2), 447. <https://doi.org/10.2307/2257988>

Maun, M. A. (1998). Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, 76(5), 713–738. <https://doi.org/10.1139/b98-058>

Psuty, N. P. (2008). The Coastal Foredune: A Morphological Basis for Regional Coastal Dune Development. In M. L. Martínez & N. P. Psuty (Eds.), *Coastal Dunes* (Vol. 171, pp. 11–27). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74002-5_2)

Silva, R., M.L. Martínez, B. van Tussenbroek, L.O. Guzmán-Rodríguez, E. Mendoza & J. López-Portillo (2020), A Framework to Manage Coastal Squeeze. *Sustainability*, 12, 10610; <https://doi.org/10.3390/su122410610>.

Torca, M., Campos, J. A., & Herrera, M. (2019). Changes in plant diversity patterns along dune zonation in south Atlantic European coasts. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 218, 39–47. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2018.11.016>

Van Puijenbroek, M. E. B., Nolet, C., De Groot, A. V., Suomalainen, J. M., Riksen, M. J. P. M., Berendse, F., & Limpens, J. (2017). Exploring the contributions of vegetation and dune size to early dune development using unmanned aerial vehicle (UAV) imaging. *Biogeosciences*, 14(23), 5533–5549. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5533-2017>

Vousdoukas, M.I.; Ranasinghe, R.; Mentaschi, L.; Plomaritis, T.A.; Athanasiou, P.; Luijendijk, A.; Feyen, L. (2020), Sandy coastlines under threat of erosion. *Nat. Clim. Chang.*, 10, 260–263. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0697-0>.

Wallén, B. (1980). Changes in Structure and Function of *Ammophila* during Primary Succession. *Oikos*, 34(2), 227. <https://doi.org/10.2307/3544187>.

Wassen, M. J., Schrader, J., van Dijk, J., & Eppinga, M. B. (2021). Phosphorus fertilization is eradicating the niche of northern Eurasia’s threatened plant species. *Nature Ecology and Evolution*, 5, 67-73. <https://doi.org/10.1038/s41559-020-01323-w>

# Bijlagen



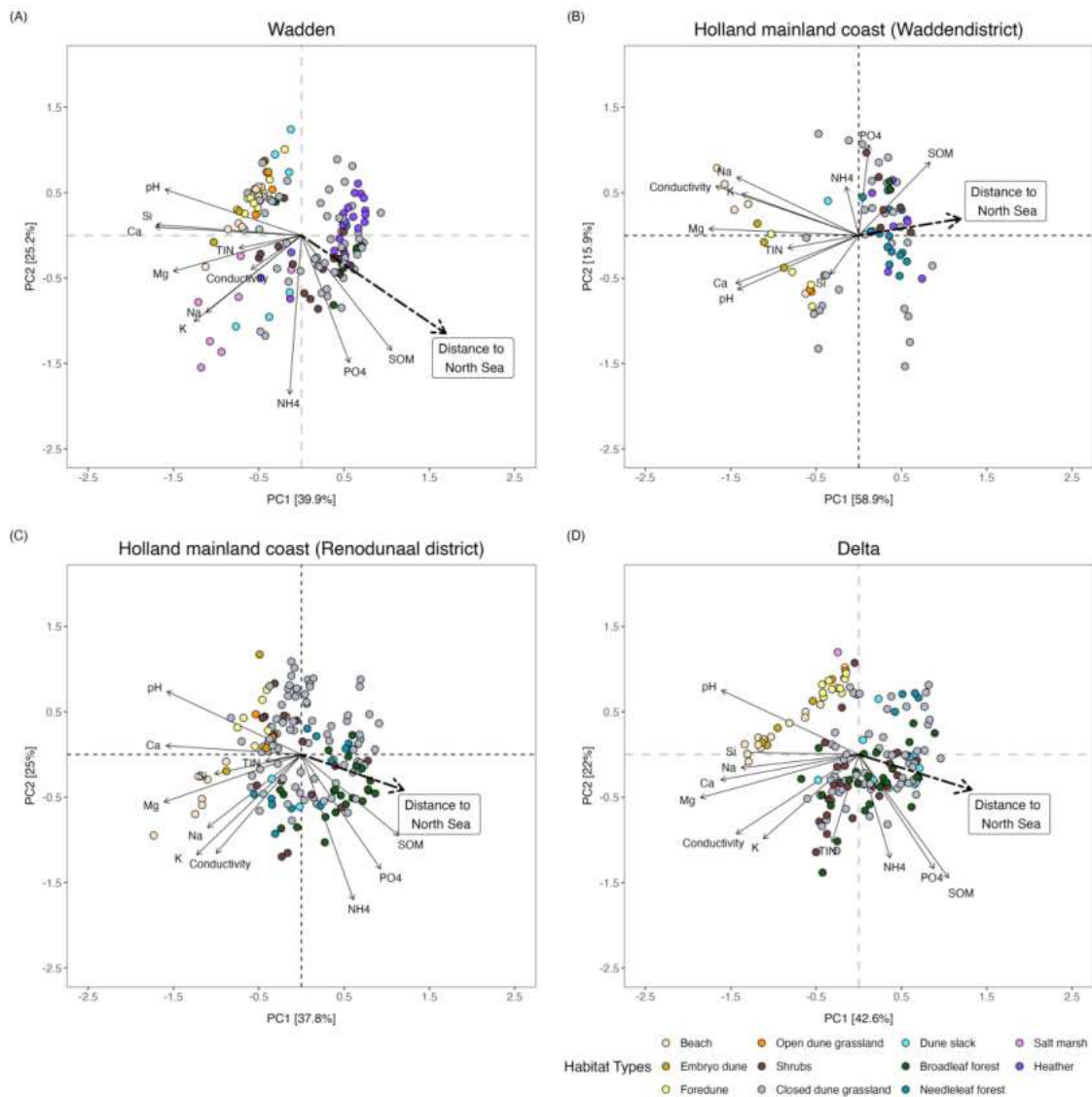
## Bijlage 1. Cross-tabel, met nauwkeurigheid van voorspellingen per habitatype

Table 1. Cross-table of model 1 (the best model), based on the predictions of the test set. 'Precision' angeeft hoe vaak de voorspelde klasse juist is.

Table 1. Cross table of model 1 (the best model), based on the predictions of the test set. Precision indicates how often the predicted class is correct.

		M1 - Predicted class					
		Bare Sand	Shrubs	Fresh water	Grass	Broadl. T.	Needl. T.
True class	Bare Sand	97.0%	0.3%	0.4%	2.1%	0.1%	0.0%
	Shrubs	0.4%	80.3%	2.0%	8.8%	4.7%	3.9%
	Fresh water	0.2%	3.9%	94.0%	1.6%	0.2%	0.1%
	Grass	2.8%	12.6%	1.4%	81.4%	1.5%	0.3%
	Broadl. T.	0.0%	4.1%	0.4%	0.9%	88.9%	5.7%
	Needl. T.	0.0%	4.3%	0.0%	0.2%	10.8%	84.7%
Precision		93.3%	77.7%	74.3%	92.5%	66.5%	76.2%
		6.7%	22.3%	25.7%	7.5%	33.5%	23.8%

## Bijlage 2. PCA concentraties gecorrigeerd voor bulk density



*Figuur 1. PCA-resultaten van de samenstelling van de bodem, gecorrigeerd voor bulkdichtheid langs de 35 transecten van (A) de Wadden, (B) Hollandse kust (Waddendistrict), (C) Hollandse kust (Renodunaaldistrict) en (D) Delta. De twee PC-assen (PC1 en PC2) laten zien hoeveel van de waargenomen variabiliteit in de gegevens wordt verklaard (in %). De gekleurde punten vertegenwoordigen elk monsterpunt langs het transect en het bijbehorende habitattyp. De lengte en richting van de zwarte pijlen geven de sterkte van alle bodemparameters aan bij het verklaren van de waargenomen variabiliteit langs de twee PC-assen. De gestippelde zwarte pijl visualiseert de relatie van afstand tot de Noordzee tot de bodemsamenstelling.*

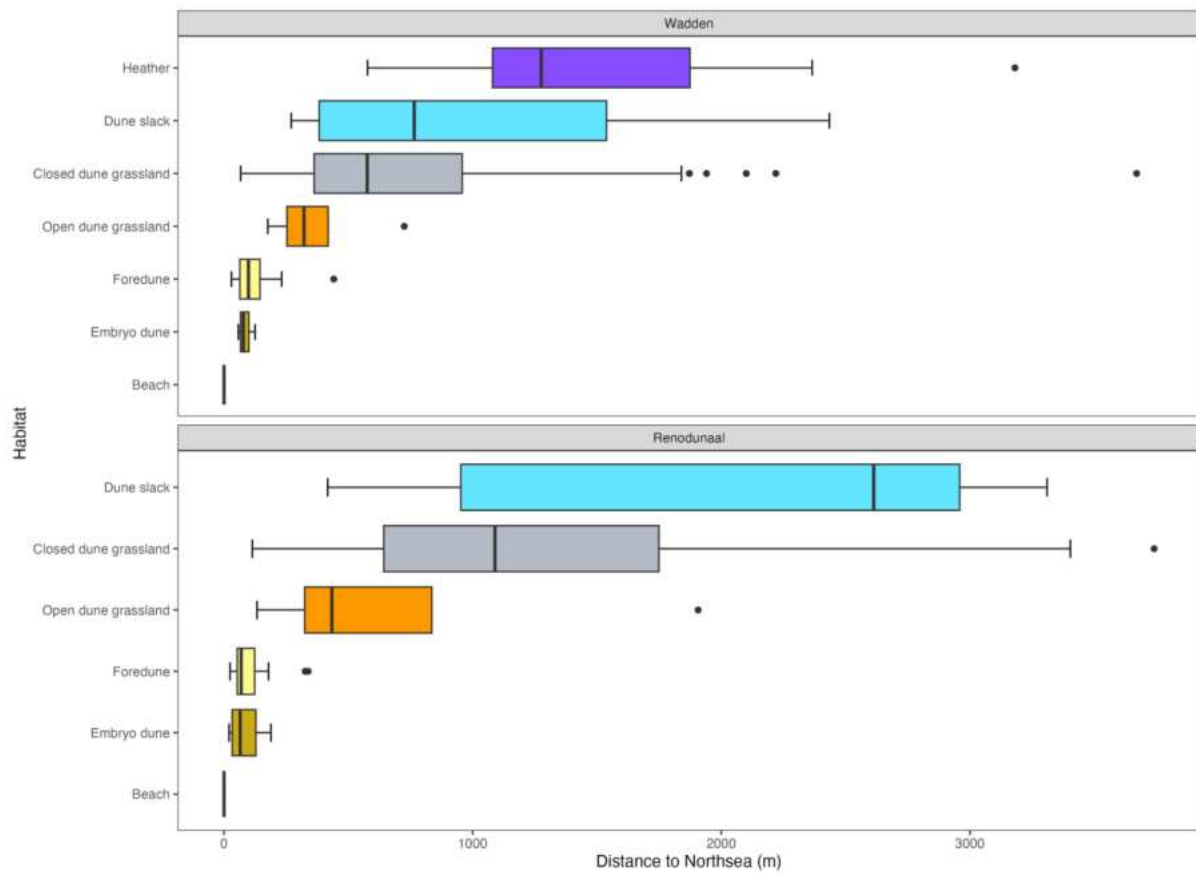
*Figure 1. PCA results of the composition of the soil environment adjusted for by bulk density along the 35 transects of (A) the Wadden, (B) Holland mainland coast (Wadden district), (C) Holland mainland coast (Renodunaal district), and (D) Delta. The two PC axes (PC1 & PC2) show how much of the observed variability in the data is explained (in %). The colored points represent each sample point along the transect and its associated habitat type. The length and direction of the black arrows indicate the strength of all soil parameters in explaining the observed variability along the two PC axes. The dotted black arrow visualizes the relation of distance to North Sea to the soil composition.*

Tabel 1. Bodem-pH-waarden per floradistrict, regio en habitat, met weergave van gemiddelde, standaarddeviatie (STDEV), standaardfout, maximum, minimum en mediaanneaus.

Table 1. Soil pH values per floral district, region, and habitat, showing mean, standard deviation (STDEV), standard error, maximum, minimum, and median levels.

District	Region	Habitat	Observations (#)	mean pH	STDEV pH	SE pH	min pH	max pH	median pH
Wadden	Wadden	Beach	10	9.41	0.14	0.04	9.22	9.72	9.41
Wadden	Wadden	Embryo dune	3	9.57	0.09	0.05	9.51	9.67	9.54
Wadden	Wadden	Foredune	11	9.32	0.18	0.06	9.07	9.68	9.33
Wadden	Wadden	Open dune grassland	5	8.75	0.46	0.20	7.99	9.14	8.85
Wadden	Wadden	Shrubs	16	5.74	1.27	0.32	4.21	8.62	5.30
Wadden	Wadden	Closed dune grassland	55	5.79	1.32	0.18	3.99	9.21	5.37
Wadden	Wadden	Dune slack	6	6.46	0.30	0.12	6.07	6.93	6.49
Wadden	Wadden	Broadleaf forest	7	5.05	1.08	0.41	4.15	7.35	4.87
Wadden	Wadden	Needleleaf forest	1	4.41	NA	NA	4.41	4.41	4.41
Wadden	Wadden	Salt marsh	7	7.88	0.57	0.21	7.45	9.02	7.73
Wadden	Wadden	Heather	21	4.76	0.77	0.17	3.85	6.89	4.46
Wadden	Holland mainland coast	Beach	5	9.07	0.61	0.27	7.99	9.47	9.30
Wadden	Holland mainland coast	Embryo dune	3	9.28	0.22	0.12	9.05	9.48	9.31
Wadden	Holland mainland coast	Foredune	4	8.99	0.25	0.13	8.72	9.29	8.97
Wadden	Holland mainland coast	Open dune grassland	2	9.00	0.40	0.29	8.72	9.29	9.00
Wadden	Holland mainland coast	Shrubs	6	4.60	0.60	0.25	3.97	5.33	4.55
Wadden	Holland mainland coast	Closed dune grassland	30	5.67	1.19	0.22	4.06	8.31	5.45
Wadden	Holland mainland coast	Dune slack	1	6.01	NA	NA	6.01	6.01	6.01
Wadden	Holland mainland coast	Broadleaf forest	2	4.08	0.07	0.05	4.03	4.13	4.08
Wadden	Holland mainland coast	Needleleaf forest	14	4.39	0.47	0.13	3.91	5.75	4.27
Wadden	Holland mainland coast	Heather	7	4.65	0.56	0.21	3.94	5.45	4.84
Renodunaal	Holland mainland coast	Beach	7	9.32	0.22	0.08	8.85	9.50	9.37
Renodunaal	Holland mainland coast	Embryo dune	4	9.44	0.19	0.10	9.20	9.67	9.45
Renodunaal	Holland mainland coast	Foredune	7	9.13	0.45	0.17	8.38	9.54	9.29
Renodunaal	Holland mainland coast	Open dune grassland	3	8.84	0.86	0.50	7.85	9.39	9.28
Renodunaal	Holland mainland coast	Shrubs	16	7.24	1.19	0.30	4.67	8.77	7.45
Renodunaal	Holland mainland coast	Closed dune grassland	86	6.84	1.58	0.17	3.82	9.28	7.30
Renodunaal	Holland mainland coast	Dune slack	3	6.39	1.51	0.87	4.90	7.93	6.33
Renodunaal	Holland mainland coast	Broadleaf forest	22	5.21	1.24	0.26	3.94	8.33	4.76
Renodunaal	Holland mainland coast	Needleleaf forest	13	6.01	1.19	0.33	4.32	7.61	6.01
Renodunaal	Delta	Beach	12	9.45	0.15	0.04	9.23	9.68	9.41
Renodunaal	Delta	Embryo dune	4	9.58	0.11	0.05	9.45	9.71	9.59
Renodunaal	Delta	Foredune	12	9.28	0.23	0.07	8.86	9.61	9.28
Renodunaal	Delta	Open dune grassland	2	9.14	0.12	0.09	9.05	9.22	9.14
Renodunaal	Delta	Shrubs	25	6.88	1.05	0.21	5.33	9.20	6.89
Renodunaal	Delta	Closed dune grassland	61	6.15	1.28	0.16	3.48	8.73	6.02
Renodunaal	Delta	Dune slack	9	5.39	1.39	0.46	3.75	7.73	4.93
Renodunaal	Delta	Broadleaf forest	26	6.19	1.16	0.23	3.75	7.75	6.38
Renodunaal	Delta	Needleleaf forest	4	4.47	0.29	0.15	4.09	4.71	4.54
Renodunaal	Delta	Salt marsh	1	8.57	NA	NA	8.57	8.57	8.57

### Bijlage 3. Plant nutriënten



*Figuur 1. Gemiddelde afstand tot de Noordzee van de geregistreerde habitattypen binnen de twee floradistricten (Waddendistrict = kalkarm, district Renodunaal = kalkrijk).*

*Figure 1. Average distance to North Sea of the recorded habitat types within the two floral districts (Waddendistrict = lime poor, Renodunaal district = calcareous)*

Tabel 1. Gemiddelde nutriëntenconcentraties gemeten als mg nutriëntenconcentratie per gram drooggewicht van de levende bovengrondse biomassa; van links naar rechts: het gemiddelde, de standaarddeviatie (STDEV) en de standaardfout (SE) van stikstof (N), fosfaat (P) en kalium (K).

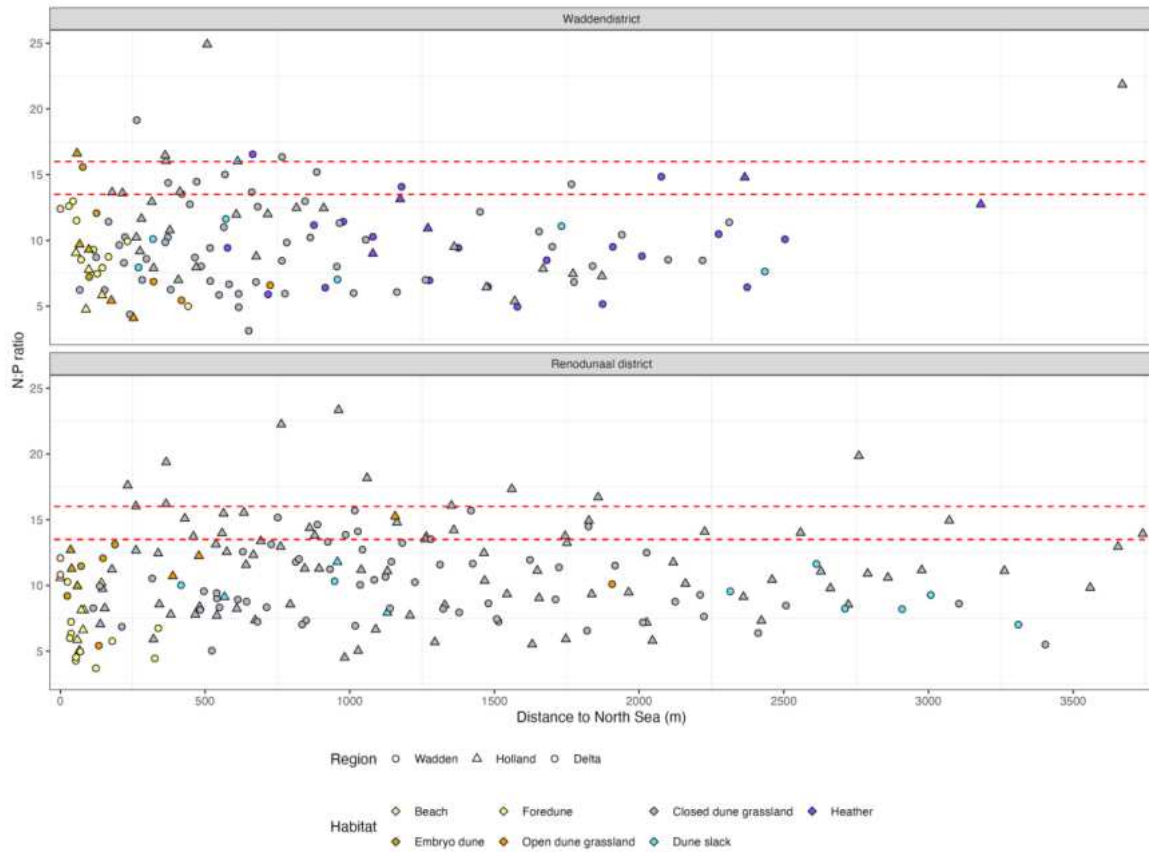
Table 1. Average nutrient concentrations measured as mg nutrient concentration per gram dry weight of the living above-ground biomass; from left to right: the mean, standard deviation (STDEV), and standard error (SE) of nitrogen (N), phosphate (P) and potassium (K).

Lime district	Region	Habitat	Observations (n)	mean N (mg/g)	STDEV N (mg/g)	SE N (mg/g)	mean P (mg/g)	STDEV P (mg/g)	SE P (mg/g)	mean K (mg/g)	STDEV K (mg/g)	SE K (mg/g)
Wadden	Wadden	Beach	1	24.05	NA	NA	1.94	NA	NA	19.79	NA	NA
Wadden	Wadden	Embryo dune	3	21.31	18.01	10.40	1.93	1.44	0.83	19.09	8.37	4.83
Wadden	Wadden	Foredune	10	13.17	4.65	1.47	1.39	0.29	0.09	15.45	2.89	0.91
Wadden	Wadden	Open dune grassland	3	17.05	4.75	2.74	2.67	0.48	0.28	20.03	1.37	0.79
Wadden	Wadden	Closed dune grassland	55	13.98	3.76	0.51	1.58	0.54	0.07	12.75	3.90	0.53
Wadden	Wadden	Dune slack	6	17.88	7.88	3.22	2.04	1.02	0.42	17.47	8.98	3.66
Wadden	Wadden	Heather	21	11.94	2.09	0.46	1.39	0.42	0.09	13.22	6.89	1.50
Wadden	Holland mainland coast	Embryo dune	3	24.45	9.65	5.57	2.06	0.43	0.25	19.41	2.63	1.52
Wadden	Holland mainland coast	Foredune	4	12.81	4.09	2.04	1.87	0.24	0.12	16.86	6.24	3.12
Wadden	Holland mainland coast	Open dune grassland	7	8.41	1.58	1.12	1.77	0.01	0.01	11.55	3.81	2.69
Wadden	Holland mainland coast	Closed dune grassland	26	13.84	3.77	0.74	1.32	0.50	0.10	11.64	4.25	0.83
Wadden	Holland mainland coast	Dune slack	1	15.30	NA	NA	0.95	NA	NA	8.23	NA	NA
Wadden	Holland mainland coast	Heather	7	13.04	3.14	1.19	1.08	0.23	0.09	9.29	1.98	0.75
Renodunaal	Holland mainland coast	Beach	1	25.91	NA	NA	2.45	NA	NA	21.32	NA	NA
Renodunaal	Holland mainland coast	Embryo dune	3	19.97	2.98	1.72	1.81	0.49	0.28	25.22	4.37	2.52
Renodunaal	Holland mainland coast	Foredune	6	10.48	2.93	1.20	1.44	0.23	0.09	14.86	3.56	1.46
Renodunaal	Holland mainland coast	Open dune grassland	3	11.41	1.90	1.09	0.93	0.30	0.17	10.00	2.45	1.42
Renodunaal	Holland mainland coast	Closed dune grassland	85	16.62	4.06	0.44	1.58	0.61	0.07	14.51	5.36	0.58
Renodunaal	Holland mainland coast	Dune slack	3	16.85	5.82	3.36	1.72	0.29	0.17	17.65	4.56	2.63
Renodunaal	Delta	Beach	2	16.95	2.25	1.59	1.48	0.08	0.06	16.29	0.26	0.18
Renodunaal	Delta	Embryo dune	4	21.44	3.91	1.95	1.89	0.35	0.18	17.16	10.05	5.02
Renodunaal	Delta	Foredune	11	8.30	3.33	1.00	1.42	0.32	0.10	11.56	3.55	1.07
Renodunaal	Delta	Open dune grassland	2	11.95	5.17	3.66	1.54	0.01	0.01	6.87	0.15	0.11
Renodunaal	Delta	Closed dune grassland	60	18.21	4.63	0.60	1.94	0.72	0.09	15.46	5.49	0.71
Renodunaal	Delta	Dune slack	8	15.55	2.44	0.85	1.68	0.16	0.06	18.52	2.23	0.79

Tabel 2. Gemiddelde plantnutriënten verhoudingen. Gemiddelde, standaarddeviatie (STDEV), standaardfout (SE) van de stikstof (N) : fosfaat (P), stikstof (N) : kalium (K) en kalium (K) : fosfaat (P) verhoudingen.

Table 2. Average plant nutrient ratios. Mean, standard deviation (STDEV), standard error (SE) of the nitrogen (N) : phosphate (P), nitrogen (N) : potassium (K), and potassium (K) : phosphate (P) ratios.

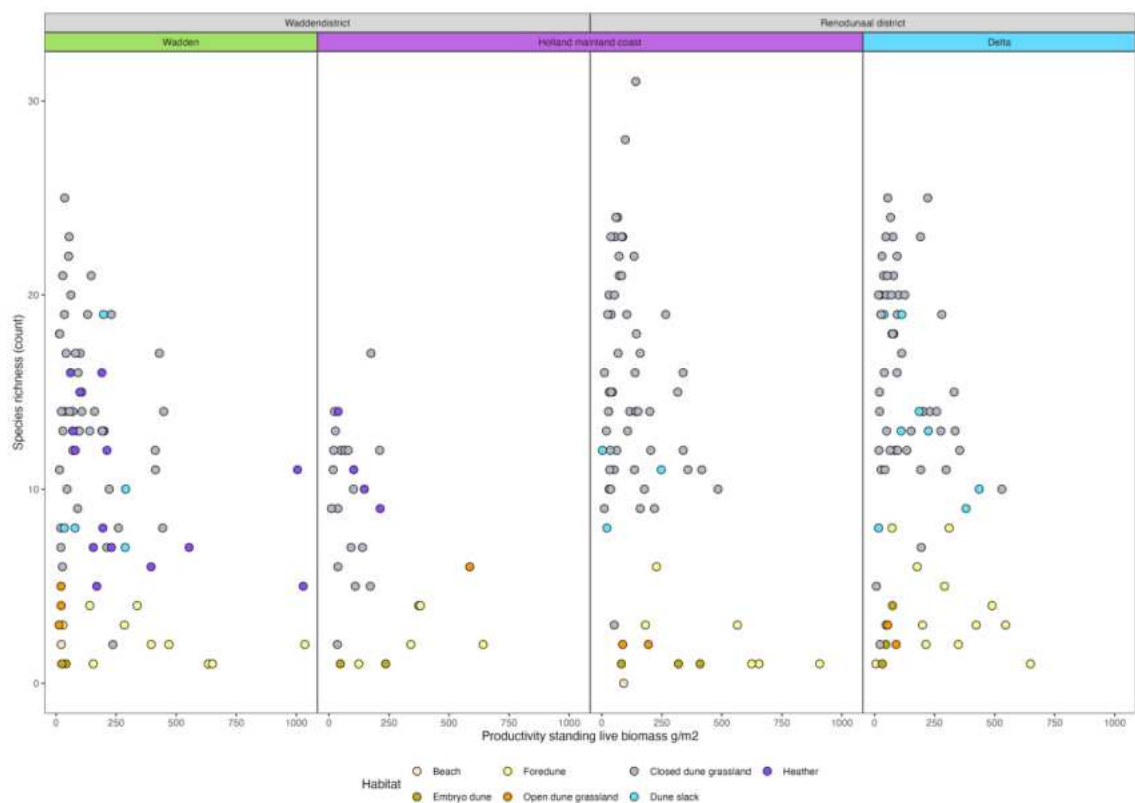
Lime district	Region	Habitat	Observations (n)	mean N:P ratio	STDEV N:P ratio	SE N:P ratio	mean N:K ratio	STDEV N:K ratio	SE N:K ratio	mean K:P ratio	STDEV K:P ratio	SE K:P ratio
Wadden	Wadden	Beach	1	12.40	NA	NA	1.22	NA	NA	10.20	NA	NA
Wadden	Wadden	Embryo dune	3	11.63	4.20	2.42	1.00	0.41	0.23	12.88	7.35	4.74
Wadden	Wadden	Foredune	10	9.40	2.46	0.78	0.85	0.25	0.08	11.38	2.40	0.76
Wadden	Wadden	Open dune grassland	3	6.30	0.75	0.44	0.86	0.28	0.16	7.73	1.92	1.11
Wadden	Wadden	Closed dune grassland	55	9.60	3.33	0.45	1.19	0.48	0.06	8.65	2.93	0.39
Wadden	Wadden	Dune slack	6	9.24	1.95	0.80	1.18	0.81	0.33	9.53	3.98	1.63
Wadden	Wadden	Heather	21	9.34	3.21	0.70	1.12	0.56	0.12	9.36	3.17	0.69
Wadden	Holland mainland coast	Embryo dune	3	11.87	4.12	2.38	1.27	0.56	0.32	9.57	1.18	0.68
Wadden	Holland mainland coast	Foredune	4	6.86	1.93	0.97	0.77	0.10	0.05	8.93	2.67	1.34
Wadden	Holland mainland coast	Open dune grassland	7	4.77	0.94	0.66	0.79	0.40	0.28	6.54	2.10	1.49
Wadden	Holland mainland coast	Closed dune grassland	26	11.52	4.59	0.90	1.31	0.57	0.11	9.86	5.40	1.06
Wadden	Holland mainland coast	Dune slack	1	16.02	NA	NA	1.86	NA	NA	8.62	NA	NA
Wadden	Holland mainland coast	Heather	7	12.12	2.22	0.84	1.40	0.12	0.04	8.71	1.58	0.60
Renodunaal	Holland mainland coast	Beach	1	10.57	NA	NA	1.22	NA	NA	8.70	NA	NA
Renodunaal	Holland mainland coast	Embryo dune	3	11.30	1.37	0.79	0.80	0.07	0.04	14.23	1.72	0.99
Renodunaal	Holland mainland coast	Foredune	6	7.32	1.86	0.76	0.71	0.15	0.06	10.33	1.67	0.68
Renodunaal	Holland mainland coast	Open dune grassland	3	12.73	2.31	1.33	1.16	0.14	0.08	10.95	0.78	0.45
Renodunaal	Holland mainland coast	Closed dune grassland	85	11.66	3.89	0.42	1.25	0.45	0.05	9.96	3.68	0.40
Renodunaal	Holland mainland coast	Dune slack	3	9.62	1.97	1.14	0.95	0.19	0.11	10.15	1.16	0.67
Renodunaal	Delta	Beach	2	11.44	0.89	0.63	1.04	0.15	0.11	11.05	0.79	0.56
Renodunaal	Delta	Embryo dune	4	11.46	1.65	0.83	1.48	0.52	0.26	9.03	4.86	2.43
Renodunaal	Delta	Foredune	11	5.84	1.84	0.56	0.73	0.21	0.06	8.23	2.05	0.62
Renodunaal	Delta	Open dune grassland	2	7.76	3.31	2.34	1.75	0.79	0.56	4.47	0.13	0.09
Renodunaal	Delta	Closed dune grassland	60	10.09	2.70	0.35	1.30	0.54	0.07	8.66	3.43	0.44
Renodunaal	Delta	Dune slack	8	9.28	1.44	0.51	0.84	0.12	0.04	11.06	1.42	0.50



*Figuur 2. N:P-verhoudingen met afstand tot de Noordzee die de kalkarme (Waddendistrict) en kalkrijke (Renodunaaldistrict) bloemendistricten scheidt. Waarden > 16 geven P-beperking ten opzichte van N aan en waarden lager dan < 13,5 geven N-beperking ten opzichte van P aan.*

*Figure 2. N:P ratios with distance to the North Sea separating between lime-poor (Wadden district) and lime-rich (Renodunaal district) floral districts. Values > 16 indicates P-limitation relative to N and values lower than < 13.5 indicates N-limitation relative to P.*





Figuur 3. Soortenrijkdom weergegeven als het aantal geïdentificeerde soorten per perceel en hun productiviteit uitgedrukt in gram droge biomassa per m<sup>2</sup> van de levende fractie van de bovengrondse biomassa onder N-beperving.

Figure 3. Species richness as number of species identified per plot and their productivity expressed as g dry weight biomass per m<sup>2</sup> of the living fraction of the standing biomass under N-limitation.



Ministerie van Landbouw,  
Visserij,  
Voedselzekerheid en Natuur



OBN Natuurkennis wordt gecoördineerd door de VBNE en gefinancierd door het ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur en BIJ12.



Alle publicaties en producten van OBN Natuurkennis zijn te vinden op  
[www.natuurkennis.nl](http://www.natuurkennis.nl)

