

Megasuppleties en zeewaartse duinontwikkeling UPN-2022-013-DK

Eindrapportage



Colofon

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

Rapport- en projectnummer UPN-2022-013-DK
Driebergen, februari 2025

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

Deze uitgave is online gepubliceerd op www.natuurkennis.nl

Auteursrecht

Teksten mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.

Foto voorzijde	Hondsbossche Duinen
Fotograaf	Jakolien Leenders

Wijze van citeren

Leenders, J.K., S.M. Arens, A.M. Antheunisse, S. de Lange en C.J.S. Aggenbach, 2025. **Megasuppleties en zeewaartse duinontwikkeling Eindrapportage**. Rapport nummer 2025/UPN-2022-013-DK. Kennisnetwerk OBN, Driebergen.

Samenstelling

Jakolien Leenders	HKV Lijn in water
Bas Arens	Arens Bureau voor Strand en Duin- Onderzoek
Martijn Antheunisse	KWR Water Research Institute
Sjoukje de Lange	HKV Lijn in water
Camiel Aggenbach	KWR Water Research Institute

Productie

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



Inhoud

Samenvatting	5
Summary	8
1 Inleiding	11
1.1 Aanleiding	11
1.2 Doelstelling en kennisvragen	12
1.3 Scope en begripsafbakening	12
1.4 Aanpak	14
1.5 Leeswijzer	16
2 Studiegebieden en eerste analyse	17
2.1 Zeewaartse oplossingen	17
2.2 Overzicht studiegebieden	18
2.3 Methode voor inventarisatie studiegebieden	21
2.4 Geomorfologische eenheden	22
2.4.1 Aanpak verkenning geomorfologische eenheden	22
2.4.2 Resultaten verkenning geomorfologische eenheden	23
2.4.3 Conclusie verkenning geomorfologische eenheden	25
2.5 Habitattypen van het duin- en kustlandschap	26
2.5.1 Theoretische achtergrond vegetatieontwikkeling in het duin- en kustlandschap	26
2.5.2 Aanpak verkenning habitattypen	28
2.5.3 Resultaten verkenning habitattypen	29
2.5.4 Conclusie verkenning habitattypen	31
2.6 Integratie verkenning geomorfologische eenheden en habitattypen	32
3 Conceptuele ontwikkeling natuurlijke gebieden	34
3.1 Aangroeiende kust	35
3.2 Eroderende kust	36
4 Nadere analyse van studiegebieden	38
4.1 Directe of indirecte aanleg van een strandvlakte	38
4.1.1 Direct aangelegde strandvlakte	40
4.1.2 Indirect aangelegde strandvlakte	41
4.1.3 Ontwikkeling strandvlakte na aanleg stuifdijken	42
4.2 Directe aanleg van een duin of duinlandschap	43
4.2.1 Aanleg van een duin	44
4.2.2 Aanleg van een duinlandschap	45
4.3 Conclusies en lessen uit analyse van studiegebieden	46
5 Conceptuele ontwikkeling aangelegde gebieden	48
5.1 Aangroeiende/gesuppleerde kust	49
5.2 Eroderende kust	52
6 Beantwoording kennisvragen	54
6.1 Kennisvraag 1	54
6.2 Kennisvraag 2	56
6.3 Kennisvraag 3	59
6.4 Kennisvraag 4	61
6.4.1 Zoetwaterzekerheid	61

6.4.2	Waterveiligheid	62
7	Richtlijnen voor ontwerp strandvlakte en duin	66
7.1	Ruimte	67
7.2	Tijd	67
7.3	Kwaliteit.....	68
7.4	Proces	70
8	Conclusies en Aanbevelingen	72
8.1	Conclusies	72
8.2	Aanbevelingen	73
9	Literatuur.....	76
10	Appendices	78

Samenvatting

De duinnatuur staat onder aanzienlijke druk door kusterosie, zeespiegelstijging, stikstofdepositie, verzuring, verruiging, toenemende recreatie en ruimteclaims van andere functies. Dit is vooral het geval in smalle duingebieden, waar veel belangen samenkomen. Door de stijgende zeespiegel zal deze druk in de toekomst alleen maar toenemen. In zones waar de duinen smal zijn, is grootschalige dynamiek vaak geen optie vanwege risico's voor kustverdediging en achterliggend landgebruik. Maatregelen zoals het verstevigen van de duinenrij of het aanleggen van zeewerende dijken tasten bovendien de natuurkwaliteit aan en beperken de kansen op een natuurlijke ontwikkeling van het kustlandschap.

Zeewaartse strategieën kunnen mogelijk een oplossing bieden: 1) Een zeewaartse uitbreiding biedt veiligheid voor het achterliggende gebied, én schept ruimte voor nieuwe duinnatuur. 2) Een zeewaartse strategie, zoals de aanleg van strandvlakte, duin of duinlandschap met behulp van een megasuppletie brengt minder verstoring teweeg dan verschillende kleine ingrepen, omdat het een grootschalige ingreep betreft die eenmalig wordt uitgevoerd. Aan de hand van 4 kennisvragen, gericht op 1) de behoeften voor volledig ontwikkelde duinnatuur in gebied van zeewaartse uitbouw; 2) mogelijke effecten van zeewaartse kustuitbreiding op het achterliggend bestaande duingebied 3) beschouwing van effecten van zeewaartse kustuitbreiding op gradiënten in zoutspray, eolische zanddynamiek en hydrologische condities en 4) effecten van zeewaartse kustuitbreiding met megasuppleties op zoetwaterzekerheid en waterveiligheid beantwoorden we de centrale vraag in dit onderzoek: **Hoe kunnen zeewaartse oplossingen zo worden vormgegeven dat ze optimaal bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe natuur en/of verbetering van bestaande natuurwaarden?**

We benaderen natuurwaarde vanuit zowel geomorfologisch als ecologisch perspectief. De variatie aan geomorfologische eenheden geeft een indicatie van het potentieel voor ecologische ontwikkeling: hoe groter de variatie, hoe groter de ecologische potentie. Het aantal geomorfologische eenheden per gebied is gebaseerd op luchtfoto's en het Algemeen Hoogte Model (AHN) Nederland. Voor de beoordeling van de huidige ecologische waarde gebruiken we de habitattypen volgens de gebiedsdekkende habitatkarteringen die in het kader van Natura2000 zijn opgesteld. Een volwaardig landschap — met goed ontwikkelde geomorfologie — vormt op termijn de basis voor een rijk en compleet ecosysteem. De combinatie van diverse geomorfologische eenheden en habitattypen bepaalt uiteindelijk de volledigheid van het landschap en daarmee de natuurwaarde.

In dit onderzoek bestuderen we 28 studiegebieden verspreid over de Nederlandse kust, van de Waddeneilanden tot aan de Zeeuwse Delta. Dit zijn allemaal zeewaartse uitbreidingen. Hiervan zijn er 12 aangelegd (dit gaat dan om een aangelegde strandvlakte, aangelegd duin of aangelegd duinlandschap); 7 gebieden zijn gestuurd (ontstaan door sturing van natuurlijke processen) en 9 gebieden zijn natuurlijk ontstaan (dus zonder ingrepen van de mens). Op basis van deze gebieden stellen we conceptuele ontwikkelingsschema's op voor de zeewaartse kustuitbreidingen, bij verschillende mate van sturen, voor zowel een aangroeiende (gesuppleerde) kust als een eroderende kust. Aan de hand van deze ontwikkelingsschema's vergelijken we de aangelegde en gestuurde studiegebieden met de natuurlijke studiegebieden en bestuderen we afwijkingen van ontwikkeling die we in de gestuurde en aangelegde gebieden observeren. Tot slot leiden we lessen af die van toepassing zijn op megasuppleties.

Een constatering in dit onderzoek is dat aangelegde gebieden een geringere diversiteit aan geomorfologische eenheden en habitattypen bevatten vergeleken met de natuurlijke en gestuurde

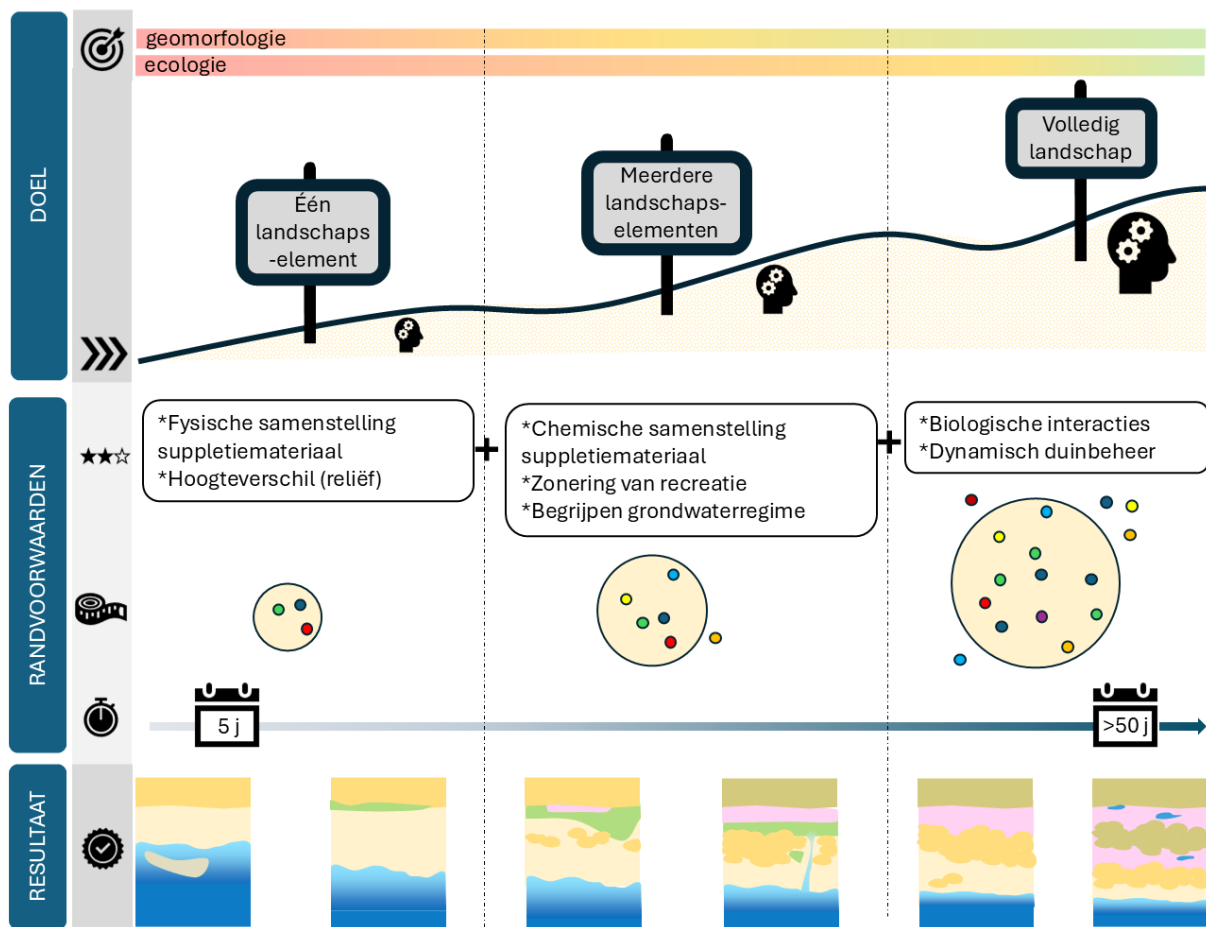
gebieden. Dit is te verklaren vanuit één of een combinatie van de factoren ruimte, tijd, kwaliteit en proces:

- 1) **Ruimte.** Voor de ontwikkeling van nieuwe natuur en/of verbetering van bestaande natuurwaarden is ruimte nodig. In de aangelegde proefgebieden is de omvang van de gebieden soms te klein om tot een volwaardig kustlandschap te kunnen uitgroeien. Ook bij een beperkte ruimte kan een waardevol landschap ontstaan, maar dit landschap bestaat dan uit een beperkt aantal elementen en is niet volledig.
- 2) **Tijd.** Geomorfologische en ecologische ontwikkeling in een gebied heeft tijd nodig. Landschapselementen moeten tot ontwikkeling komen, losse landschapselementen als strand en individuele embryonale duinen ontstaan relatief snel, maar het aaneengroeien tot een volledige duinenrij kost tijd. Voor ecologische ontwikkeling verder dan de pioniersfase moeten bodemvormende processen op gang komen. Dit vraagt tijd, een volledig ontwikkeld kustlandschap vraagt meer dan 50 jaar.
- 3) **Kwaliteit.** Bij de factor kwaliteit gaat het om benodigde randvoorwaarden voor geomorfologische en ecologische ontwikkeling. Dit zijn bijvoorbeeld een passende samenstelling van het aanleg- en suppletiemateriaal, zonering van recreatie om negatieve effecten van recreatie op de ontwikkeling te beperken, begrip en kennis van grondwaterregime en dynamisch duinbeheer.
- 4) **Procesmatig.** Projecten zijn veelal geïnitieerd vanuit waterveiligheid en kustverdediging. De laatste jaren worden daarbij ook wel doelstellingen voor ecologie en landschapsontwikkeling gesteld, maar deze doelstellingen zijn niet altijd concreet en staan niet altijd in verhouding met de factoren ruimte, tijd en kwaliteit. De beschikbare ruimte en het tijdpad voor het behalen van doelen en de gestelde randvoorwaarden vanuit kwaliteit moeten realistisch zijn en in samenhang met elkaar worden beschouwd. Het stellen van een doel van volledig ontwikkeld landschap in een beperkt gebied over een periode van 25 jaar, met een samenstelling van suppletiemateriaal dat niet bij achterliggend gebied past is niet realistisch. Complexere landschappen vereisen een complexer denkproces, meer inzicht in interacties, een lange termijn visie en planning etc.

In de studiegebieden van dit onderzoek is geen kwaliteitsimpuls naar het achterland waarneembaar die te koppelen is aan de zeewaartse uitbreiding. Dit is in potentie wel mogelijk, en kan ontstaan door het creëren van gradiënten in zoutspray, eolische zanddynamiek en hydrologische condities en het beschikbaar maken van sediment voor verstuviging naar het achterland. Een kwaliteitsimpuls is alleen te realiseren als er goede aansluiting is tussen het gebied van zeewaartse kustuitbreiding en het achterliggende gebied. Dit betekent veelal dat er aanvullende maatregelen en beheer nodig zijn. Het advies is om in het ontwerpproces van zeewaartse kustuitbreiding rekening te houden met kwaliteitsimpuls voor het achterliggende gebied.

Zonder handhaving van de kustlijn zal zeespiegelstijging leiden tot kusterosie en daarmee tot afname van de lokale zoetwatervoorraad. Zeewaartse kustuitbreiding met een megasuppletie heeft een positief effect op ontwikkeling van de zoetwaterlens en waterveiligheid. Beide aspecten vragen wel een langdurige ontwikkeling (meer dan 50 jaar). Voor waterveiligheid gelden in Nederland wettelijke normen. Dit zijn eisen waar altijd aan zal worden voldaan. Mogelijk dat met inzet van megasuppleties het waterveiligheidsbeleid anders en/of efficiënter kan worden uitgevoerd. Dit vraagt nader onderzoek.

De bevindingen van dit onderzoek zijn samengevat in Figuur 1. Op basis van de bevindingen in dit onderzoek zijn richtlijnen opgesteld voor het ontwerp en de aanleg van megasuppleties. Deze richtlijnen hebben betrekking op 1) het creëren van voldoende ruimte, 2) het gunnen van genoeg ontwikkelingstijd, 3) het bieden van voldoende (ecologische) kwaliteit, en 4) een aantal procesmatige beschouwingen.



Figuur 1. Samenvattend figuur over effect van zeewaartse oplossingen op de ontwikkeling van nieuwe natuur en/of bestaande natuurwaarden. Afhankelijk van de doelstelling (creëren van een of meerdere landschapselementen of een volledig landschap) is het ontwerpproces complexer en zijn er verschillende randvoorwaarden voor kwaliteit, ruimte en tijd die van belang zijn. Hoe vollediger het landschap, hoe meer geomorfologische en ecologische eenheden en hoe complexer het ontwerpproces (aangegeven met een hersenicoontje). Het resulterende landschap is weergegeven in icoontjes.

Summary

Dune ecosystems in the Netherlands face growing pressure due to coastal erosion, rising sea levels, nitrogen deposition, acidification, overgrowth, increased recreation, and spatial claims from other land uses. This is especially critical in narrow dune zones, where many interests converge. Rising sea levels will exacerbate this pressure in the future. Large-scale natural dynamics are often not feasible in these areas because of risks to coastal defenses and adjacent landuse. Reinforcement of dunes or construction of seawalls can harm ecological quality and limit natural landscape development.

Seaward strategies may offer promising solutions to the increasing pressure on dune areas. Firstly, expanding the coastline toward the sea enhances protection for inland regions while creating space for new dune ecosystems. Secondly, implementing a seaward coastal extension strategies, such as constructing beach plains, dunes, or dune landscapes through large-scale sand nourishment results in less ecological disruption than multiple smaller nourishments.

The objective of this research is to determine how seaward coastal extension strategies can be designed to promote the creation of new nature and/or enhance existing ecological values. This research focuses on four key knowledge questions:

- 1) What conditions are needed to achieve fully developed dune ecosystems within seaward coastal extension zones?
- 2) What are the potential impacts of coastal extension on existing inland dune areas?
- 3) In what way can seaward coastal extension strategies affect gradients of salt spray, wind-driven sand dynamics, and groundwater conditions?
- 4) What are the expected effects of mega nourishments on freshwater availability and water safety?

Nature value is assessed through both geomorphological (landform) and ecological units. More geomorphological diversity serves as a proxy for potentially rich, complete ecosystems. Data on geomorphological units is based on aerial photography and the Dutch Elevation Model. Ecological value is derived from Natura2000 habitat maps.

The study reviews 28 coastal areas in The Netherlands, from the Wadden Islands to the Zeeland Delta, each with some form of seaward coastal extension: 12 areas are classified as “constructed” (e.g., artificially built beaches, dunes or dune landscapes); 7 area are “controlled” (formed through some form of control or steering of natural processes); 9 areas are naturally formed (without human intervention).

Development schemes are created that represent different types of coastal extension strategies, both for an coast where erosion and accretion occurs. These schemes help compare the “constructed” and “controlled” areas with the naturally developed areas to reveal and study deviations. Lessons are extracted, particularly relevant for developing guidelines for implementing mega nourishments with respect to nature development.

One of the findings of this study is that constructed areas show lower diversity in landforms and habitats than natural or steered areas. One or a combination of the factors: space, time, quality, and process help explain this:

- **Space:** Limited area restricts full landscape development. To develop new natural environments or improve existing ecological values, sufficient space is essential. In the constructed areas that were investigated in this study, the size is sometimes too limited to grow into a fully-fledged

coastal landscape. However in compact spaces, valuable landscapes can emerge, but they consist of only a few elements and are not complete.

- **Time:** Geomorphological and ecological development requires time. Basic landscape features like beaches and embryonic dunes can form quickly, but the development of a complete dune system takes much longer. Ecological progress beyond the pioneer phase demands soil-forming processes, which must emerge and evolve over time. A fully developed coastal landscape typically requires to 50+ years.
- **Quality:** This factor refers to the necessary conditions for geomorphological and ecological development, such as a suitable composition of construction and nourishment materials, careful zoning to limit recreational impacts, a solid understanding of groundwater dynamics, and dynamic dune management. These conditions critically influence the success of landscape evolution.
- **Process:** Projects are often initiated with water safety and coastal defense as primary goals. Although ecological and landscape development objectives are increasingly included, they're not always well-defined or aligned with the available space, timeline, and quality requirements. Setting an ambitious goal of creating a fully developed landscape within 25 years in a small area with poorly matched nourishment materials is unrealistic. More complex landscapes demand a more intricate planning process, deeper understanding of ecological interactions, and a long-term vision.

In the study areas examined, no observable quality enhancement in the hinterland can currently be linked to the seaward coastal extension zones. However, in theory, seaward coastal extension through mega nourishments has the potential to trigger ecological improvements in the adjacent areas. These enhancements can arise through the creation of gradients in salt spray, aeolian sand dynamics, and hydrological conditions, as well as through the availability of sediment that can disperse inland. Whether this quality boost materializes depends on connectivity between the nourishment area and the hinterland. This often necessitates additional interventions and management. It is recommended that future design processes of seaward coastal expansions explicitly consider possibilities for enhancing the quality of the hinterland.

if the coastline is not maintained, sea level rise will lead to coastal erosion and a decrease in the local freshwater supply. Seaward extension using mega nourishments positively influences the development of freshwater lenses and contributes to water safety—although both effects require long-term development (up to 100+years). In the Netherlands, water safety is governed by water safety standards which must always be met. Mega nourishments might offer opportunities for adjusting or executing water safety policies more efficiently, though further research is needed to validate this. The findings of this study are summarized in Figure 1. Based on these findings, a set of design guidelines for mega nourishments has been developed, focusing on: 1) Ensuring sufficient spatial dimensions; 2) Allowing adequate time for development; 3) Providing necessary (ecological) quality; 4) considering Addressing process-related key issues.

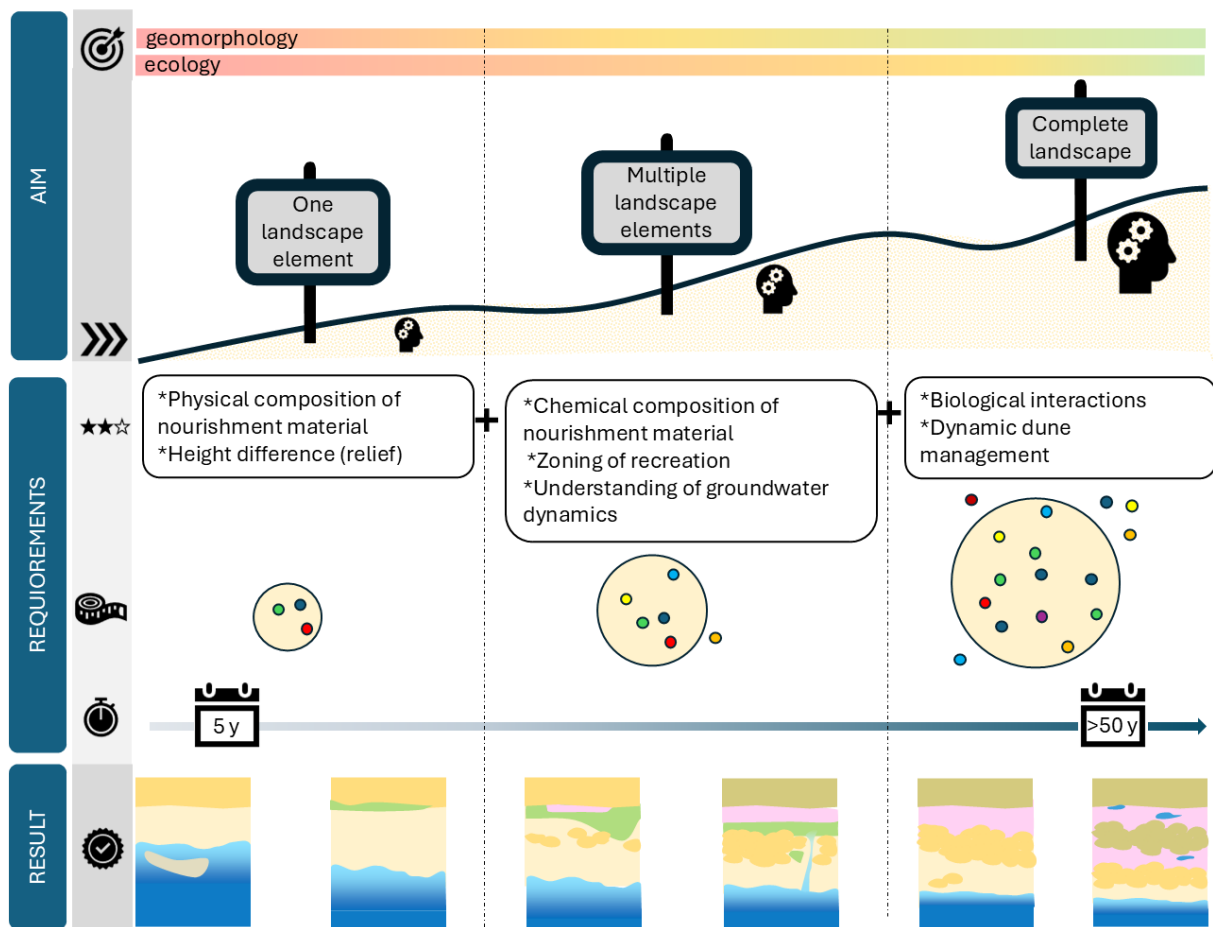


Figure 2. Summary figure on the Impact of seaward coastal extensions on the development of new and/or existing nature values. This figure summarizes the effects of seaward coastal extensions on the development of new nature or enhancement of existing ecological values. Depending on the objective—whether it's the creation of one or more landscape elements or the establishment of a complete landscape—the design process varies in complexity. Different conditions related to quality, space, and time play an essential role. The more complete the envisioned landscape, the greater the number of geomorphological and ecological units involved, resulting in a more complex design process (represented by a brain icon). The type of resulting landscape is illustrated using symbolic icons..

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Duinnatuur staat onder druk. Kusterosie, een stijgende zeespiegel, stikstofdepositie, verzuring, verruiging, de toenemende recreatie en ruimtebeslag door andere functies leggen een steeds grotere druk op het duinlandschap. Dit is in hoge mate het geval voor smalle duingebieden waar al deze functies op een klein gebied samenkomen. Intensief beheer is nodig om de kwaliteit van de natuur op peil te houden. Door zeespiegelstijging staan duingebieden in de toekomst onder nog meer druk. Waar duinen smal zijn, is grootschalige dynamiek geen optie, wegens risico's voor de kustverdediging en functies in het achterland. Bij een stijgende zeespiegel zullen mogelijk ingrijpende maatregelen moeten worden genomen om de waterveiligheid te blijven garanderen. Versteving van de duinenrij of de aanleg van zeewerende dijken zullen de kwaliteit van de aanwezige natuur verder onder druk zetten en de mogelijkheden voor een natuurlijke ontwikkeling verder beperken.

Zeewaartse strategieën kunnen misschien een oplossing bieden. Een zeewaartse uitbreiding biedt veiligheid voor het achterliggende gebied. Bovendien wordt er ruimte gecreëerd voor nieuwe duinnatuur. Ook draagt het mogelijk bij aan een vergroting van de zoetwatervoorraad en grondwaterafhankelijke duinnatuur. Hoe kunnen zeewaartse oplossingen zo vorm worden gegeven dat ze optimaal bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe natuur, en/of verbetering van bestaande natuur?

Voor uitbreiding van kust en duin is een onderscheid te maken in “permanente” en “tijdelijke” oplossingen, variërend van klein- tot grootschalig. Permanente oplossingen worden na aanleg onderhouden, om te voorkomen dat ze weer verdwijnen. Voorbeelden in Nederland zijn de Hondsbossche duinen tussen Petten en Camperduin en de Prins Hendrik Zanddijk op Texel. Tijdelijke oplossingen mogen na verloop van tijd weer verdwijnen. Het idee is dat een eenmalige ingreep minder verstoring teweeg brengt dan verschillende kleinere ingrepen. Een voorbeeld is de Zandmotor, ten zuiden van Kijkduin. De opgespoten zandplaat is onderhevig aan kusterosie, waardoor het oppervlak geleidelijk aan afneemt, maar tegelijkertijd wordt het vrijkomende zand uitgesmeerd over de Delflandse kust. Ondertussen vindt op de zandplaat wel duinontwikkeling plaats. Deze embryonale duinen zullen op den duur door voortschrijdende erosie van de zandplaat weer verdwijnen.

Een tijdelijke zeewaartse uitbreiding kan door erosie overgaan in een afslagkust, met een toename van (grootschalige, secundaire) eolische dynamiek in het achterliggende duingebied. Deze dynamiek kan daar zorgen voor verjonging van landschap en bodem, herstel van basenrijke condities en terugkeer van meer biodiverse duinnatuur. Erosie van de kustlijn zou dan gepaard kunnen gaan met grootschalige processen als parabolisering, waarbij vanuit een eroderende zeereep nieuwe paraboolduinen landwaarts kunnen bewegen en daar op grote schaal voor verjonging kunnen zorgen. In het Nederlandse duingebied is daar door allerlei omstandigheden (nu) vrijwel geen ruimte meer voor.

In de ontwerpen van de bestaande zeewaartse oplossingen is over het algemeen wel rekening gehouden met natuur, in die zin dat er ruimte wordt geboden voor de ontwikkeling van specifieke kust- en/of duinnatuur, zoals bijvoorbeeld bij de Hondsbossche Duinen. In enkele gevallen gaat het om het creëren van de gewenste natuur (zoals bijv. bij Kustwerk Katwijk). In het ontwerp van dergelijke oplossingen is er tot nu toe weinig aandacht geweest voor de specifieke eisen die bepaalde natuurwaarden stellen, en hoe daar in het ontwerp aan tegemoet kan worden gekomen. In dit

onderzoek zoeken wij naar de randvoorwaarden voor een optimale ontwikkeling van de natuur. We onderzoeken wat de bestaande (grootschalige) zeewaartse uitbreiding aan natuurwaarden heeft opgeleverd, en of hier richtlijnen uit te destilleren zijn waar in het ontwerp van een (grootschalige) zeewaartse uitbreiding rekening mee moet worden gehouden (de do's en don'ts). We gebruiken natuurlijke analogieën om inzicht te krijgen in de ontwikkeling van duinnatuur in deze gebieden in zowel ruimte als tijd.

1.2 Doelstelling en kennisvragen

Doelstelling van het onderzoek is het opstellen van richtlijnen hoe zeewaartse kustverdediging (megasuppleties) ingezet kan worden om nieuwe duinnatuur, die aan de zeezijde van het oude duingebied ontstaat, optimaal tot ontwikkeling te laten komen en/of de duinnatuur in het oude duingebied te behouden of te verbeteren.

Om hier zicht op te krijgen zijn vier kennisvragen geformuleerd:

1. Wat is nodig in termen van volume, tijdsduur en vorm bij zeewaartse uitbouw om te komen tot een volwaardige en volledig ontwikkelde duinnatuur op eerst de uitbouwkust en vervolgens de afslagkust?
2. Welke ontwikkelingen in het gebied met zeewaartse uitbouw kunnen een kwaliteitsimpuls geven aan het al bestaande achterliggende duingebied? En wat is dan de gewenste timing van deze ontwikkelingen?
3. Wat is de optimale ontwikkeling van gradiënten in zoutspray, eolische zanddynamiek en hydrologische condities voor duinecologie – en wat kan de rol van megasuppleties hierin zijn?
4. Wat zijn de effecten van zeewaartse kustuitbreiding met megasuppleties voor zoetwaterzekerheid en waterveiligheid?

1.3 Scope en begripsafbakening

Dit onderzoek richt zich op de ontwikkeling van strandvlaktes en duinen langs de Nederlandse kust. We onderscheiden daarbij verschillende soorten van zeewaartse uitbreidingen: 1) zeewaartse uitbreidingen waarbij een strandvlakte wordt aangelegd (direct, dan wel indirect) en 2) zeewaartse uitbreidingen waarbij een duinenrij/duinversterking (zeereep) wordt aangelegd, direct of indirect. De term direct refereert aan het direct aanleggen van strand of duin (een voorbeeld van directe aanleg van een strandvlakte is de Zandmotor, een voorbeeld van het direct aanleggen van een duinlandschap zijn de Hondsbossche Duinen). Indirect betekent dat een strandvlakte, duin of duingebied niet direct zelf wordt aangelegd, maar dat het type landschap kan ontstaan door aanleg van bijvoorbeeld een strekdam of stuifdijk. Daarnaast kijken we ook naar natuurlijke strandvlaktes. In het onderzoek beschouwen we de ontwikkelingen van strandvlaktes en duinen in zowel een aanzandend als eroderend kustsysteem.

De doelstelling van dit onderzoek benoemt zeewaartse kustverdediging en megasuppleties. In deze rapportage gebruiken we de termen zeewaartse kustuitbreiding en megasuppleties enigszins uitwisselbaar. Reden hiervoor is het uitgangspunt van onderzoek in deze rapportage: we onderzoeken zeewaartse kustuitbreiding door het uitvoeren van megasuppletie(s). In Kader 1 zijn de termen zeewaartse kustuitbreiding en megasuppleties nader gedefinieerd.

In dit onderzoek beschouwen we een “volwaardige en volledig ontwikkelde duinnatuur” (kennisvraag 1) als een landschap met een variatie aan goed ontwikkelde geomorfologische

eenheden, waar (op den duur) zich een variatie aan habitattypen kan ontwikkelen. Hoe meer eenheden en/of habitattypen aanwezig zijn, hoe vollediger/volwaardiger het landschap.

Kader 1: Definiëring van termen zeewaartse kustuitbreiding en megasuppleties in deze studie

Definiëring van termen zeewaartse kustuitbreiding en megasuppleties in deze studie

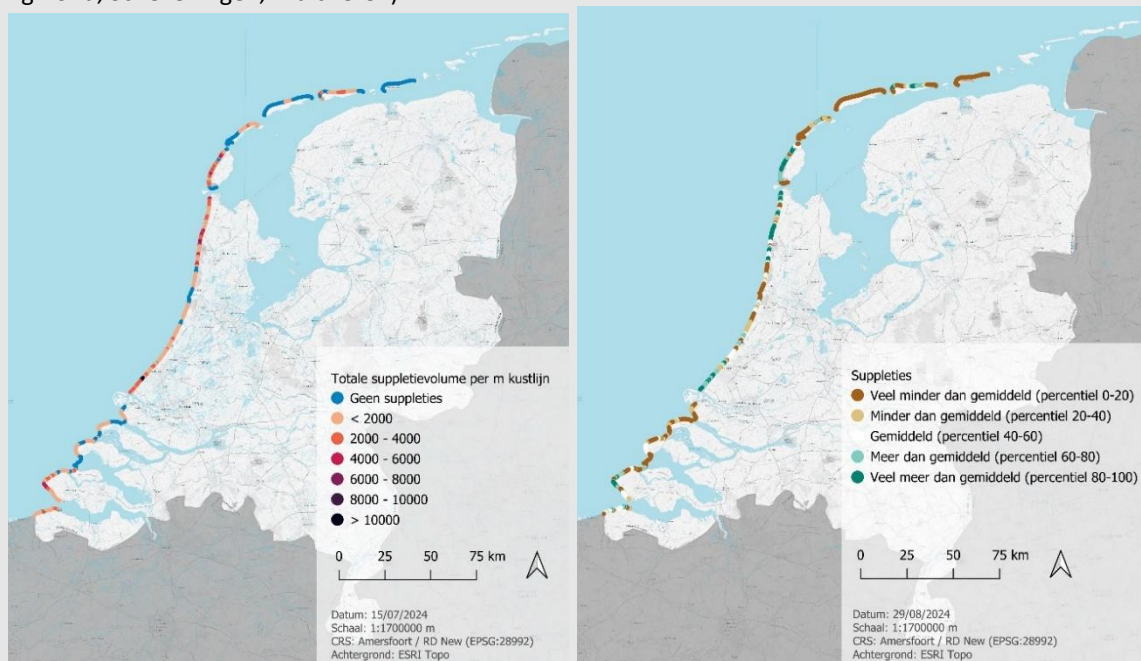
Met de term zeewaartse kustuitbreiding bedoelen we een volumetoename in het kustprofiel zeewaarts van de (huidige) eerste duinenrij (zeereep).

Voor de term megasuppletie sluiten we aan bij de gehanteerde werkdefinitie uit Deltares (2009): “Een totale suppletiehoeveelheid die in totaal een volume heeft dat twee keer of meer zo groot is als de totale hoeveelheid zand die nu per keer gesuppleerd wordt. De suppletiefrequentie van een megasuppletie is lager dan die van een ‘gewone’ suppletie. De megasuppletie kan zowel boven als onder water liggen.” In deze studie focussen we ons op een megasuppletie boven water.

Het suppletievolume aan de kust van Nederland varieert per locatie, maar vertaling van deze werkdefinitie naar volume komt neer op een suppletievolume van meer dan ± 10 mln. m³ voor een suppletie. Vertaling van deze werkdefinitie naar frequentie komt neer op een frequentie van 1 x per 12 jaar (Deltares, 2009).

De Nederlandse kust wordt de komende jaren naar verwachting met gemiddeld 12 miljoen m³ zand per jaar gesuppleerd (IPLO, kust). Figuur 3 (links) geeft het totale suppletievolume per meter kustlijn tussen 1990 en 2023 (KPZSS, 2024). Figuur 3 (rechts) geeft aan of de mate van suppleren gemiddeld is, of boven- of onder gemiddeld. In Figuur 3 is geen onderscheid gemaakt naar type suppletie. In de gegevens van Figuur 3 zijn de aanlegvolumes van Maasvlakte en Hondsbossche Duinen niet meegenomen, omdat dit duinversterkingen betreffen. De Zandmotor is wel in de gegevens meegenomen.

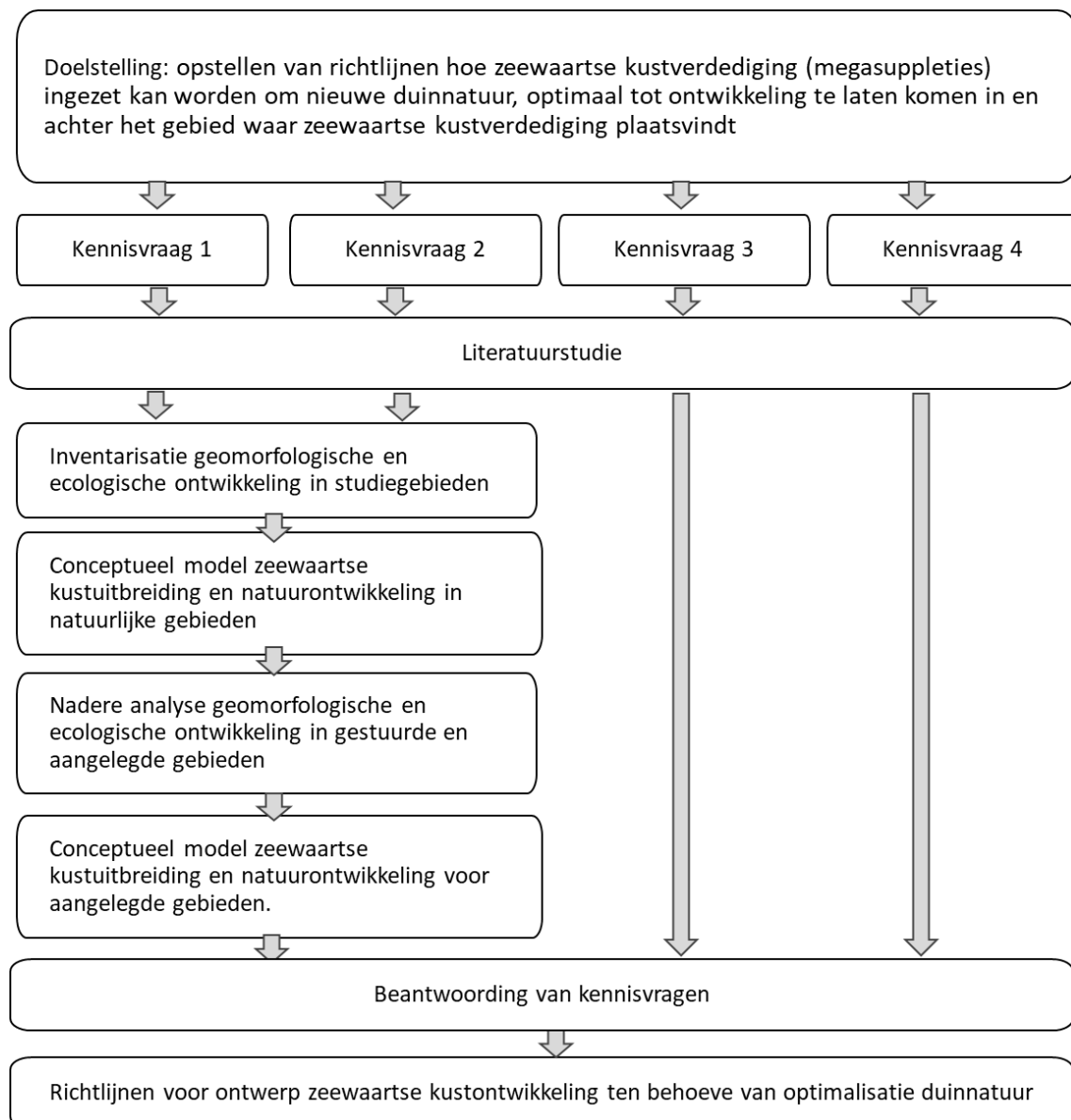
Bij de Hollandse kust en de Zeeuwse kust zijn de harde zeeweringen in Figuur 3 (met name links) duidelijk terug te zien. Figuur 3 laat zien dat de Waddenkust en Zeeuwse kust relatief gezien minder wordt gesuppleerd in vergelijking met de Hollandse kust. Wel zijn er verspreid langs zowel de Waddenkust, Hollandse Kust en Zeeuwse kust locaties waar relatief veel/ frequent wordt gesuppleerd (Ameland, Bergen, Egmond, Scheveningen, Walcheren).



Figuur 3: Totale suppletievolume per m kustlijn (links) en de mate van suppleren ten opzichte van het gemiddelde (rechts). (KPZSS, 2024. Gegevens gebaseerd op suppletiedatabase van Rijkswaterstaat)

1.4 Aanpak

Doel van dit onderzoek is het opstellen van richtlijnen hoe zeewaartse kustverdediging ingezet kan worden om duinnatuur optimaal tot ontwikkeling te laten komen. De richtlijnen baseren we op de antwoorden op de kennisvragen. Kennisvragen 1 en 2 (zie paragraaf 1.2) vormen de kern van dit onderzoek. Deze kennisvragen beantwoorden we op basis van analyse van studiegebieden (analyse van ruimtelijke bestaande data (topografische kaart, luchtfoto's, AHN, jarkusgegevens, habitatkaarten), aangevuld met literatuur. Kennisvraag 3 en 4 worden beantwoord op basis van bestaande literatuur. De aanpak van dit onderzoek is weergegeven in Figuur 4.



Figuur 4. Projectaanpak om richtlijnen op te stellen voor het ontwerp van zeewaartse kustverdediging en duinnatuurontwikkeling.

Voor kennisvraag 1 en 2 richten we ons op de geomorfologische en ecologische ontwikkeling van strandvlaktes en duinen langs de Nederlandse kust. De geomorfologische en ecologische ontwikkeling beschouwen we als indicatoren voor ontwikkeling van duinnatuur. Hoe meer eenheden en/of habitattypen aanwezig zijn, hoe vollediger/volwaardiger het landschap. Op basis van een

eerste analyse van de studiegebieden stellen we een conceptueel model op van ontwikkeling van strand en duingebieden onder natuurlijke omstandigheden. Dit doen we voor een situatie van een aanzandende en eroderende kust. In het vervolg van het onderzoek verdiepen we de analyse. We analyseren het effect van sturing en aanleg van gebieden op strand en duinontwikkeling nader voor zeewaartse uitbreidingen. We onderscheiden daarbij twee soorten van zeewaartse uitbreidingen: 1) zeewaartse uitbreidingen waarbij een strandvlakte wordt aangelegd (direct, dan wel indirect) en 2) zeewaartse uitbreidingen waarbij een duinenrij/duinversterking (zeereep) wordt aangelegd, direct of indirect. Met de opgedane kennis van de studiegebieden en uit literatuur wordt het model van de ontwikkeling van strand en duingebieden uitgebreid voor deze verschillende vormen van zeewaartse uitbreiding. Op basis van de opgedane kennis en aangevuld met literatuur worden vervolgens de kennisvragen beantwoord (Figuur 4.).

De kustprocessen van de Wadden, de Hollandse Kust en de Delta verschillen van elkaar door bijvoorbeeld aan-/afwezigheid van zeegaten, zandbanken voor de kust, getijslag, kustoriëntatie et cetera. Een uitgebreide kwantitatieve analyse van verklarende en drijvende factoren tussen deze deelgebieden valt buiten de scope van dit onderzoek. In dit onderzoek is ons uitgangspunt dat de geomorfologische en ecologische ontwikkeling van strandvlaktes en duinen in de Wadden, Hollandse kust en Delta zodanige overeenkomsten vertonen in de ontwikkeling, dat de principes die we hier uit afleiden generiek zijn.

Door het bestuderen van de ontwikkeling in geselecteerde studiegebieden, krijgen we inzicht in de tijd en ruimte die nodig is voor een bepaalde geomorfologische en ecologische ontwikkeling en in de effecten van de randvoorwaarden voor deze ontwikkeling. Omdat het aantal zeewaartse uitbreidingen met megasuppleties langs de Nederlandse kust beperkt is, en de ontwikkelingstijd nog maar kort, beschouwen we in deze studie 3 soorten gebieden: 1) aangelegde gebieden (directe aanleg van strandvlakte, duin of duinlandschap); 2) gestuurde gebieden (gebieden waar ontwikkeling wordt gestuurd door bijvoorbeeld aanleg van een strekdam of stuifdijk; 3) natuurlijke gebieden (gebieden die natuurlijk zijn ontstaan, zonder ingrepen van de mens). Natuurlijke studiegebieden zijn gebieden waarbij de ontwikkeling in onze ogen overeenkomsten vertoont met de (uiteindelijke) ontwikkeling van een megasuppletie. Dit zijn over het algemeen situaties met een sterke mate van aanzanding, waarbij hetzij brede stranden ontstaan, hetzij sterk aanzandende zeerepen. Bij “gestuurde” studiegebieden heeft een zekere sturing door de mens plaatsgevonden, meestal niet met het oog op natuurdoelen, maar puur vanuit de gedachte van landaanwinning of kustverdediging. Sturen door bijvoorbeeld de aanleg van stuifdijken, het plaatsen van stuifschermen, of de aanplant van helm, heeft in een beginsituatie de natuurlijke processen en de vorming van het landschap bepaald, waarna een min of meer natuurlijke ecologische ontwikkeling op gang is gekomen.

Per studiegebied maken we een globale inventarisatie van de aanwezige geomorfologische landschapseenheden (gebaseerd op luchtfoto's en AHN) en van de aanwezige habitattypen en ontwikkeling van het strand- en duinecosysteem in de tijd (gebaseerd op de habitatkaarten waar deze beschikbaar zijn (BIJ12, 2025), aangevuld met informatie uit overige monitoring). Op basis van deze inventarisatie en analyses proberen we de kennisvragen te beantwoorden. Dit lukt niet voor alle (deel)vragen, omdat de noodzakelijke kennis en data hiervoor ontbreekt, of omdat er geen bruikbare voorbeelden van te vinden zijn. Vanwege de relatief beperkte omvang van de studie zijn ook niet alle deelvragen kwantitatief uitgewerkt.

1.5 Leeswijzer

De opzet van deze rapportage volgt de aanpak die is gebruikt voor het kunnen opstellen van richtlijnen (Figuur 4). Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van de studiegebieden die we in deze studie beschouwen met de analyses op het gebied van de morfologische en ecologische ontwikkeling. Op basis van deze analyse geeft Hoofdstuk 3 een conceptueel model van de ontwikkelingen die we als natuurlijk beschouwen bij een aangroeiende of eroderende kust. In hoofdstuk 4 analyseren we enkele studiegebieden met zeewaartse uitbreiding nader en gaan we na of er sprake is van een versnelling of vertraging ten opzichte van een natuurlijke ontwikkeling. We onderscheiden daarbij verschillende soorten van zeewaartse uitbreidingen: 1) zeewaartse uitbreidingen waarbij een strandvlakte wordt aangelegd (direct, dan wel indirect) en 2) zeewaartse uitbreidingen waarbij een duinenrij/duinversterking (zeereep) wordt aangelegd, direct of indirect. Hoofdstuk 5 presenteert het conceptueel model van ontwikkeling van strand en duinlandschappen in een natuurlijk systeem en voor verschillende mate van ingrepen, weer voor zowel een aanzandend als eroderend kustsysteem. Vervolgens worden in Hoofdstuk 6 de kennisvragen beantwoord. Hoofdstuk 7 geeft richtlijnen voor ontwerp van een zeewaartse kustuitbreiding. Hoofdstuk 8 geeft tenslotte de conclusies en enkele aanbevelingen voor verder onderzoek. Bronverwijzingen zijn opgenomen in Hoofdstuk 9.

2 Studiegebieden en eerste analyse

Zoals in Hoofdstuk 1 benoemd, beschouwen we de geomorfologische en ecologische ontwikkeling als indicatoren voor ontwikkeling van duinnatuur. Hoe meer eenheden en/of habitattypen aanwezig zijn, hoe vollediger/volwaardiger het landschap. Dit hoofdstuk geeft de analyse naar geomorfologische en ecologische eenheden in de studiegebieden.

Paragraaf 2.1 beschrijft de verschillende type zeewaartse oplossingen die we in dit onderzoek beschouwen. Paragraaf 2.2 geeft een overzicht van de studiegebieden in deze studie. De wijze waarop de informatie over de studiegebieden is verzameld is beschreven in paragraaf 2.3. Paragraaf 2.4 en 2.5 geeft de aanpak, resultaten en de conclusie van respectievelijk de geomorfologische (paragraaf 2.4) en ecologische (paragraaf 2.5) analyse van de studiegebieden. Analyse naar de interactie tussen de geomorfologie en ecologie is opgenomen in paragraaf 2.6.

2.1 Zeewaartse oplossingen

Om richtlijnen te benoemen of en hoe zeewaartse kustverdediging met megasuppleties ingezet kan worden om nieuwe duinnatuur, die aan de zeezijde van het oude duingebied ontstaat, optimaal tot ontwikkeling te laten komen en/of de duinnatuur in het oude duingebied te behouden of te verbeteren zijn 28 studiegebieden geselecteerd.

Een belangrijk criterium voor de selectie van studiegebieden betreft de mate van sturing die in de ontwikkeling van een studiegebied heeft plaatsgevonden. We beschouwen niet alleen gebieden waarbij de ontwikkeling is gestuurd. Voor de vergelijking zijn juist ook een aantal studiegebieden geselecteerd met een natuurlijke ontwikkeling.

Welke vormen van sturen zijn langs de Nederlandse kust toegepast? Wat is het arsenaal aan zeewaartse oplossingen waar we over kunnen beschikken? We geven hieronder een overzicht, waarbij de mate van sturing toeneemt, van ongestuurd (natuurlijk/autonoom) naar volledig kunstmatig:

- **Natuurlijke ontwikkeling:** ontwikkeling van een strand en duinlandschap zonder sturing. De natuurlijke ontwikkeling kan zowel een aangroeiende als eroderende ontwikkeling zijn. De Nederlandse kust kent een bijzondere vorm van natuurlijke ontwikkeling: sinds 1990 wordt de kustlijn dynamisch gehandhaafd en worden suppleties uitgevoerd om de kustlijn vast te houden en het kustfundament (landwaartse grens duingebied tot -20 meter NAP) mee te laten groeien met de stijging van de zeespiegel. De ontwikkeling van het strand en duinlandschap is natuurlijk, maar de kustachteruitgang wordt gecompenseerd met zandsuppleties. Een echt 'eroderende kustontwikkeling' zien we dan ook niet echt in het Nederlandse kustgebied.

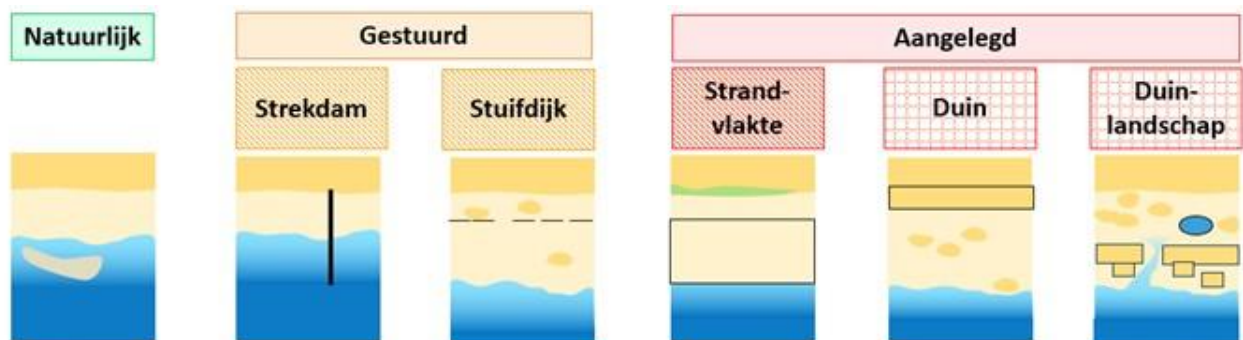
De volgende twee typen noemen we een "gestuurde" ontwikkeling, omdat met interventie processen worden gestuurd.

- **Sturen processen door aanleg strekdam:** door de mens bepaalde locatie waar door autonome processen het strand geleidelijk verbreedt en een nieuwe strandvlakte ontstaat waarop vervolgens andere nieuwe landschapselementen kunnen ontstaan.
- **Sturen processen door aanleg stuifdijk:** door de mens bepaalde positie van opstuiving (eolisch zandtransport). De opstuiving is een autonoom proces, de plaats van invangen wordt door de mens bepaald, door het plaatsen van stuifschermen. Daardoor is de vorm over het algemeen recht. De aanleg van stuifdijken is veelvuldig op de strandvlaktes van de Waddeneilanden toegepast, vaak met het idee van "landaanwinning". Door de aanleg van stuifdijken zijn grote delen van strandvlaktes afgesnoerd (achter de stuifdijken vermindert de invloed van de zee).

De volgende drie typen noemen we een "aangelegde" ontwikkeling, omdat hier direct landschapselementen worden aangelegd.

- Aanleg strandvlakte: door de mens bepaalde locatie en grootte van een nieuwe strandvlakte, waar vervolgens door natuurlijke processen nieuwe landschapselementen kunnen ontstaan. De sedimentaire gelaagdheid is kunstmatig en de korrelgrootteverdeling is anders dan bij een natuurlijke strandvlakte. Met name de inhoud aan schelpen is groter. Hoogte en hellingshoek kan ook afwijken t.o.v. een natuurlijke strandvlakte.
- Aanleg zeereep/duinversterking: door de mens bepaalde locatie en dimensies van een kunstmatige duinenrij (of dijk) waar vervolgens door natuurlijke aan- en overstuiving een natuurlijker reliëf kan ontstaan en een ecologische ontwikkeling op gang kan komen. De sedimentaire gelaagdheid is kunstmatig en de korrelgrootte is anders dan bij een natuurlijk gevormde duinenrij, waar de gemiddelde korrelgrootte over het algemeen redelijk fijn is en de korrelgrootteverdeling nauw.
- Aanleg duinlandschap: door de mens bepaalde locatie, dimensie en configuratie van landschapselementen, waar vervolgens een ecologische ontwikkeling op gang kan komen. De sedimentaire gelaagdheid is kunstmatig en de korrelgrootte is anders dan bij een natuurlijk gevormde duinenrij, waar de gemiddelde korrelgrootte over het algemeen redelijk fijn is en de korrelgrootteverdeling nauw. De landschapsvormen zijn kunstmatig. De hoogteligging van valleien is over het algemeen niet aangepast aan de grondwaterstand.

Figuur 5 geeft een schematisch overzicht van de zes typen zeewaartse kustuitbreiding die in dit onderzoek worden beschouwd.



Figuur 5. Schematische weergave van zeewaartse kustuitbreidingen die in dit onderzoek worden beschouwd.

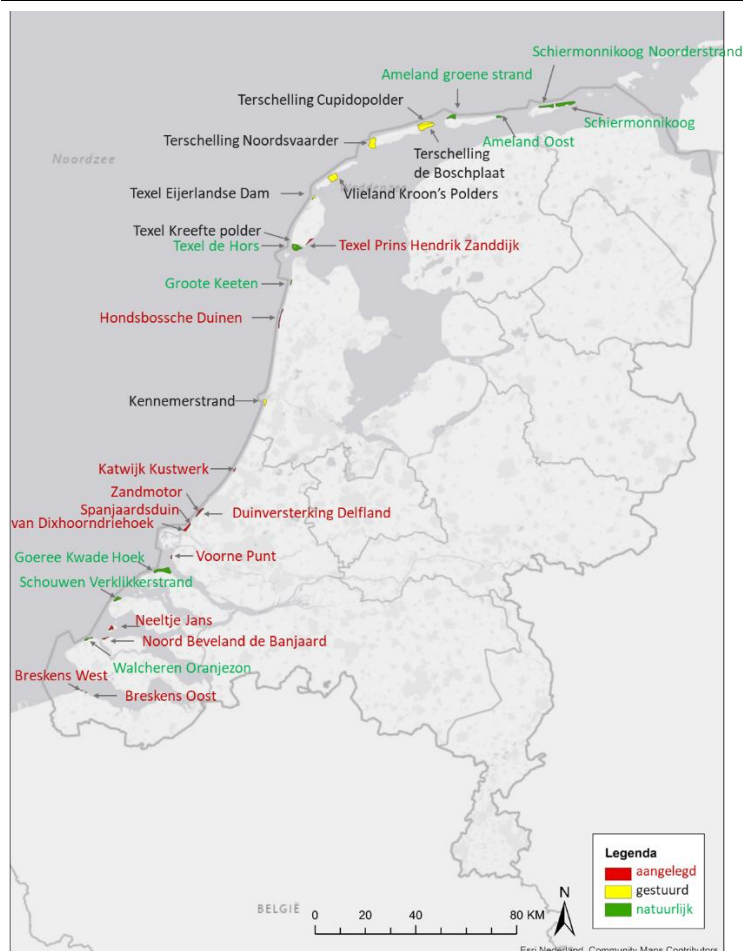
2.2 Overzicht studiegebieden

Er zijn 28 studiegebieden geselecteerd (Figuur 6 en Tabel 1). In Appendix A is de lijst van studiegebieden opgenomen met daarbij wat we van het studiegebied denken te kunnen leren. Twaalf van de studiegebieden liggen op de Waddeneilanden, acht langs de Hollandse kust en acht in de Delta (Zeeland en Zuid-Hollandse eilanden). Van de 28 studiegebieden zijn er negen natuurlijk, zeven hebben een gestuurde ontwikkeling en twaalf zijn aangelegd (Zie Tabel 1)¹.

¹ De indeling in 'natuurlijk', 'gestuurd' en 'aangelegd' is in kleur in Tabel 1 weergegeven. Gebieden die we als natuurlijk beschouwen zijn: Schiermonnikoog Noorderstrand; Schiermonnikoog; Ameland Groene Strand; Texel De Hors; Ameland oost; Groote Keeten; Schouwen Verklikkerstrand; Walcheren Oranjezon; Goeree Kwade Hoek. Gebieden die we als gestuurd beschouwen zijn: Texel Eierlandse dam; Terschelling Cupidopolder; Vlieland Kroon's Polders; Texel Kreefte Polder; Terschelling De Boschplaat; Terschelling Noordsvaarder. Gebieden die we als aangelegd beschouwen zijn: Texel Prins Hendrikzanddijk; Hondsbossche Duinen; Katwijk Kustwerk; Duinversterking Delfland; Spanjaardsduin; Zandmotor; van Dixhoorndriehoek; Breskens oost; Breskens west; Voorne Punt; Noord-Beveland de Banjaard; Neeltje Jans

Tabel 1. Ontwikkelingstijd studiegebieden, studiegebieden ingedeeld per deelgebied en 'natuurlijk', 'gestuurd' en 'aangelegd'.

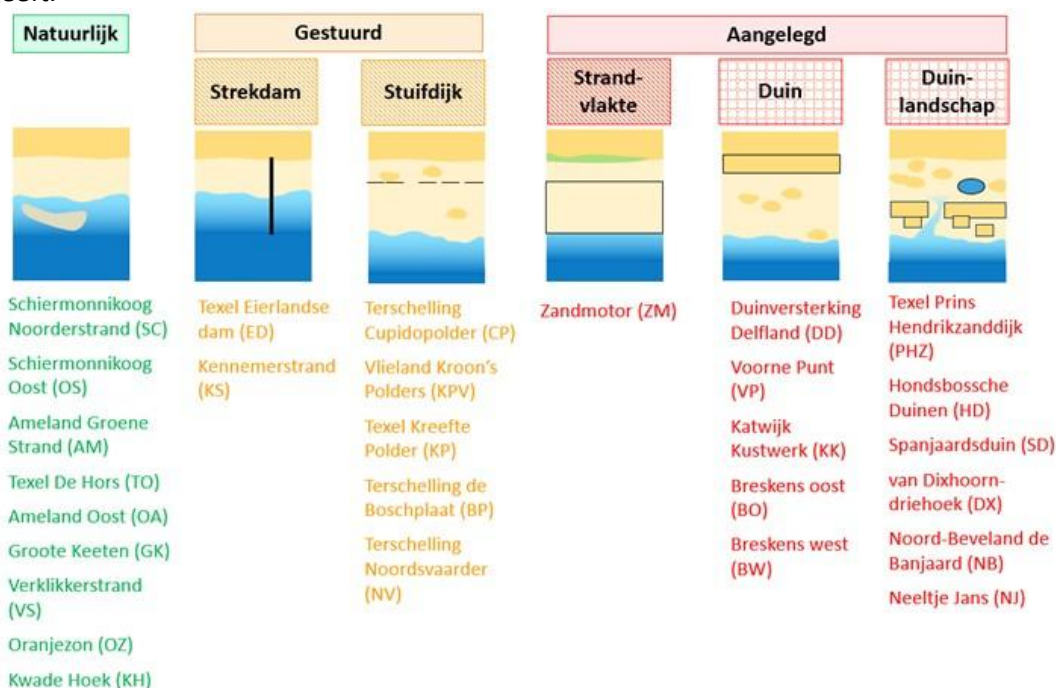
Leeftijd	Waddengebied(12)	Hollandse kust (8)	Zeeuwse Delta (8)
< 5 jaar			
5-10 jaar	- Texel Prins Hendrikzanddijk	- Hondsbossche Duinen - Katwijk Kustwerk	
10-30 jaar	- Texel Eierlandse dam - Schiermonnikoog Noorderstrand - Schiermonnikoog	- Duinversterking Delfland - Spanjaardsduin - Zandmotor	- Schouwen Verklikkerstrand - Walcheren Oranjezon - Breskens oost - Breskens west - Voorne Punt
30-50 jaar	- Ameland Groene Strand		- Goeree Kwade Hoek - Noord-Beveland de Banjaard - Neeltje Jans
50-100 jaar	- Texel De Hors - Ameland oost - Terschelling Cupidopolder - Vlieland Kroon's Polders - Texel Kreefte Polder	- Groote Keeten - Kennemerstrand - van Dixhoorndriehoek	
> 100 jaar	- Terschelling De Boschplaat - Terschelling Noordsvaarder		



Figuur 6. Overzicht studiegebieden en indeling in 'natuurlijk', 'gestuurd' en 'aangelegd'.

In dit onderzoek onderscheiden we twee soorten van zeewaartse uitbreidingen: 1) zeewaartse uitbreidingen gericht op ontwikkeling strandvlakte (al dan niet direct aangelegd of gestuurd met bijvoorbeeld een strekdam of stuifdijk) en 2) zeewaartse uitbreidingen gericht op ontwikkeling duinenrij/duinversterking (zeereep) (aangelegd of gestuurd). Van de aangelegde duingebieden/duinlandschappen ligt het grootste deel langs de Hollandse kust en in de Delta. Dit zijn vaak duinversterkingen, maar ook de Zandmotor, de Banjaard, Neeltje Jans, Spanjaardsduin, Hondsbossche Duinen en Prins Hendrik Zanddijk. Natuurlijke gebieden komen voornamelijk langs de Waddenkust en de Delta voor, gestuurde gebieden vooral op de Waddeneilanden en de Zeeuwse Delta (Tabel 1). Het betreft met name brede stranden/strandvlaktes met daarop in meer of mindere mate een vorm van duinontwikkeling en ontwikkeling naar (half)afgesnoerde strandvlakten.

Figuur 7 geeft een overzicht voor welk type zeewaartse kustuitbreiding elk studiegebied inzicht in geeft.



Figuur 7. Indeling type studiegebieden (natuurlijk, gestuurd en aangelegd).

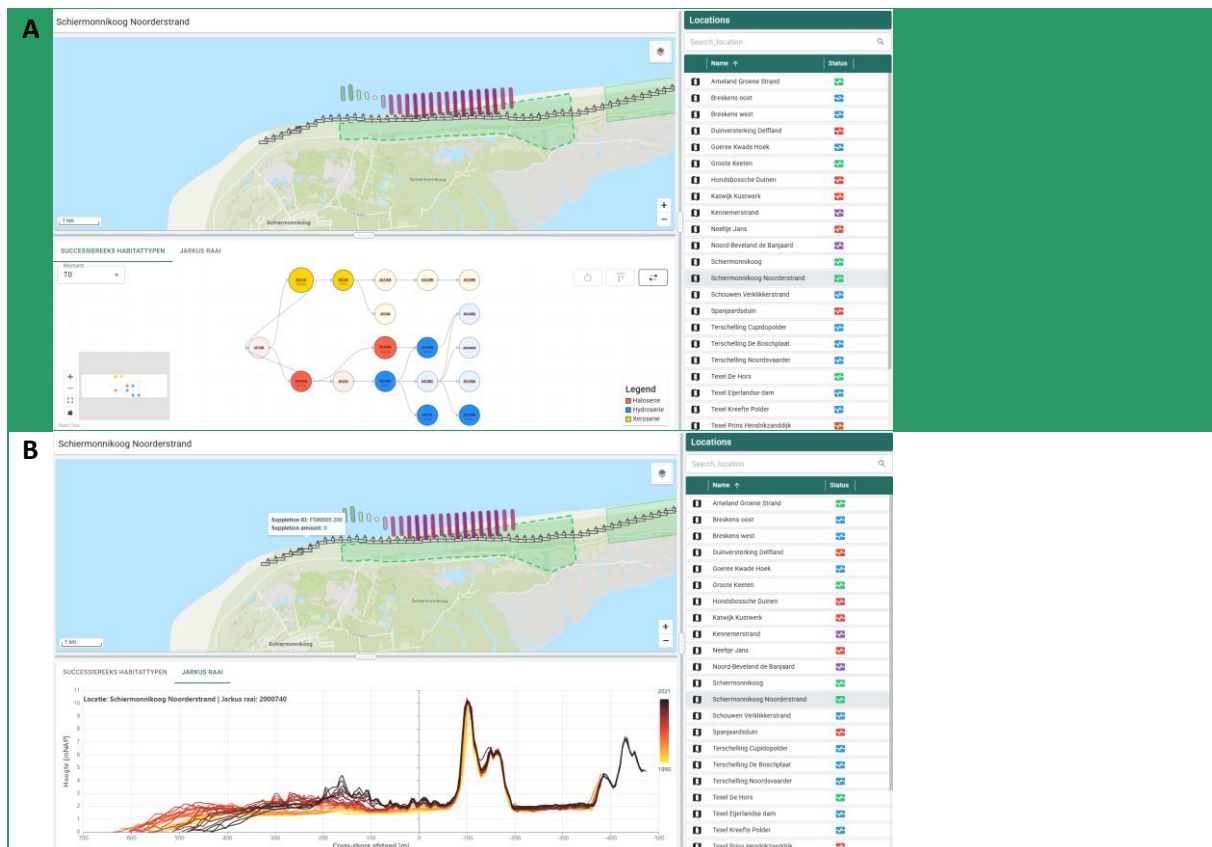
De studiegebieden zijn niet allemaal in dezelfde mate van detail onderzocht. Veel hangt af van beschikbare gegevens, voor sommige gebieden zijn nauwelijks gegevens voorhanden. Om de uiteindelijke natuurwaarde van de studiegebieden te bepalen kijken we naar geomorfologie en ecologie. De aanwezige geomorfologische eenheden geven een potentie voor een ecologische ontwikkeling. We gebruiken habitattypen volgens de habitatkaart (t0 of indien beschikbaar t1) om de huidige ecologische waarde te bepalen. Uitgangspunt is dat een volwaardig landschap, dus met goed ontwikkelde geomorfologische eenheden, op den duur ook een volwaardige ecologische inhoud krijgt. Hoe meer eenheden en/of habitattypen aanwezig zijn, hoe vollediger het landschap.

2.3 Methode voor inventarisatie studiegebieden

Voor de inventarisatie van geomorfologische eenheden is gebruik gemaakt van topografische kaarten (beschikbaar via het portal van Esri) teruggaand tot 1900 indien nodig, luchtfoto's (beschikbaar via www.beeldmateriaal.nl), habitatkaarten² en AHN1 t/m AHN5³ (beschikbaar via www.ahn.nl). Indien relevant wordt met behulp van de topografische kaarten de situatie van het gebied in 1900 en 1990 beschreven. Een verdere inventarisatie van geomorfologische eenheden (zie paragraaf 2.4) gaat uit van de huidige situatie. Per studiegebied zijn parameters opgenomen zoals ontwikkelingstijd, oppervlakte van het studiegebied, lengte van de gradiënt dwars op de kust, aard van het gebied, mate van aangroei/afslag, mate van recreatie etc. Per gebied is uitgezocht wat er specifiek van dit gebied te leren valt (zie Appendix A).

In dit project is ook een viewer opgesteld (Figuur 8). Deze viewer geeft voor elk studiegebied inzicht in: de contouren van het studiegebied; het type gebied (natuurlijk, gestuurd, aangelegd); de aanwezigheid van verschillende habitattypen (op basis van beschikbare habitatkaarten); de kustlijnonwikkeling (op basis van kustlijnkaart RWS en jaarlijkse JarKUS metingen) en hoeveelheid suppletie sinds 1990 tot 2 km buiten studiegebied.

De viewer is te raadplegen met een inlog, en de link: <https://sandtracer-acceptatie.hkvservices.nl/>.)



Figuur 8. Illustratie viewer voor studiegebied Schiermonnikoog Noorderstrand. (Link viewer: <https://sandtracer-acceptatie.hkvservices.nl/>, raad te plegen met een inlog)

² Habitatkaarten met verspreiding, oppervlakte en kwaliteit op basis van karteringen worden opgesteld voor alle Natura gebieden en ontsloten via de Nationale Databank Vegetatie- en Habitatkarteringen (BIJ12, 2025). Inmiddels is voor nagenoeg alle gebieden een eerste kartering beschikbaar (t0), en in sommige gevallen ook een t1. De maximale tijd tussen twee kaartmomenten zou 12 jaar moeten bedragen, maar in de praktijk blijkt dat lastig te realiseren.

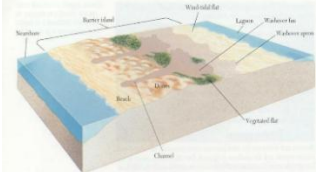
³ Het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) is een bestand met gedetailleerde hoogtegegevens voor heel Nederland, met een resolutie van minimaal 0,5 x 0,5 m². De gegevens worden ingewonnen door middel van laseraltimetrie (LIDAR).

2.4 Geomorfologische eenheden

2.4.1 Aanpak verkenning geomorfologische eenheden

Voor wat betreft de geomorfologie is vooral gekeken naar geomorfologische eenheden die op een zeewaartse uitbreiding kunnen voorkomen. Eenheden in de binnenduinen, dus landwaarts van de zeereep/stuifdijk bij een zeewaartse uitbreiding, zijn buiten beschouwing gelaten. De geselecteerde eenheden zijn opgesomd in Tabel 2:

Tabel 2. Overzicht van geomorfologische eenheden en hun definities

Afbeelding	Eenheid	Kenmerk	Definitie
	Embryonale duinen	los van de zeereep	Beginnende duintjes op strand of strandvlakte met een dominante begroeiing van helm of biestaruwegras
		tegen de oorspronkelijke zeereep	Idem, maar gevormd tegen de oorspronkelijke zeereep en daardoor rijvormig.
	Zeereep	Gesloten	Eerste, meestal gesloten duinenrij vanaf het strand gezien. Kan als stuifdijk zijn ontstaan. Vaak kunstmatig van vorm door (voorheen) intensief beheer.
	Strand	-	Kale zone tussen laagwaterlijn en duinvoet zone smaller dan 100 m
		Groen strand	Begroeid strand met zoutwaterinvloed, soms met beginnende embryonale duinen
	Strandvlakte	-	Kale zone tussen laagwaterlijn en duinvoet zone met hellingshoek $<0.17^\circ$, breder dan 100 m
		Onvolledig afgesnoerde strandvlakte/slufter	Deel van het strand of strandvlakte dat door duinontwikkeling bijna is afgesloten van zee-Invloed
		Volledig afgesnoerde strandvlakte door aanleg stuifdijk	Idem, maar afsluiting gestuurd door aanleg stuifdijk
		Volledig afgesnoerde strandvlakte door spontane ontwikkeling	Deel van het strand of strandvlakte dat door duinontwikkeling volledig is afgesloten van zee-Invloed
	Stuifdijk		Rechte duinenrij, ontstaan door het invangen van autonoom stuivend zand in stuifschermen en aanplant
	Washover		Opening in zeereep/duinenrij waardoor zeewater van Noordzee naar Waddenzee kan stromen (op de Wadden)

	Kwelder		Aangeslibd vlak en begroeid gebied, vaak in de luwte van stuifdijken of duinen, dat alleen nog bij stormvloed overstromt
	Oogduin /hoefijzerduin		Ring of hoefijzervormig duin op de kwelder, gevormd door wind en water
	Paraboliserende zeereep		Gekerfde zeereep met actief landwaarts bewegende depositielobben

Dagelijks overstromende zandplaten en slikplaten zijn bij de inventarisatie van geomorfologische eenheden niet in beeld gebracht. De aanwezigheid van zand- en slikplaten zijn een randvoorwaarde (zeer ondiepe zee) voor het ontstaan van bovengenoemde geomorfologische eenheden.

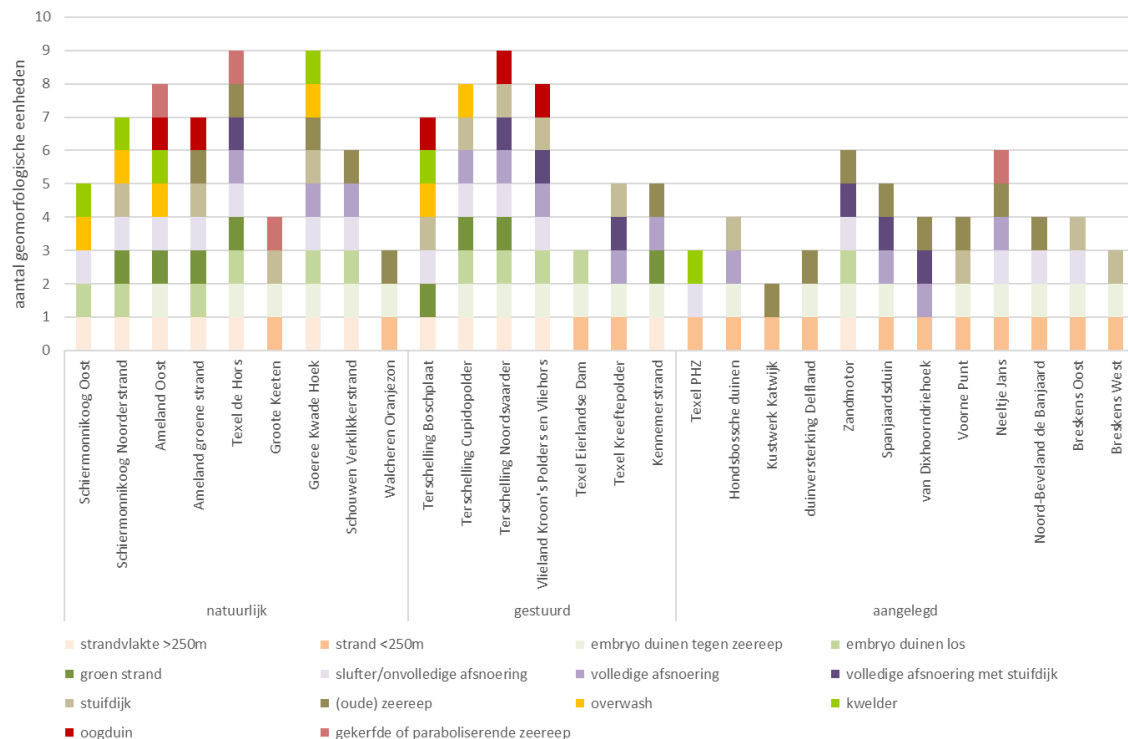
Het onderscheid tussen strand of strandvlakte is doorslaggevend voor de verdere ontwikkeling (zie ook Appendix B). Bij strandvlaktes zijn hoogteligging en daarmee samenhangend de vochtcondities belangrijk voor de verdere ontwikkeling. Op smalle stranden is de ruimte beperkt, is de dynamiek van de zee hoog (sterke golfwerking) en gaat de geomorfologische ontwikkeling over het algemeen niet veel verder dan tot (overstuvende) zeereep/stuifdijk, al dan niet met embryonale duinen ervoor. In het meest dynamische geval ontstaat een gekerfde of paraboliserende zeereep. De hydrologie speelt bij smalle stranden meestal geen rol. Op brede strandvlaktes is voldoende ruimte voor een volledig landschap met alle hierboven genoemde elementen omdat de hydrodynamiek van de zee geringer is. Kenmerkend is dat er op strandvlaktes een brede zone aanwezig is met een hellingshoek kleiner dan 0.17° (een helling met een verval van 0.2 m over 100 m). Deze zone moet grofweg tussen 0 en 3 m NAP liggen en minimaal 100 m breed zijn. Dat hanteren wij als onderscheid tussen strand en strandvlakte. Lage strandvlaktes (die relatief frequent overstromen vanuit zee) ontwikkelen natte ecosystemen in tegenstelling tot hoger gelegen strandvlaktes.

Per studiegebied zijn de geomorfologische eenheden geïnventariseerd, door deze te scoren. Een gedetailleerde kartering valt buiten de scope van dit onderzoek.

2.4.2 Resultaten verkenning geomorfologische eenheden

Figuur 9 geeft een overzicht van de geomorfologische eenheden per studiegebied. Van de geomorfologische eenheden komen strand of strandvlakte in alle gebieden voor (14 strandvlakte, 16 strand). Embryonale duinen tegen de zeereep komen in 20 gebieden voor, embryonale duinen los, vóór de zeereep in 12 gebieden. Andere veel voorkomende eenheden zijn volledig of onvolledig afgesnoerde strandvlaktes, al dan niet afgesnoerd door een stuifdijk. Zeldzame eenheden zijn groen strand (6), washover (5), kwelder (4) en oogduinen en gekerfde zeereep (beide 3), waarvan de eerste vier vrijwel alleen op de Waddeneilanden voorkomen en op de Kwade Hoek op Goeree. Gestuurde en natuurlijke gebieden ontlopen elkaar niet veel voor wat betreft het aantal geomorfologische eenheden (Figuur 9). Het maximale aantal is 9 (van de 14, of eigenlijk 15 inclusief de zandbanken). Het maximaal aantal geomorfologische eenheden zien we bij brede strandvlaktes met een lange ontwikkelingstijd, zoals de Hors op Texel, De Noordsvaarder op Terschelling en de Kwade Hoek op Goeree. Bij aangelegde studiegebieden is het aantal significant lager dan in gestuurde gebieden. Dit hangt in de meeste gebieden samen met de geringe breedte van het strand,

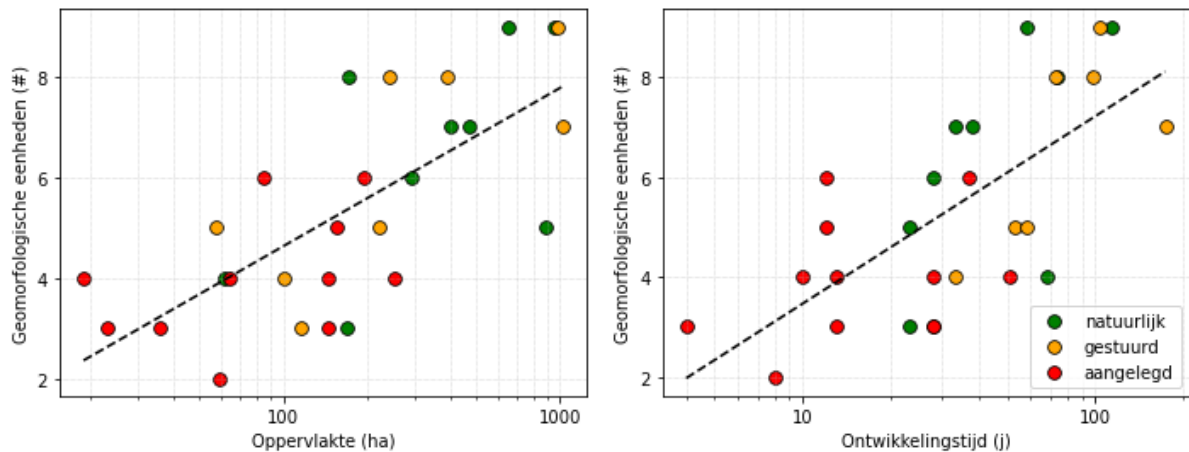
waarbinnen de hydrodynamiek van de zee te sterk is voor vegetatieontwikkeling. Met uitzondering van de Zandmotor bestaan de meeste aangelegde studiegebieden voornamelijk uit smal strand en zeereep, in een aantal gevallen in combinatie met een duinvallei of sluftrachtige situatie.



Figuur 9. Aantal geomorfologische eenheden per studiegebied. Links de natuurlijke gebieden, midden de gestuurde gebieden en rechts de aangelegde gebieden.

Er is een relatie tussen het aantal geomorfologische eenheden enerzijds en anderzijds de ontwikkelingstijd en beschikbare oppervlakte als onafhankelijke variabelen (zie Figuur 10 links). Voor gestuurde en natuurlijke ontwikkeling lijkt de relatie met ontwikkelingstijd overeen te komen, met een relatief steile helling in de regressie, terwijl deze positieve relatie niet zichtbaar is voor de aangelegde gebieden. De relatie is op zich logisch: hoe langer de ontwikkelingstijd, hoe groter het aantal geomorfologische eenheden. Maar er zijn uitzonderingen, zoals bijvoorbeeld het Noorderstrand op Schiermonnikoog waar in aanmerkelijk kortere tijd dan gemiddeld een ruim aantal eenheden is ontstaan. Een belangrijke factor die hier de ontwikkeling kan hebben versneld is toestroming van zoet grondwater vanuit een groot duinmassief, waardoor er versnelde ontwikkeling mogelijk was van vegetatie op de strandvlakte. Voor het ontbreken van de relatie voor de aangelegde gebieden speelt mee dat deze nog maar een relatief korte ontwikkelingstijd hebben, waardoor nog weinig geomorfologische eenheden aanwezig zijn die zich pas in een later stadium ontwikkelen. Ook speelt mee dat in sommige aangelegde gebieden al een aantal geomorfologische eenheden direct zijn aangelegd die in een natuurlijke situatie een langere ontwikkelingstijd nodig hebben.

De relatie tussen aantal morfologische eenheden en oppervlakte is eenduidiger (Figuur 10 rechts) rechts). Voor alle typen gebieden geldt dat een groter oppervlak zoals verwacht samengaat met een groter aantal geomorfologische eenheden. Ook hier zijn de puntenwolken overigens vrij diffuus.



Figuur 10. Relatie tussen aantal geomorfologische eenheden en ontwikkelingstijd (rechts) en beschikbare oppervlakte (links) voor de verschillende type studiegebieden. De onderbroken lijn geeft de gefitte machtsregressie voor alle datapunten gezamenlijk weer.

2.4.3 Conclusie verkenning geomorfologische eenheden

Uit de analyse van geomorfologische eenheden zijn verschillende conclusies af te leiden. Het aantal geomorfologische eenheden in de aangelegde gebieden is minder ten opzichte van de gestuurde gebieden, wat op zich logisch is omdat de beschikbare ruimte in de gestuurde gebieden over het algemeen veel groter is dan in de aangelegde gebieden. Het aantal eenheden in de gestuurde en natuurlijke gebieden zijn vergelijkbaar met elkaar. Daarbij is ook te concluderen dat hoe groter de ruimteschaal en hoe langer de tijdschaal, hoe vollediger het scala aan geomorfologische elementen is. Maar er is meer uit de analyse af te leiden. De meeste studiegebieden met 3 of minder geomorfologische eenheden hebben een ontwikkelingstijd van 10-30 jaar. Het betreft hier meestal strand of strandvlakte met embryonale duinen en een (oude) zeereep. Studiegebieden met 6 of meer eenheden hebben een ontwikkelingstijd van tenminste 50 jaar. Eenheden die er dan bijgekomen zijn, zijn over het algemeen geomorfologische eenheden die ontstaan vanuit embryonale duinen (sluftervormige situaties en (on)volledig afgesnoerde strandvlakte). Voor een kustduinlandschap met veel geomorfologische diversiteit is dus over het algemeen een ontwikkelingstijd van tenminste 50 jaar nodig. Er zijn echter uitzonderingen. Op het Noorderstrand op Schiermonnikoog bijvoorbeeld zijn in circa 30 jaar 7 verschillende geomorfologische eenheden ontstaan. Een belangrijke factor die hier de ontwikkeling kan hebben versneld is toestroming van zoet grondwater vanuit een groot duinmassief, waardoor er versnelde ontwikkeling mogelijk was van vegetatie op de strandvlakte en daarmee geomorfologische eenheden die samenhangen met vegetatie. De ontwikkeling van embryonale duinen kan heel snel gaan. Op de Zandmotor begonnen ze zich vanaf 2016 te ontwikkelen, dus 5 jaar na aanleg, en dan als eerste in de oksel aan de zuidkant, waar het strand door aanzanding sterk was verbreed. Uit de literatuur (Arens et al., 2010) is bekend dat als gevolg van de start van grootschalig suppleren in 2007 in veel kustvakken embryonale duinen aanwezig waren, waar ze in 1996 nog afwezig waren.

In de aangelegde gebieden zien we minder geomorfologische eenheden, maar de verklarende factor hiervoor is niet perse het feit dat de gebieden aangelegd zijn, maar is een combinatie van omvang (kleiner gebied – minder geomorfologische eenheden) en leeftijd (jonger gebied – minder geomorfologische eenheden). Figuur 10 lijkt te suggereren dat met aanleggen of sturen van processen een landschap zich kan ontwikkelen zoals ook in een natuurlijke ontwikkeling is te zien, maar de vergelijking tussen aangelegd, gestuurd en natuurlijk is moeilijk, omdat de puntenwolk zo diffuus is.

2.5 Habitattypen van het duin- en kustlandschap

2.5.1 Theoretische achtergrond vegetatieontwikkeling in het duin- en kustlandschap

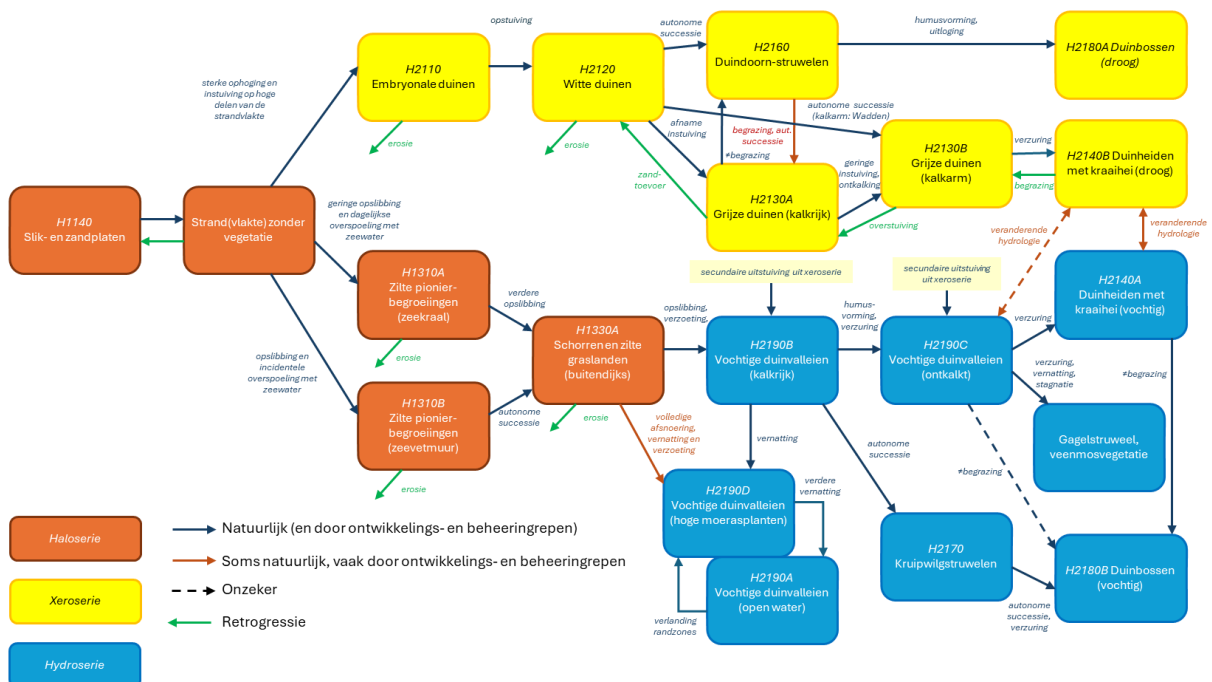
Op basis van kennis over vegetatie (Hennekens et al., 2025) is een algemeen schema van successie en retrogressie opgesteld (Figuur 11)⁴ met indicatie van de natuurlijke en antropogene processen die de ontwikkeling van vegetatie sturen. Dit is gedaan op het niveau van habitattypen en daardoor relatief op hoofdlijnen. Onderliggend aan de habitattypen zijn (vaak) meerdere vegetatietypen die nog een specifiek successiestadium vertegenwoordigen en daarmee een ontwikkeling binnen habitattypen. In de vegetatieontwikkeling in het duin- en kustlandschap kunnen drie karakteristieke successiepaden onderscheiden worden: de haloserie onder zoute condities, de xeroserie onder droge condities en de hydroserie voor grondwaterafhankelijke typen.

Een deel van de belangrijke sturende processen kennen – binnen Nederland – regionale verschillen. In het kalkarme Waddendistrict kan het habitatype H2130B (kalkarme grijze duinen) zich direct en relatief snel ontwikkelen uit witte duinen (habitatype H2120), terwijl in sterk kalkhoudende duinen van Holland (Rhenodunaal district) duindoornstruwelen (H2160) volgen op witte duinen, die pas na frequent beheer of na tientallen jaren autonoom overgaan in kalkrijke grijze duinen H2130A). Deze kunnen dan bij begrazing en enige kalkaanvoer zelfs het climax stadium vormen, en in ieder geval zeer lang standhouden. Ook de expositie (afhankelijk van de veel voorkomende windrichting bij hogere windsnelheden) is niet overal langs de kust gelijk waardoor bijvoorbeeld het bereik van zoutspray niet overal gelijk is bij gelijke (wind)condities.

Het schema geeft zowel successie weer -ontwikkeling naar vegetatie met een complexere structuur- als retrogressie -ontwikkeling naar kaal zand of vegetatie met een eenvoudiger structuur. Successie treedt op onder invloed van afnemende dynamiek en toenemende bodemvorming. Retrogressie treedt vooral op wanneer dynamische processen in latere stadia weer de overhand krijgen: door kustafslag en doorbraken van zee door een zeereep, bij het ontstaan van washovers of sterke (secundaire) verstuiving door natuurlijke of antropogene oorzaken. Maar ook biologische processen zoals af- en toename van populatie grazers in een gebied (konijnen of watervogels).

De invloed van hydro- en morfodynamiek van de zee speelt een belangrijke rol in de haloserie en deels nog in kalkrijke vochtige duinvalleien. De invloed bestaat uit periodieke overstroming met zeewater en als gevolg daarvan ook erosie en sedimentatie. De uitgangssituatie (en dan vooral de hoogte ten opzichte van GHW) is sterk bepalend voor de route van de vegetatieontwikkeling. Gedurende de successie neemt de invloed van de zee geleidelijk af. Pas wanneer deze invloed verdwijnt of gering wordt door verdere ophoging, isolatie van zeewater en/of toestroming van zoet grondwater kan de reeks zich ontwikkelen naar zoete, grondwaterafhankelijke vegetatie-eenheden van de hydroserie.

⁴ In de viewer is deze habitat successiereeks opgenomen als *visual*, waarmee is aangegeven of en in welke mate het habitatype in het studiegebied is gekarteerd in de t0 en t1 habitatkaarten. Daarbij merken we op dat de successie niet altijd precies volgens dit theoretisch/conceptuele schema verloopt in de praktijk.



Figuur 11. Schema van vegetatieontwikkeling in kust, zeereep en voorduingebieden. Vegetatie-eenheden zijn geclassificeerd op niveau van habitattypen met aanvulling van enkele eenheden waarvoor geen habitattypen zijn onderscheiden (strandvlakten, gageelstruwelen). In verband met de complexiteit zijn niet alle habitattypen van duin- en kustlandschap opgenomen. Bovenin het figuur wordt de relatieve invloed van belangrijke processen die de vegetatieontwikkeling beïnvloeden weergegeven. Dit schema is gebaseerd op de beschrijvingen van successierichtingen in de Vegetatie van Nederland (ontsloten in Hennekens et al., 2025), de profieldocumenten van de Natura2000 habitattypen, aangevuld met informatie uit literatuur en ervaringen van de auteurs. Het schema is niet uitputtend qua mogelijke ontwikkelingspaden (en richtingen) evenals qua habitattypen die in kustduinen voor kunnen komen.

Eolische dynamiek wordt van belang op stranden en strandvlakte die voldoende hoog liggen en zorgen voor successie naar zoete, droge vegetatie-eenheden van de xeroserie. Als gevolg van sedimentatie van zand door de wind, treedt ophoging van het maaiveld op. Door een lage grondwaterstand kan de bodemtoplaag snel verzoeten en daarmee de ontwikkeling van embryonale duinen en witte duinen in gang zetten.

Bodemvorming treedt op in zowel de halo-, hydro- als xeroserie. Daarbij spelen accumulatie van humus, ontkaalking en verzuring een rol. Humusaccumulatie verloopt in natte bodems doorgaans sneller dan in droge bodems. De bodemvormende processen hoeven echter niet synchroon te verlopen. Zo kan in een kalkrijke bodem humusvorming optreden zonder dat de bodemtoplaag snel ontkaalkt en verzuurd. In een bodem met weinig kalk zal tijdens de initiële opbouw van organisch stof al snel ontkaalking en verzuring gaan optreden. Het habitatype kalkrijke vochtige duinvalleien kan nog langdurig basenrijk blijven bij periodieke overstrooming met zeewater en toestrooming van zoet, calciumrijk grondwater. Wel of niet beweiden, betreden en maaien of de aanwezigheid van konijnenpopulaties zijn sleutelprocessen in successie naar struweel en bos.



Figuur 12. Mozaïek van verschillende habitattypen uit de xeroserie (witte duinen, duindoornstruweel) en de hydroserie (kalkrijke vochtige duinvalleien en duinvalleien met open water) in het aangelegde Spanjaardsduin (Foto: Martijn Antheunisse).

Het schema in Figuur 11 maakt duidelijk dat in kustsystemen de grootste diversiteit aan vegetatie optreedt bij een matige invloed van hydro- en morfodynamiek van zee en de ontwikkeling van natte delen met invloed van zoet grondwater: hier zijn de meeste habitattypen te vinden en dit zijn vaak ook nog habitattypen met per stuk meerdere kwalificerende vegetatietypen – die dus nog diverser zijn, zoals de groene stranden (onderdeel van habitatype H1330A). Dergelijke systemen hebben bovendien in de grondwaterafhankelijke delen gradiënten van zout naar zoet waardoor ook brakke ecosystemen voorkomen.

2.5.2 Aanpak verkenning habitattypen

Het aantal voorkomende habitattypen in een studiegebied is gebruikt als proxy om de compleetheid en daarmee de natuurwaarde van het duinecosysteem ter plekke te kunnen beoordelen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de t0 en t1 habitatkaarten (indien beschikbaar) die opgesteld zijn voor het evalueren van beheerplannen voor Natura 2000-gebieden waarbinnen de verschillende studiegebieden vallen. Deze habitatkaarten zijn digitaal toegankelijk via data-portals van BIJ12 en provincies (BIJ12, 2025).

Habitattypen zijn grote (vegetatiekundige) eenheden, waardoor detailinformatie over de specifieke natuurkwaliteit van een gebied niet te achterhalen is. Een analyse van vegetatiekarteringen in alle voorbeeldgebieden was niet mogelijk binnen de scope van dit project gezien de beperkte beschikbare tijd om vegetatiekarteringen bij elkaar te brengen en te analyseren op een niveau van associaties (plantengemeenschappen). Daarnaast ontbreken in de gebieden tussen duin en zee vaak vegetatiekarteringen die gemaakt zijn op basis van werkelijke veldinventarisatie. Deze zone wordt doorgaans op basis van luchtfoto's gekarteerd. Habitats van de zilte halosserie en zoete hydroserie zijn daarmee erg moeilijk te onderscheiden. Geautomatiseerde analyse van orthofoto's op vegetatiepatronen is ook niet mogelijk omdat er nog geen technieken bestaan die snel toepasbaar

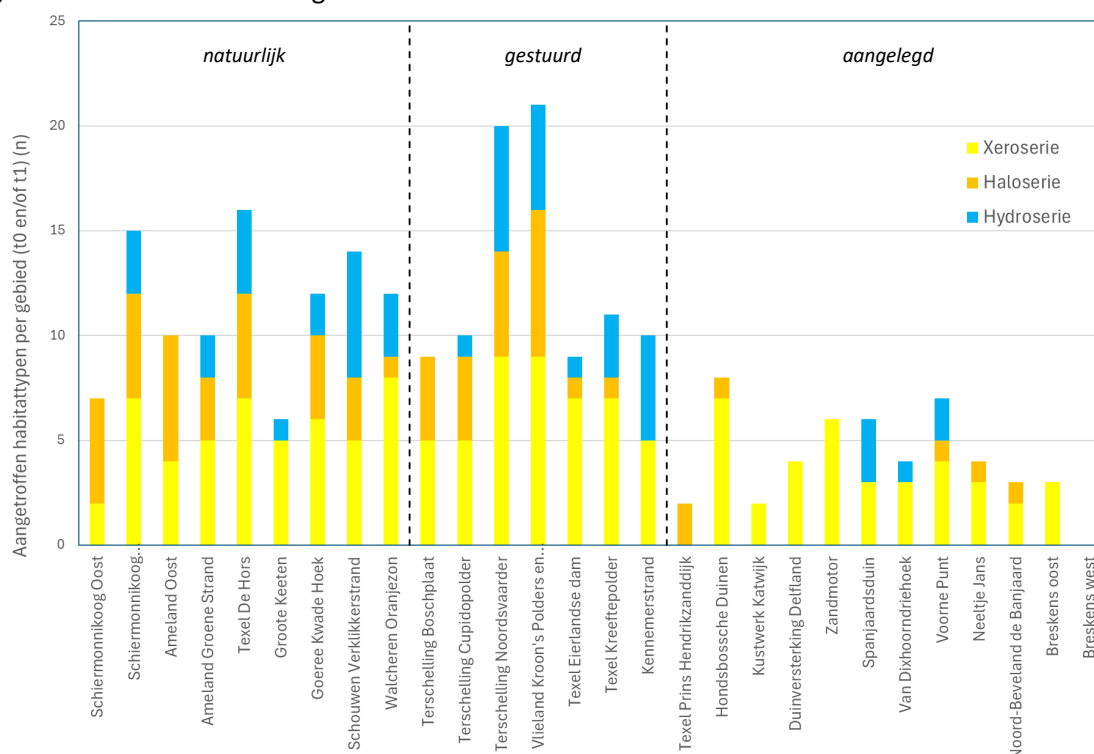
zijn. Hierdoor ontstaan er ook vertaalfouten van vegetatiekaarten naar habitattypen. Bij het raadplegen van habitatkaarten viel het bijvoorbeeld op dat het patroon van habitats in zilte natte pioniersbegroeiingen en beschutte kwelders (haloserie) veel artefacten bevat wanneer een overlay met luchtfoto's en hoogtedata wordt gedaan. Een eerste check was mogelijk door het vergelijken van habitatkaarten met luchtfoto's van hetzelfde jaar als de kartering.

Tevens is niet elk studiegebied onderdeel van een Natura 2000 gebied (waardoor habitatkaarten sowieso niet beschikbaar zijn), en in veel gevallen is slechts een t0 beschikbaar, die gebaseerd kan zijn op een vegetatiekartering van ruim 20 jaar oud. Waar beschikbaar, is ook gebruik gemaakt van t0+ inschatting zoals die de afgelopen jaren in natuurdoelanalyses (NDA) voor de verschillende Natura 2000-gebieden zijn opgesteld (bijvoorbeeld (Arcadis, 2021; Arcadis et al., 2022; Provincie Noord-Holland, 2025)). Uiteindelijk is op basis van alle bovenstaande en beschikbare informatie het aantal voorkomende habitattypen per gebied bepaald.

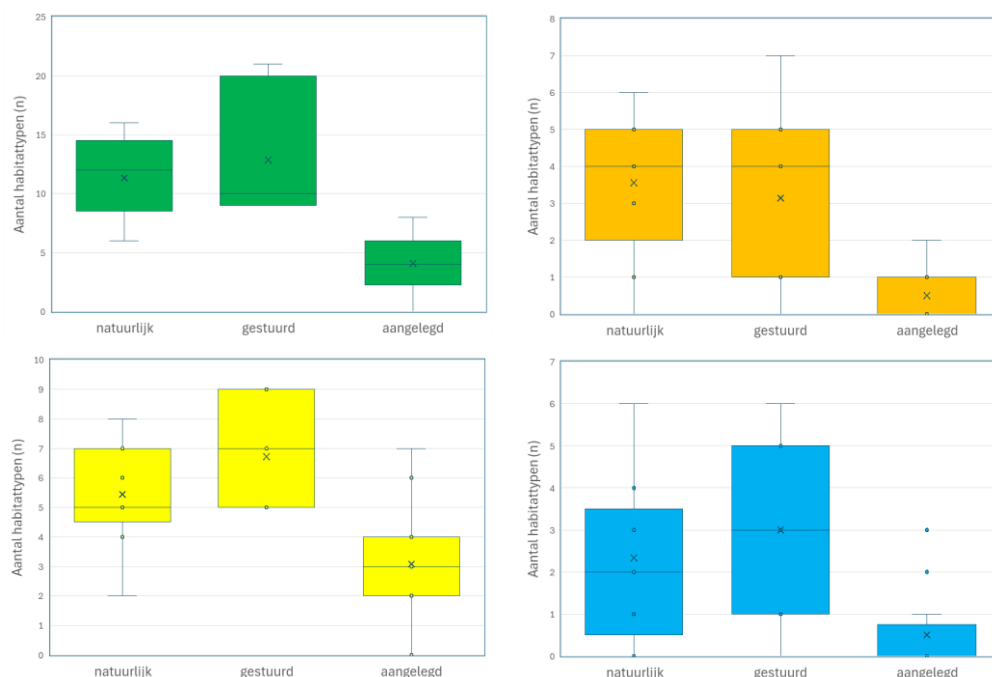
Al met al is de gebruikte methode een platte (generieke) manier om uitspraken te doen over natuurkwaliteit en biodiversiteit in de verschillende gebieden. Het is echter wel het beste wat voorhanden is, waarbij vooral de vergelijking tussen gebieden centraal staat; dat kan goed met deze methodiek, want elk gebied is op hetzelfde type gegevens gebaseerd.

2.5.3 Resultaten verkenning habitattypen

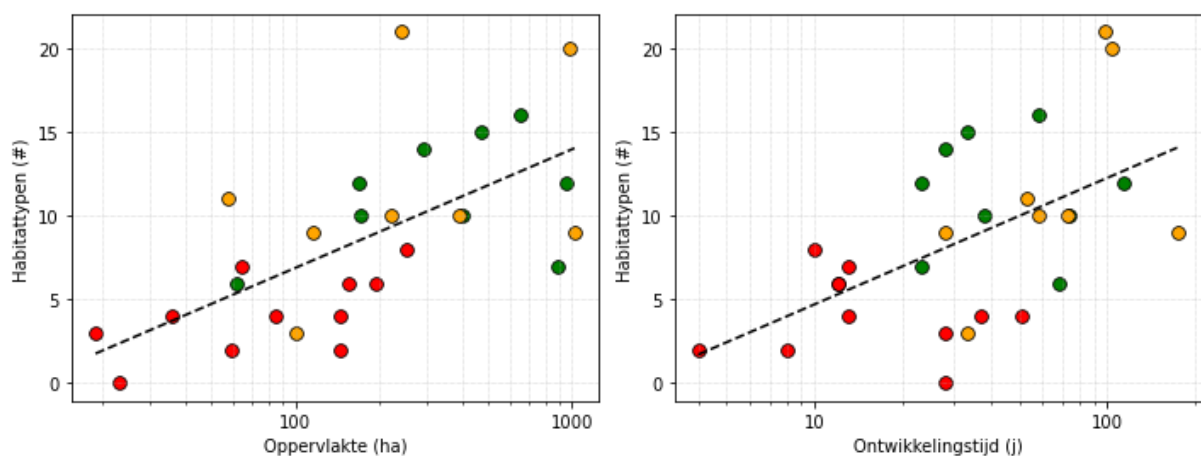
In Figuur 13 en Figuur 14 zijn de resultaten van de analyse van het voorkomen van habitats binnen de studiegebieden weergegeven, uitgesplitst naar habitattypen van halo-, xero- en hydroserie (Figuur 13), en in detail voor de verschillen tussen de natuurlijke, gestuurde en aangelegde gebieden (Figuur 14). Voor beide figuren is gebruik gemaakt van de gecombineerde gegevens van t0 en t1, voor het gebied Breskens West was geen informatie voorhanden.



Figuur 13. Aantal habitattypen per studiegebied op basis van gecombineerde habitatkaarten t0 en t1 (waar beschikbaar). Er zijn geen gegevens beschikbaar voor studiegebied Breskens west.



Figuur 14. Aantal waargenomen habitattypen uitgesplitst naar natuurlijke, gestuurde en aangelegde gebieden voor alle habitattypen (totaal) en per serie in box-whisker plots. NB. De verticale assen zijn niet gelijk.

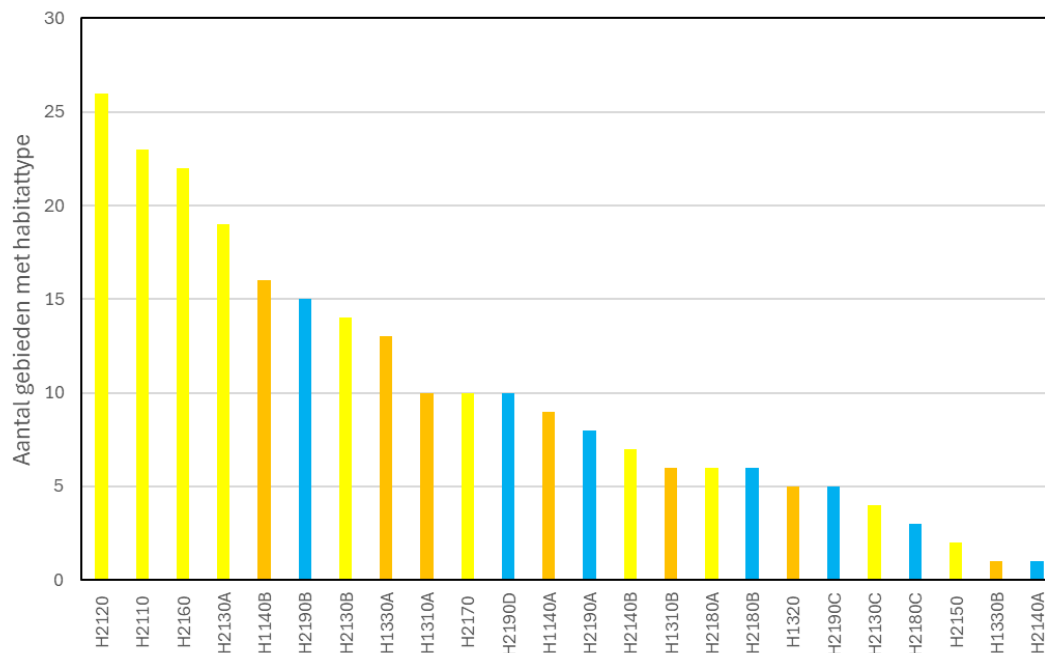


Figuur 15. Relatie tussen de gebiedsgrootte (links) en ouderdom (rechts) en het aantal habitattypen per studiegebied op basis van gecombineerde habitatkaarten t0 en t1 (waar beschikbaar). Er zijn geen gegevens beschikbaar voor studiegebied Breskens west. Zie tekst voor toelichting.

Er is een (sterk) significante positieve relatie tussen het aantal habitattypen per gebied en de ouderdom en de grootte (Figuur 15). Daarbij is er – aanvullend – een verschil in aantal habitattypen per gebiedstype wat betreft de ontwikkelingstijd: in aangelegde gebieden komen (bij vergelijkbare leeftijd) significant minder habitattypen voor dan in natuurlijke en gestuurde gebieden (Figuur 14).

In Figuur 15 rechts zijn vier aangelegde gebieden te zien met een ontwikkeltijd van 30-50 jaar, waarbij er minder dan 5 habitattypen worden waargenomen. Dit zijn de gebieden van Dixhoorndriehoek, Neeltje Jans, Breskens Oost en De Banjaard. In deze gebieden komt nagenoeg alleen de habitattypen van de xeroserie voor. Dit patroon hangt hoogstwaarschijnlijk samen met de

nauwe begrenzing van de gebieden. In de andere aangelegde gebieden speelt mogelijk de relatief jonge leeftijd van de gebieden ook een rol



Figuur 16. Aantal waarnemingen van habitattypen in de studiegebieden (max. 27, geen data van Breskens West). Geel: xeroserie, oranje: haloserie, blauw: hydroserie. Zie figuur 8 voor bijbehorende namen van de hier gebruikte codes van de habitattypen

In de studiegebieden zijn jonge habitattypen uit de xeroserie het meest algemeen (Figuur 16): embryonale duinen (H2120), witte duinen (H2120), duindoornstruwelen (H2160) en kalkrijke grijze duinen (H2130A). Oudere successiestadia (bostypen) en habitattypen van de hydroserie zijn veel minder aangetroffen in de studiegebieden

2.5.4 Conclusie verkenning habitattypen

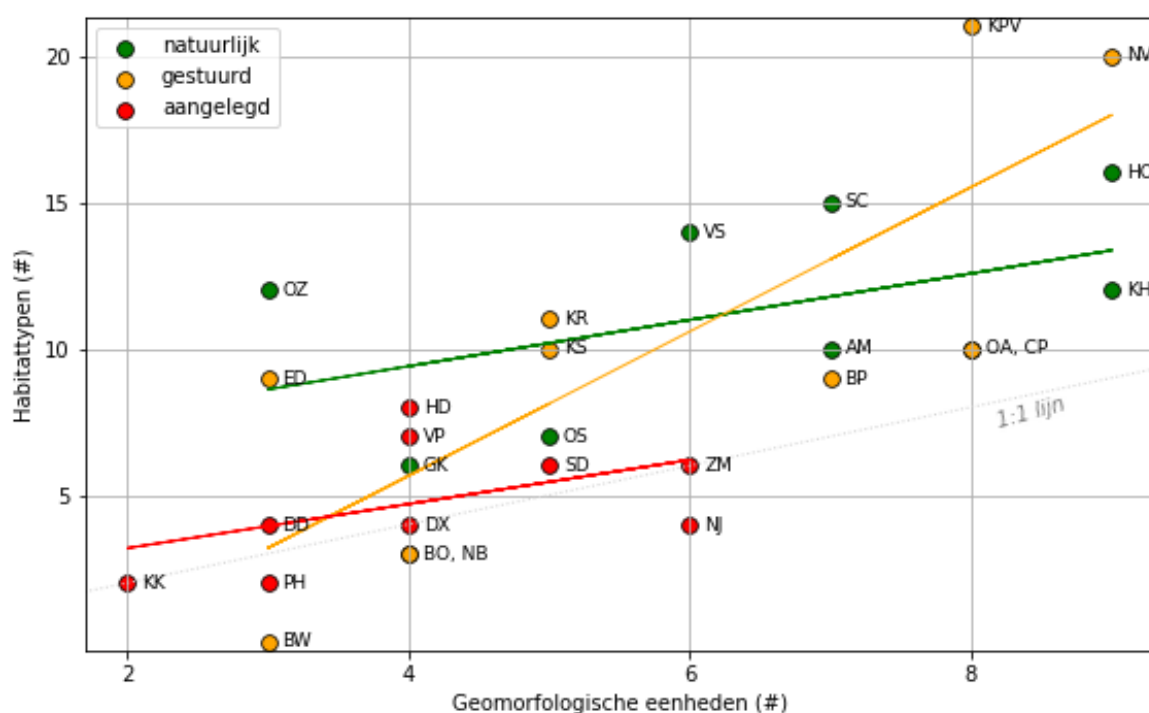
Op basis van de analyse kan geconcludeerd worden dat het aantal habitattypen in de aangelegde gebieden kleiner is ten opzichte van de gestuurde en natuurlijke gebieden, ook als rekening gehouden wordt dat de aangelegde gebieden gemiddeld jonger en kleiner zijn dan de natuurlijke en gestuurde gebieden. Het is (dus) niet alleen ruimte en tijd die de aanwezigheid van habitattypen bepalen, maar ook andere (kwaliteits)factoren. Het kan dan gaan om chemische en fysieke samenstelling van de bodem, ontbreken van de juiste hydrologische randvoorwaarden, maar bijvoorbeeld ook biologische interacties zoals het ontbreken van bronpopulaties van soorten die essentieel zijn voor de ontwikkeling en of het goed kwalificeren van habitattypen. Zonder aanvullende gegevens en onderzoek is het niet mogelijk aan te geven welke factor de grootste rol speelt. Mogelijk dat dit ook nog verschilt van gebied tot gebied.

Vier van de vijf meest diverse gebieden wat betreft aantal habitattypen zijn te vinden op de Waddeneilanden, dit kan niet alleen verklaard worden vanuit de aanwezigheid van veel (verschillende) geomorfologische eenheden: mogelijk dat de lagere (gebruiks)druk op de Waddeneilanden hier aan bijdraagt: minder recreatie, drinkwaterwinning, stikstofdepositie en/of mogelijk de relatief kalkarme condities. Hierbij speelt waarschijnlijk ook mee dat het omliggende landschap van de studiegebieden op de Waddeneilanden in veel gevallen eveneens Natura2000 gebied is met veel kwalificerende habitattypen.

De focus lijkt bij de aangelegde gebieden in het algemeen te zijn op de ontwikkeling van habitattypen uit de xeroserie. Dit kan samenhangen met de focus op kustverdediging (door duinen) in de aangelegde gebieden, waar habitattypen uit de xeroserie nu eenmaal beter bij passen dan bijvoorbeeld die uit de haloserie. Ook is in veel gevallen nog onvoldoende tijd verstreken om (hydrologische) gradiënten te ontwikkelen, waardoor habitattypen die zich pas later in de ontwikkelingsreeks kunnen vestigen er (nog) niet zijn.

2.6 Integratie verkenning geomorfologische eenheden en habitattypen

Deze paragraaf gaat in op de relatie tussen het aantal geomorfologische eenheden per gebied (en het aantal habitattypen (Figuur 17). Een regressieanalyse laat een significante positieve relatie zien tussen het aantal geomorfologische eenheden en het aantal habitattypen. Visueel lijkt er een verschil te zijn tussen de typen studiegebieden: de lineaire regressielijn ligt hoger (meer habitattypen per geomorfologische eenheid) voor de natuurlijke en gestuurde gebieden vergeleken met de aangelegde gebieden.



Figuur 17. Relatie tussen het aantal geomorfologische eenheden en het aantal aangetroffen habitattypen voor natuurlijke, gestuurde en aangelegde systemen.

Dit versterkt het beeld uit paragraaf 2.5.4 dat de ontwikkeling van natuurkwaliteit in de aangelegde gebieden achterblijft bij de morfologische condities (en ontwikkeling). In Tabel 3 is een overzicht opgenomen in welke geomorfologische eenheden de habitattypen van het kust- en duinlandschap voorkomen. Vooral groen strand en (deels) afgesnoerde strandvlaktes kunnen meerdere habitattypen van de halo- en hydroserie herbergen. Dergelijke eenheden zijn relatief zeldzaam in de aangelegde gebieden.

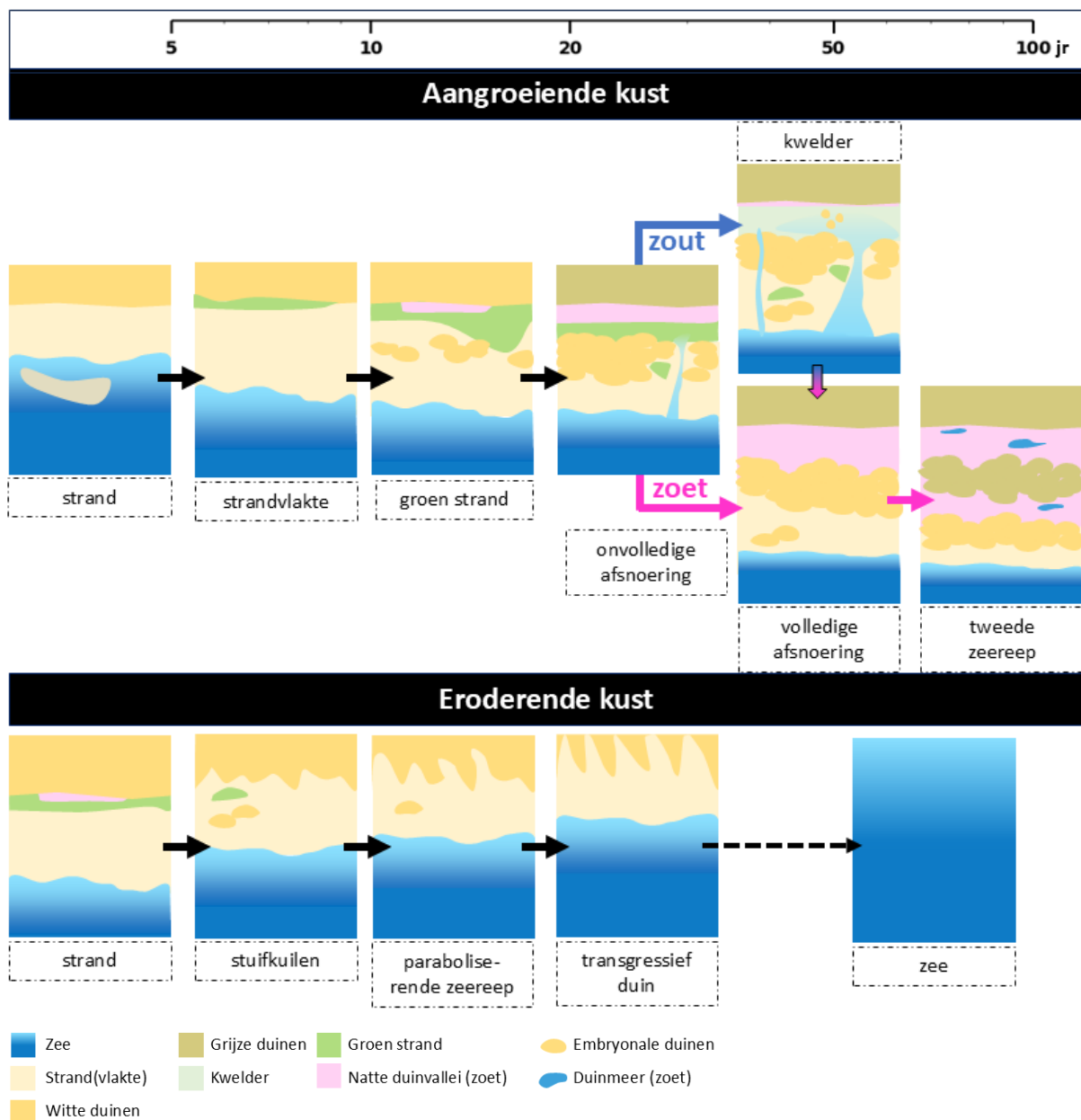
Tabel 3. Op basis van de informatie uit de studiegebieden, aangevuld met ervaring en kennis van de auteurs is een globale indeling gemaakt van habitattypen naar voorkomen in specifieke morfologische eenheden. Oranje: haloserie, geel: xeroserie en blauw hydroserie, grijs (kaal zand) komt in elke serie voor. De intensiteit van de kleur geeft de mate van voorkomen weer, donker: relatief veel, en licht: relatief weinig.

Geomorfologische eenheid:	strand	strandvlakte	groen strand	kwelder	washover	slufter/onvolledig afgesnoerde strandvlakte	volledig afgesnoerde strandvlakte	volledig bedijkte strandvlakte	zeereep	stuifdijk
Habitat(sub)type:										
kaal zand										
H1140A Slik- en zandplaten (getijdengebied)										
H1140B Slik- en zandplaten (Noordzee-kustzone)										
H1310A Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)										
H1310B Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)										
H1320 Slijkgrasvelden										
H1330A Schorren en zilte graslanden (buitendijks)										
H2110 Embryonale duinen										
H2120 Witte duinen										
H2130A Grijze duinen (kalkrijk)										
H2130B Grijze duinen (kalkarm)										
H2130C Grijze duinen (heischraal)										
H2140A Duinheiden met kraaihei (vochtig)										
H2140B Duinheiden met kraaihei (droog)										
H2150 Duinheiden met struikhei										
H2160 Duindoornstruwelen										
H2170 Kruipwilgstruwelen										
H2180B Duinbossen (vochtig)										
H2190A Vochtige duinvalleien (open water)										
H2190B Vochtige duinvalleien (kalkrijk)										
H2190C Vochtige duinvalleien (ontkalkt)										
H2190D Vochtige duinvalleien (hoge moerasplanten)										

3 Conceptuele ontwikkeling natuurlijke gebieden

In dit hoofdstuk schetsen we hoe een natuurlijke kustontwikkeling, zonder ingrepen, er globaal uit zou zien, voor een aangroeiende/gesuppleerde en een eroderende kust. De ontwikkelingen worden beschreven aan de hand van Figuur 18. We onderscheiden verschillende stadia die doorlopen zouden kunnen worden, waarbij het landschap steeds complexer en gevarieerder wordt en het aantal elementen toeneemt. De verschillende stadia hoeven niet per se doorlopen te worden, het systeem kan ook (langdurig) in hetzelfde stadium blijven.

De natuurlijke ontwikkeling gebruiken we in de analyse naar de ontwikkelingen in gestuurde en aangelegde gebieden als vergelijk/referentie.



Figuur 18. Schematische weergave van de natuurlijke kustontwikkeling van een strand, bij een aangroeiende (boven) en eroderende (onder) kust.

3.1 Aangroeiende kust

Figuur 18 (boven) schetst de ontwikkeling van een simpel systeem van strand en zeereep naar een complexer en vollediger landschap. Bij een aangroeiende en gesuppleerde kust (Figuur 18, boven) is de aanvoer van zand zo groot dat voor de zeereep een buffer van zand ontstaat, waardoor bij hoge stormvloed de zeereep zelf nauwelijks of niet wordt aangetast. Door de aangroei van het strand kan het zodanig verbreden dat er een strandvlakte ontstaat. Ontstaan van strandvlaktes is echter vaker gerelateerd aan de aanlanding van zandplaten.

De vegetatie-ontwikkeling op het strand of de hogere delen van strandvlakte begint vrijwel altijd met de ontwikkeling van embryonale duinen. In lage, natte, beschutte delen van strandvlakten treedt ontwikkeling op naar vegetatietypen van zoute/brakke milieus uit de haloserie zoals kweldervegetaties en vegetaties van groene stranden, zonder dat dit voorafgegaan wordt door embryonale duinvorming. Bij sterke instuiving kan hier een combinatie ontstaan van natte vegetatie en embryonale duinen. Overigens herbergen een strand of strandvlakte zonder vegetatie ook bijzondere natuurwaarden, zoals bijvoorbeeld de fauna van vloedmerken en broed- en voedselbiotoop voor vogels.

Door de groei van in eerste instantie biestarwegras en later helm verplaatst de duinvoet zich zeewaarts. Bij een strand is, door de beperkte ruimte, en daardoor een steilere helling tussen duinvoet en laagwaterlijn, de ontwikkeling van embryonale duinen meestal beperkt tot een zone direct voor of tegen de zeereep. Op een strandvlakte kunnen embryonale duinen uiteindelijk ook ver voor de bestaande zeereep ontstaan. Wanneer de nieuwe duintjes daar aan elkaar groeien kunnen er delen van strand/strandvlakte gedeeltelijk afgeschermd worden van de zee. We spreken dan van een onvolledig afgesnoerde strandvlakte, met een brakke en zoute vegetatieontwikkeling, ofwel een (primaire) duinvallei. Duintjes kunnen vervolgens aan elkaar groeien tot een gesloten duinenrij, de afsnoering wordt compleet. De afgesnoerde vallei is dan niet meer bereikbaar voor de zee, het systeem verzoet, met bijbehorende diversificatie in vegetatieontwikkeling. In alle aangroeisituaties die we op dit moment langs de kust kennen is de aanvoer zodanig dat de vegetatie de overstuiving steeds bij kan houden. Er is sprake van een “milde” dynamiek. De nieuw ontstane duinen en duinenrijen vangen het zand voor de oorspronkelijke zeereep weg, waardoor hier de successie op gang kan komen. Theoretisch zouden de witte duinen dan kunnen transformeren naar grijze duinen, via een struweel-(duindoorn)fase, maar wat op dit moment vooral speelt is dat de witte duinen verstarren en verruigen deels door gebrek aan (natuurlijke) begrazing en overschrijding van kritische stikstofdepositie. Er vindt op korte termijn geen doorontwikkeling plaats naar de soortenrijke duingraslanden kenmerkend voor grijze duinen.

Over het algemeen leidt vergrote zandaanvoer tot kustuitbouw en dus duinontwikkeling vóór de oude zeereep. Theoretisch is het echter ook mogelijk dat de zandaanvoer zo groot wordt dat vegetatie totaal begraven wordt en niet in staat is de bedekking bij te houden. Hierdoor zou de vegetatie op de zeereep geleidelijk aan verdwijnen, waardoor de doorvoer van zand naar achter vergroot. Ook zouden dan transgressieve duinen kunnen ontstaan.

Aangroeiende kusten zijn te vinden op Schiermonnikoog, west-Terschelling, de Hors op Texel, ten noorden en zuiden van de pier bij IJmuiden (dan gestuurd door aanleg van de pier), de Kwade Hoek op Goeree, op het Verklikkerstrand op Schouwen en bij Oranjezon op Walcheren. Op de Waddeneilanden zijn meer duinvormen te vinden die tot de aangroeikust kunnen worden gerekend. Aan de oostkant van de eilandkernen, vóór de overgang naar de staart met kwelders en washovers, zijn vaak duinbogen te vinden (Samenwerkingsverband Het Tij Geleerd, 2008). Op de oostelijke punten kunnen de zeldzame oogduinen ontstaan (zie bijvoorbeeld Klijn, 1981). Op de staarten van de eilanden is het bovendien mogelijk dat kenmerken van de afslagkust, in de hoefijzervormige complexen die hieronder worden genoemd, samengaan met kenmerken van de aangroeikust, zoals

uitgestrekte embryonale duinvelden, die voor de hoefijzervormige complexen ontwikkelen. De oostelijke kanten van Ameland en Schiermonnikoog geven hier bijzonder goed ontwikkelde voorbeelden van. Overigens zien we bij duinontwikkeling op de Waddeneilanden, waarbij de duinvoet in zeewaartse richting beweegt, dat het zand blijkbaar afkomstig is van een eroderende onderwateroever. De laagwaterlijn beweegt dan landwaarts, de duinvoet zeewaarts, wat beide tot een versmalling van het strand leidt.

Tabel 4. Inschatting van tijdsschalen nodig voor progressie in natuurlijke ontwikkeling bij een aangroeiende kust. Id = idem. De fase staat gelijk aan de fases in Figuur 18, de letter staat voor aparte paden, met hierin verschillende momenten in de ontwikkeling.

Fase	Ontwikkelingstijd	Geomorfologische elementen	Milieu	Habitats
0	0-5 jaar	strandvlakte	zout	kale bodem
1a	5-15 jaar	Idem+groen strand	zout-brak-zoet	kale bodem, H1310, H1330, H2190B
1b1	5-25 jaar	Idem+embryonale duinen	zout+zoet	kale bodem, H1310, H1330, H2110, H2120
1b2	15 - 50	Idem+zeereep	zout+zoet	kale bodem, H1310, H1330, H2110, H2120, H2160
2	10-25 jaar	onvolledig afgesnoerde valleien	zout+zoet+brakke zones	H1310, H1330, H2190B
3a	20-50 jaar	volledig afgesnoerde strandvlakte	zoet	H2140A, H2170, H2190B
3b1	20-50 jaar	Idem+kwelder overwash	zout+zoet+brakke zones	kale bodem, H1140, H1310
3b2	25-50 jaar	oogduinen	zout+zoet+brakke zones	H2130, H2140, H2150, H2160, H2190B?
4	10-100	langdurig afgesnoerde strandvlakte, duinvallei	zoet	H2140A, H2170, H2180, H2190BC

3.2 Eroderende kust

Bij een eroderende kust (Figuur 18, onder en Tabel 5) wordt de zeereep regelmatig aangetast door erosie, waardoor het zand in de zeereep kan remobiliseren (secundaire verstuiwing). Door de permanente aantasting komen embryonale duinen niet voor, of slechts kortdurend. Door remobilisatie kan zoveel zand vrijkomen dat de overstuiving van de zeereep en achterliggende duinen extreem kan zijn en oudere grijze duinen 'terug' gaan naar witte duinen. Hierbij kunnen zelfs transgressieve duinen ontstaan die landwaarts kunnen gaan bewegen (zie bijvoorbeeld van Dieren, 1934; Beekman, 2007). De mate van mobilisatie is verder afhankelijk van lokale factoren, bijvoorbeeld kalkgehalte en mineraalinhoud van het zand. In (extreem) arm zand slaat de vegetatie moeilijker aan. Hierdoor zijn bijvoorbeeld verstuiwingen op Terschelling, Vlieland en in de Schoorlse duinen in het verleden veel extremer geweest dan op andere plaatsen (zie bijvoorbeeld van Dieren, 1934; Klijn, 1981).

Wanneer zich in de zeereep voldoende zand bevindt, zorgt de door afslag opgewekte overstuiving ervoor dat de top landwaarts verschuift, maar ook steeds hoger wordt. De hoogste zeerepen vindt men doorgaans aan een afslagkust. Het is niet duidelijk of er een maximale hoogte is. Hoe hoger de zeereep wordt, hoe sterker de versnelling van de wind rondom de bovenkant van de helling en top wordt, waardoor de kans op winderosie vergroot wordt, zeker omdat bij een afslagkust de voorkant van de zeereep grotendeels kaal is. Het zou kunnen dat door dit mechanisme een maximale hoogte geldt, maar dit is onduidelijk en voor de Nederlandse situatie nooit aangetoond. Door winderosie kunnen stuifkuilen en kerven ontstaan. Bij voortdurende uitstuiving kan het grondvlak van stuifkuil of

kerf zover worden uitgeblazen dat een secundaire duinvallei ontstaat. Dit is een mogelijk mechanisme voor het ontstaan van nieuwe duinvalleien (verjonging bij een afslagkust).

Er zijn hypothesen die veronderstellen dat het ontstaan van paraboolduinen begint bij een erosieve kust met de ontwikkeling van kerven in de zeereep (de paraboliserende zeereep). Bij een actieve parabolisering ontstaan steeds nieuwe paraboolduinen die landwaarts bewegen (ook behorend tot de witte duinen), en bijbehorende uitblazingsvalleien (duinvalleien). Parabolen in verschillende vormen en maten zijn in bijna alle kustvakken terug te vinden. Afhankelijk van de hoogte van de afslagkust en de expositie ontvangt een grotere of kleinere zone achter de zeereep een lichtere vorm van overstuiving. Dit is de zone van de grijze duinen. Waar de overstuiving nog te groot is zullen witte duinen in stand worden gehouden, waar de overstuiving te klein wordt kan door successie het grijze duin overgaan in een ander type. Overstuiving van achter de zeereep gelegen duinvalleien kan positief zijn (kalkaanvoer, gaat verzuring tegen, enige verhoging voorkomt verdrinken bij een stijgende zeespiegel), maar ook negatief (te grote ophoging van de bodem waardoor deze buiten bereik van het grondwater komt, of planten verstikt worden). Bij de ontwikkeling van duinvalleien is verder van belang of het grondwater kalkrijk is (zoals langs de Hollandse kust) of zuur (op andere plaatsen).

Van oudsher waren afslagkliffen te vinden op midden-Ameland, oost-Vlieland, Texel, langs delen van de kust van Noord-Holland en aan de koppen van de Zeeuwse en Zuid-Hollandse eilanden. Door suppleties is het aandeel kust met afslagklif sterk afgenomen. Vanzelfsprekend neemt het belang na een grote stormvloed weer toe, maar dit is dan een tijdelijk verschijnsel. Bijzondere vormen van de afslagkust vinden we op de oostelijke staarten van de Waddeneilanden, waar duinvorming en afslag interfereren met washoverprocessen. Hierdoor ontstaan hoefijzervormige complexen met een specifieke dynamiek (zie Samenwerkingsverband Het Tij Geleerd, 2008).

Tabel 5. Inschatting van tijdsschalen nodig voor progressie in natuurlijke ontwikkeling bij een eroderende kust zonder suppleties.. De fase staat gelijk aan de fases in Figuur 18. De ontwikkelingstijd is sterk afhankelijk van de mate van afslag, die weer afhankelijk is van onder meer zeespiegelstijging.

Fase	Ontwikkelingstijd	Geomorfologische elementen	Milieu	Habitats
0	0 jaar	strand	zout	kale bodem
1	0-5 jaar	idem+afslag klif	zout+zoet	kale bodem, (2110), H2120, H2130
2	5-15 jaar	idem+stuifkuilen	zout+zoet	kale bodem, H2120, H2130, H2160
3	15 – 50 jaar	idem+paraboliserende zeereep	zout+zoet	kale bodem, H2120, H2130, H2160
4	25-100 jaar	transgressief duinenveld	zout+zoet	kaal zand, H2120

4 Nadere analyse van studiegebieden

In dit hoofdstuk gaan we nader in op de ontwikkelingsrichting van de verschillende typen van zeewaartse kustuitbreiding. Uit de inventarisatie van de studiegebieden van Hoofdstuk 2 blijkt dat in de aangelegde gebieden minder geomorfologische eenheden en minder habitattypen aangetroffen worden dan in gebieden met een natuurlijke en gestuurde ontwikkeling. In dit hoofdstuk analyseren we daarom de gestuurde en aangelegde gebieden nader. Het doel is om beter te begrijpen hoe de geomorfologie en ecologie zich in deze gebieden ontwikkelen, waarin deze afwijken van een natuurlijke ontwikkeling, en oorzaken en factoren te vinden die hieraan ten grondslag liggen. Om hier vervolgens lessen uit te trekken voor aanleg van toekomstige gebieden.

Voor een aantal gebieden zijn factsheets opgesteld (Appendix C), met de kenmerken van het gebied, aanlegdoelstellingen, ecologische en geomorfologische ontwikkeling en een vooruitblik. Er is daarbij onderscheid gemaakt in studiegebieden met een strandvlakte (paragraaf 4.1), hetzij direct aangelegd, hetzij indirect met een strekdam, al dan niet met stuifdijken, en studiegebieden waar een duin of duinlandschap is aangelegd (paragraaf 4.2). Elke paragraaf begint met een schematische weergave van de ontwikkeling, waarbij de studiegebieden in het schema van ontwikkeling uit Hoofdstuk 3 zijn geplaatst. In de deelparagrafen wordt de ontwikkeling aan de hand van voorbeelden uit de studiegebieden nader beschreven. Tabel 6 geeft een overzicht van de studiegebieden die in dit hoofdstuk worden beschouwd.

Tabel 6. Overzicht van aangelegde en gestuurde studiegebieden die in dit hoofdstuk worden beschouwd

Strandvlakte			Duin	
Aangelegde Strandvlakte	Indirect (strekdam)	Indirect (stuifdijk)	Aangelegd duin	Aangelegd duinlandschap
De Zandmotor	Texel Eierlandse Dam	Noordsvaarder	Kustwerk Katwijk	Spanjaardsduin
	Kennemerstrand	Boschplaat	Punt van Voorne	Hondsbossche duinen
			Oude en nieuwe duinversterking Delfland	Van Dixhoornriedhoeke
				Neeltje Jans
				De Banjaard
				Prins Hendrik Zanddijk

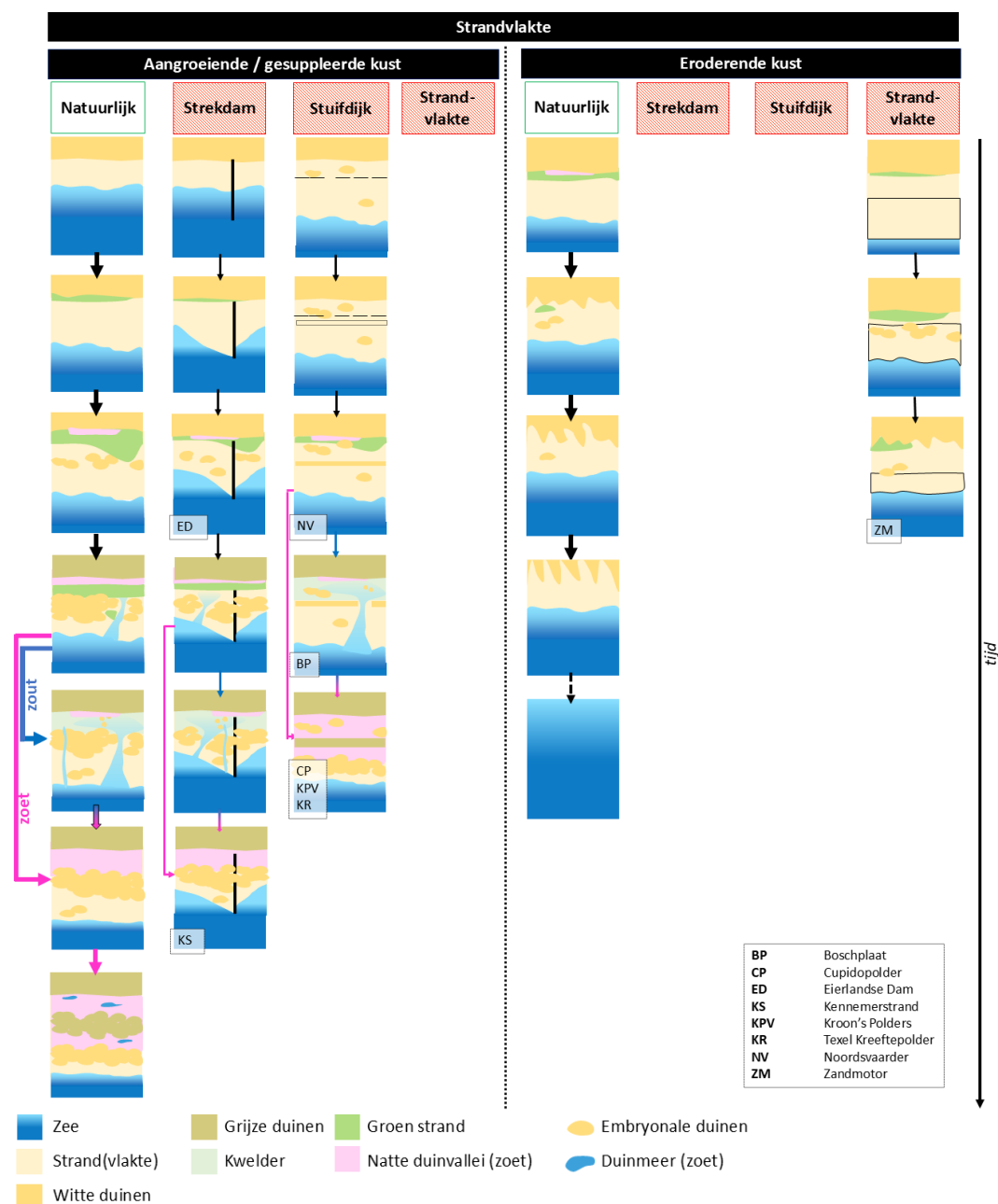
4.1 Directe of indirecte aanleg van een strandvlakte

Het aanleggen van een strandvlakte levert direct een flinke ruimtewinst voor een nieuw kust- en duingebied. De strandvlakte kan tijdelijk zijn, als er geen onderhoud plaatsvindt, waardoor de strandvlakte erodeert, en langzaam maar zeker in breedte afneemt. Het enige voorbeeld van een direct aangelegde strandvlakte dat we langs de Nederlandse kust hebben is de Zandmotor.

Daarnaast zijn er voorbeelden waarbij een strandvlakte is ontstaan door de aanleg van een strekdam. Voorbeelden zijn de strandvlaktes die zijn ontstaan bij de Eierlandse dam en het Kennemerstrand. In dit onderzoek beschouwen we dit als indirect aangelegde strandvlaktes. Omdat de strekdammen onderhouden worden, is de bijbehorende strandvlakte permanent.

Onder de juiste randvoorwaarden biedt de strandvlakte kansen voor duinontwikkeling met, afhankelijk van de ontwikkelingstijd, een flink scala aan milieuomstandigheden en habitattypen, variërend van droog tot nat en van zout tot zoet. Uitgangspunt is dat de ontwikkeling van nieuwe elementen op de strandvlakte vergelijkbaar is met de ontwikkeling op natuurlijke strandvlaktes, mits

de strandvlakte op de juiste wijze is aangelegd⁵ en de randvoorwaarden vergelijkbaar zijn met natuurlijke situaties. Natuurlijke strandvlaktes langs de kust kunnen als voorbeeld dienen voor aanleg. In een natuurlijk verloop, met een in de tijd voortschrijdende successie, onderscheiden we in de ontwikkeling van de strandvlakte, bij een erosieve of een aangroeiende kust, verschillende fases. De ontwikkelingsrichtingen van de zeewaartse oplossingen met direct of indirect aangelegde strandvlakte zijn visueel verbeeld in Figuur 19. Paragraaf 4.1.1 tot en met 4.1.3 geven een toelichting op in Figuur 19 aan de hand van de studiegebieden.



Figuur 19. Ontwikkelingsschema voor gebieden met een aangelegde/gestuurde strandvlakte of stuifdijken. Onderscheidt wordt gemaakt tussen een aangroeiende/gesuppleerde en eroderende kust. De natuurlijke ontwikkeling is weergegeven als referentie.

⁵ Bij de beantwoording van de kennisvragen komen we uitgebreider terug op wat 'juiste wijze van aangelegd' betekent.

4.1.1 Direct aangelegde strandvlakte

Het enige voorbeeld in Nederland van een direct aangelegde strandvlakte is de Zandmotor. De Zandmotor is aangelegd langs een van origine erosieve kust, die door middel van regelmatige suppleties op zijn plaats wordt gehouden. De Zandmotor zelf wordt niet onderhouden, de kustlijn langs de Zandmotor is dus erosief. De Zandmotor is tijdelijk, en dat geldt ook voor alle natuur die op de Zandmotor ontstaat. Het centrale deel van de Zandmotor is hoog aangelegd, tot 7m+NAP. Dit betekent dat dit deel ver boven het niveau van stormvloed ligt, en dus buiten het bereik van golven is. Het oppervlak wordt daardoor niet regelmatig bewerkt, fijn zand stuift eruit en de grovere delen, met name schelpen, blijven achter. Dit leidt tot een schelpenvloertje (Figuur 20) en het stoppen van verstuiwing uit het oppervlak. In dit deel van de Zandmotor fungeert alleen het intergetijdengebied als bron voor verstuiwing. Aan de zuidkant, in de oksel van de Zandmotor, is veel zand gesedimenteerd, waardoor de strandvlakte is uitgebreid, met een oppervlak dat is opgebouwd uit natuurlijk gesorteerd zand en een natuurlijke hoogte (2 tot 2,5m+NAP). De vorming van embryonale duinen is op dit deel het eerst op gang gekomen, rond 2016. Van hieruit is de vorming van embryonale duinen naar het noorden uitgebreid. Een belangrijk knelpunt bij de ontwikkeling van embryonale duinen is dat er veel met terreinwagens gereden wordt, waardoor de begrenzing van de embryoduinenvelden deels ingekaderd is door rijsporen. Hierdoor is de verbinding tussen embryoduinenveld en de aanstuivende zeereep (nieuwe duinversterking) verbroken. Op de Zandmotor is een strandmeer aangelegd. Dit stuift langzaam maar zeker vol zand, dit zand kan de achterliggende zeereep niet bereiken. Mogelijk ontstaat er op een gegeven moment een vallei-achtige vorm waarin een zoute vegetatie tot ontwikkeling kan komen.



Figuur 20. Voorbeeld van een schelpenvloertje (Spanjaardsduin) door aanleg met schelprijk sediment en selectieve winderosie (foto: Sjoukje de Lange)

In het ontwikkelingsschema in Figuur 19 staat de Zandmotor uiterst rechts, bij de eroderende kust. De Zandmotor doorloopt verschillende fases. Het begint met de aanleg van een kale strandvlakte, jaar 0. Door erosie neemt het oppervlak vanaf het begin af. Ondertussen ontstaan er na verloop van tijd, jaar 5, aan de landwaartse kant embryonale duinen, die in oppervlak uitbreiden naar het noorden en in zeewaartse richting. Kleine duintjes worden groter, groeien aan elkaar en er ontstaan grotere duincomplexen. Dit is globaal de huidige fase, jaar 14. Op een gegeven moment zal de erosie

zover voortgeschreden zijn, schatting: tussen jaar 15 en 18, dat de embryonale duinen, dan inmiddels uitgegroeid tot flinke duincomplexen, mogelijk met hier en daar onvolledige of volledige afsnoering, ook gaan eroderen. De duinontwikkeling zal hierbij veranderen, er zullen secundaire verstuiwingen ontstaan, een deel van het zand dat uit de embryonale duinen erodeert zal landwaarts stuiven, mogelijk ontstaan er transgressieve duinen. Naarmate de erosie voortschrijdt zal de kustlijn steeds dichterbij de oorspronkelijke kustlijn komen te liggen, op een gegeven moment zal er geen sprake meer zijn van een strandvlakte, maar van een breed strand (jaar 30?). Dit proces zet door totdat de Zandmotor geheel is weg geërodeerd (jaar 50?). De overgang tussen de verschillende fases is geleidelijk.

4.1.2 Indirect aangelegde strandvlakte

Een strandvlakte kan ook indirect worden aangelegd door aanleg van een pier of dam, zoals bij de Eierlandse Dam en het Kennemerstrand. Door de verlenging van de pier bij IJmuiden in 1965 is het Kennemerstrand, aan de zuidkant van de pier, verbreed tot een strandvlakte. Aan de noordkant van het gebied is rond 1990 het Kennemermeer gegraven en is aan de zeewaartse kant een duinenrij aangelegd. De ontwikkeling hier wordt sterk beïnvloed door zeer intensieve recreatie. Aan de zuidkant zijn door spontane ontwikkeling vanaf circa 1996 embryonale duinen ontstaan. Rond 2000 groeiden embryonale duinen aaneen tot een duinenrij, waardoor een deel van het strand werd afgesnoerd. In 2003 was deze onvolledige afsnoering al grotendeels begroeid. Door de grote kweldruk vanuit het achterliggende duinmassief stond een deel van de vallei onder invloed van water. Rond 2010 was de afsnoering compleet en ontstond ten noorden een volgende, maar veel kleinere afsnoering, die aanvankelijk volstootte, maar rond 2021 weer uitstootte tot op het oorspronkelijke strandniveau. Tot op heden is deze vallei kaal en nog steeds niet volledig afgesnoerd, vermoedelijk mede doordat er een pad in uitkomt dat doorloopt naar het strand. Het valleiooppervlak wordt kleiner doordat de embryonale duinen aan de zeewaartse zijde groeien.

De aanleg van de Eierlandse Dam op Texel in 1995 zorgde voor een vergelijkbare opbouw van een strandvlakte. Verrassend genoeg verbreedde het strand zowel aan de zuid- als aan de noordkant van de dam, waardoor er één grote strandvlakte is ontstaan. Er is een hoogteverschil tussen het strand ten noorden en ten zuiden van de dam, het noordelijk deel ligt lager. De recreatiedruk is hier ook groter, en er zijn dan ook tot op heden geen embryonale duinen op de strandvlakte aangetroffen, alleen direct tegen de duinvoet. Aan de zuidkant ontstonden de eerste embryonale duinen rondom 2001, tegen een zeereep die op dat moment dichtgezet was met stuifschermen. Vanaf 2005 strekte de strook embryonale duinen zich uit langs de gehele zeereep, tot aan de strekdam. Vanaf 2011 begon de strook zich uit te breiden in zeewaartse richting. Rond 2012 ontstond er een nieuwe zone met embryonale duinen enkele tientallen meters voor de zeereep. De duintjes groeiden uit tot een complex dat nu tot de strekdam reikt en dat een deel van het strand gedeeltelijk heeft afgesnoerd. Hier is nog geen sprake van vegetatieontwikkeling, anders dan in de embryonale duinen.

In het ontwikkelingsschema in Figuur 19 staat de ontwikkeling van een strandvlakte onder invloed van een strekdam links onder aangroeiende/gesuppleerde kust. Door het onderhoud van de dammen kunnen de strandvlaktes als permanent beschouwd worden. In feite is door de aanleg de kust aangroeiend geworden. Als we de aanleg van de strekdam, respectievelijk verlenging van de pier als jaar 0 beschouwen, zien we dat aan de zuidkant van het Kennemerstrand rond jaar 30 embryonale duinen ontstaan, terwijl dit bij Eierland al in jaar 6 begint tegen de zeereep, in jaar 17 op de strandvlakte. In beide gevallen is sprake van afsnoering. Bij het Kennemerstrand begint de afsnoering kort na de start van de ontwikkeling van embryonale duinen, in jaar 35 is er sprake van een duinenrij, in jaar 38 is de afgesnoerde vallei al begroeid en in jaar 45 is de afsnoering compleet. Bij Eierland kunnen we vanaf jaar 25 spreken van een onvolledig afgesnoerde situatie.

4.1.3 Ontwikkeling strandvlakte na aanleg stuifdijken

De ontwikkeling van duinen op een strandvlakte kan versneld en uitgebreid worden door de aanleg van stuifdijken. Het ontwikkelingsschema voor stuifdijken is weergegeven in Figuur 19. Met de aanleg van een stuifdijk kan in korte tijd een (groot) deel van de strandvlakte geheel of gedeeltelijk worden afgesnoerd. Stuifdijken voor “landaanwinning” zijn vooral toegepast op de Waddeneilanden. Elders zijn ze vooral toegepast om het volume van de zeereep te vergroten, of als buffer tegen afslag. Veel zeerepen langs de Nederlandse kust zullen een oorsprong als stuifdijk hebben. We beschouwen hier alleen stuifdijken die op strandvlaktes zijn toegepast. Enkele voorbeelden van stuifdijkaanleg zijn:

- de aanleg van een stuifdijk tussen paal 7 en 10 op Schiermonnikoog (rond 1960), waardoor het gebied ten noorden van de kobbeduinen grotendeels werd afgesloten van de invloed van de Noordzee
- de afsnoering bij de Lange Duinen op Ameland (rond 1970)
- de ontwikkeling van de Boschplaat op Terschelling na aanleg van de grote stuifdijk (rond 1950)
- op kleinere schaal de ontwikkeling van de Cupidopolder bij de Boschplaat (rond 1986?)
- de ontwikkeling van de Noordsvaarder op Terschelling (rond 1960)
- het ontstaan van de Kroon's Polders op Vlieland (1925 en 1940-1950)
- de vorming van de Horsmeertjes op Texel (rond 1960)
- op kleinere schaal de afsnoering van de Kreeftepolder op de Hors op Texel (tussen 1980 en 1990)
- gedeeltelijk afgesnoerde valleien op de Kwade Hoek op Goeree (tussen 1950 en 1960)

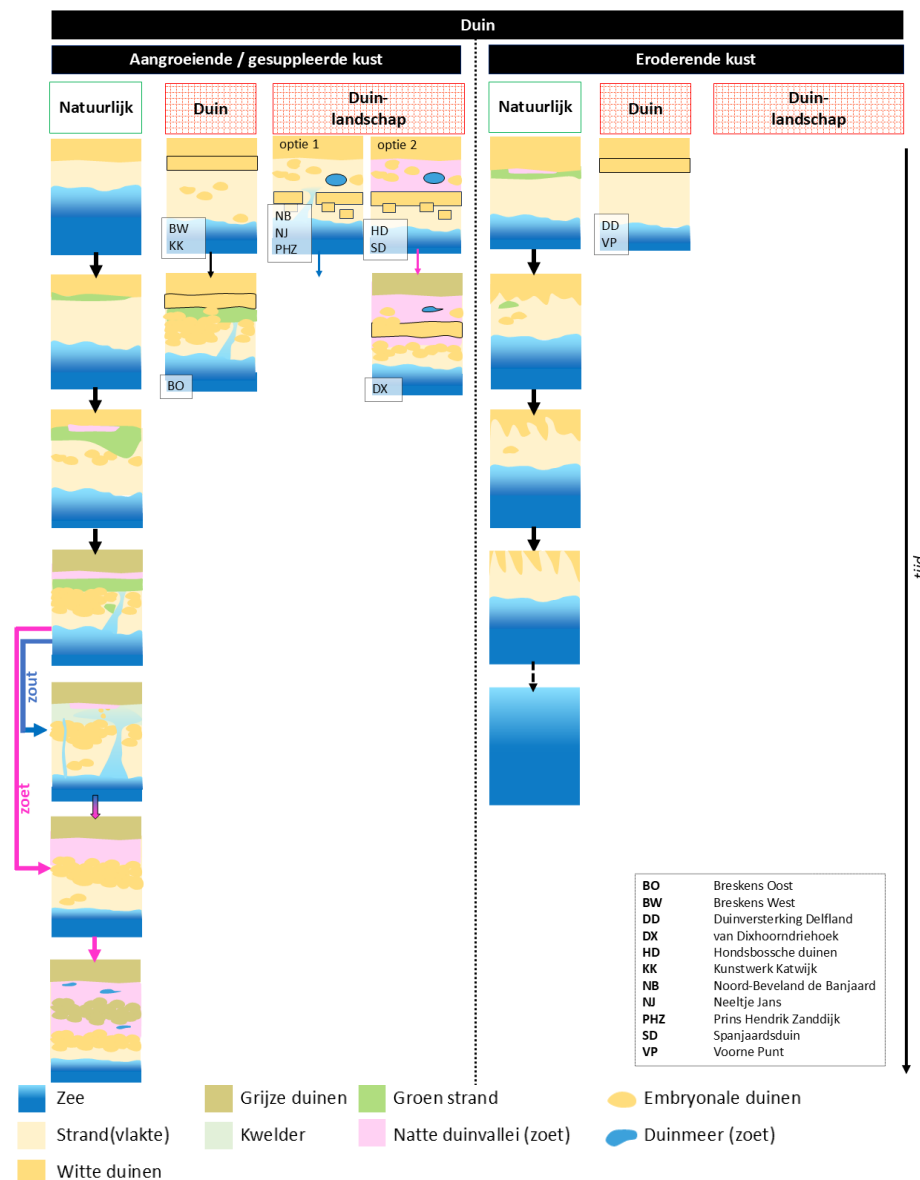
Door de versnelde afsnoering kan het voorkomen dat de maaiveldhoogte van de afgesnoerde strandvlakte niet verder toeneemt, omdat er geen zand meer opstuift. In vergelijking tot natuurlijke afgesnoerde valleien is de hoogte dan relatief laag. In combinatie met kweldruk vanuit het achterland kan het dan gebeuren dat de afgesnoerde strandvlakte onder water komt te staan, zoals bij de Horsmeertjes is gebeurd. Met de aanleg van stuifdijken is de ontwikkeling van grote gebieden vaak versneld. Dit heeft vaak hoge natuurwaarden opgeleverd, maar het is natuurlijk de vraag hoe de gebieden zich ontwikkeld zouden hebben wanneer geen stuifdijk zou zijn aangelegd. Van de kwelder bij de Kobbeduinen op Schiermonnikoog is bijvoorbeeld bekend dat de successie na de aanleg van de stuifdijk in een versnelling is gekomen. Hetzelfde geldt voor de Boschplaat op Terschelling. Vanuit natuuroogpunt zou het gewenst zijn om in dat soort situaties openingen in de stuifdijk te maken om het contact tussen Noordzee en Waddenzee via washovers te herstellen, zo meer dynamiek in het gebied te realiseren en daarmee de veroudering van vegetatie tegen te gaan. Een ander nadeel van stuifdijken is dat het erg strakke morfologische elementen zijn, met weinig of geen variatie in reliëf en met harde overgangen in het landschap.

In het ontwikkelingsschema in Figuur 19 staat de ontwikkeling van stuifdijken bij de aangroeiende kust, tussen strekdam en aangelegde strandvlakte. De ontwikkeling van gebieden waar stuifdijken zijn toegepast is vergelijkbaar als in een natuurlijke situatie, alleen worden de eerste fases veel sneller doorlopen. In plaats van embryonale duinen die aan elkaar moeten groeien, wordt in één keer de ontwikkeling van een gesloten duinenrij gestimuleerd door stuifschermen te plaatsen. Door zulke gerichte sedimentatie gaat de opbouw van een duinenrij veel sneller. Onvolledige afsnoering kan dan eerder optreden. Meestal werd met stuifdijkaanleg gelijk een volledige afsnoering geforceerd.

4.2 Directe aanleg van een duin of duinlandschap

Kustuitbreiding door de aanleg van een nieuwe duinenrij of duinlandschap biedt heel andere perspectieven dan de directe of indirecte aanleg van een strandvlakte. Bij de aanleg is de kwaliteit van het gebruikte zand vaak een punt. Soms is “slecht” zand gebruikt, met bijvoorbeeld een relatief hoog gehalte aan klei of grind. Dit zorgt voor een andere bodemontwikkeling en mogelijk ook vegetatieontwikkeling. Vaak is het zand afkomstig van de Noordzeebodem, en bevat dan veel schelpen. De korrelsamenstelling is meestal slecht gesorteerd en de gemiddelde korrelgrootte grover dan gewoon duinzand, omdat geen sortering door de wind heeft plaatsgevonden.

De ontwikkelingsrichtingen van de zeewaartse oplossingen met direct of indirect aangelegde duinlandschap zijn visueel verbeeld in Figuur 21. Paragraaf 4.2.1 en 4.2.2 geven een toelichting op Figuur 21 aan de hand van de studiegebieden.



Figuur 21. Ontwikkelingsschema voor een aangelegd duin en aangelegd duinlandschap, gebaseerd op de bestudeerde studiegebieden. De figuur maakt onderscheid tussen ontwikkelingen in een aangroeiende/gesuppleerde en eroderende kust. De natuurlijke ontwikkeling is weergegeven als referentie.

4.2.1 Aanleg van een duin

De aanleg van duinenrijen gaat langs de Nederlandse kust vooral om duinversterkingen, op plaatsen waar de oorspronkelijke waterkering niet aan de veiligheidseisen voldeed (vaak Zwakke Schakels) en waar de duinenrij kunstmatig is versterkt door zand op te brengen. Door natuurlijke overstuiving kunnen deze kunstmatige structuren natuurlijker worden, zowel wat betreft geomorfologie als vegetatie. Een aparte categorie zijn dijken die onder invloed van suppleren langzaam onder het zand verdwijnen. Duinversterkingen zijn vooral op van origine afslagkusten aangelegd, maar doordat nu over de gehele Nederlandse kust gesuppleerd wordt, is de afslagkust in feite omgeslagen naar een stabiele/aangroei kust. Door de continue aanvoer van zand door suppleren kan door de instuiving vanaf het strand zand over het kunstmatig aangelegde duin worden afgezet en daar zorgen voor een geleidelijk meer gevarieerde morfologie. In gebieden als de duinversterking Delfland en de zeereep bij Breskens is dit proces goed waarneembaar. De mate van verstuing kan zelfs zodanig zijn dat het nieuwe duin ook weer (gewenst of ongewenst) een bron van overstuiving voor het achterliggende gebied kan zijn, zoals op de punt van Voorne. Te veel verstuing waardoor erosie van de duinversterking optreedt zal overigens nooit toegelaten worden, omdat de duinversterking immers in eerste instantie voor de veiligheid is aangelegd. Ook wordt erosie door de zee van de duinvoet voorkomen door herhaling van zandsuppleties.

De volgende duinversterkingen zijn puur aangelegd als aanvulling van zand om de waterkering te versterken (deels zogenaamde dijk-in-duin oplossingen). Dit zijn allemaal locaties met voorheen een erosieve kust, waar door de terugschrijdende kustlijn de ruimte beperkt is tot een smalle strook met strand en zeereep.

- Kustwerk Katwijk: dit is een versterking van de zeewering met een duinenrij waarin een parkeergarage is geïntegreerd. Dit legt een aantal belangrijke beperkingen op, waarvan de belangrijkste is dat de versterking niet mag overstuiven vanwege de belastbaarheid van het dak van de parkeergarage. De duinen zijn daarom niet dynamisch. Qua reliëf kan er geen sprake zijn van enige ontwikkeling, het zal daarom een kunstmatig element in het landschap blijven. Een typische zeereepvegetatie is ook niet te verwachten, bij gebrek aan (natuurlijke) begrazing door konijnen is zich nu een arme variant van duindoornstruweel aan het ontwikkelen. De (huidige) waarde voor natuur is daarmee minimaal, maar nog altijd meer dan de waarde van een verharde dijk.
- Duinversterkingen Delfland: langs de gehele kust van Delfland is tweemaal een duinversterking aangebracht. De eerste duinversterking is rond 1980 aangelegd als een duinenrij met enig voor natuurlijk doorgaand reliëf. De dynamiek is altijd beperkt geweest tot de zeewaartse zijde van de duinversterking. Door suppleren zijn er wel op verschillende plaatsen embryonale duinen ontstaan, die bij aanleg van de tweede duinversterking in 2009-2010 geheel onder het zand zijn verdwenen. De nieuwe duinversterking laat door de dichte aanplant geen zand door, al het aanstuivende zand vanaf de Zandmotor wordt aan de voorzijde ingevangen, en er is vrijwel geen doorstuiving naar het achterland. De dynamische zone van de oude duinversterking is daardoor ook geheel gestabiliseerd en ook snel verruigd door de massale vestiging van Duindoorn. Door de aanstuiving vanaf de Zandmotor is de nieuwe duinversterking wel veel natuurlijker geworden, met een gevarieerde morfologie, een forse verhoging van de duintoppen en vitale helm. Op veel plaatsen is ondanks de forse overstuiving met hoogtetoenames van meer dan 1m nog een aanplant patroon herkenbaar.
- Voorne Punt: Op de punt van Voorne was ook een oude duinversterking aangebracht met “slecht” zand, klei- en grindhoudend. In 2009 is een nieuwe duinversterking aangebracht met “goed” zand. Eerst is van het oppervlak van de oude duinversterking een deel van het “slechte” zand zeewaarts geschoven, vóór de duinvoet, vervolgens is het geheel afgedekt met “goed”

zand. Experimenteel was, dat de nieuwe duinversterking niet zoals gebruikelijk is ingeplant, maar dat helmstengels zijn ingeëgd. Belangrijkste doel hiervan was een natuurlijk aanplant patroon aan te brengen en de verstuiving niet geheel stil te leggen. Door de uitloop van de ingeëgte helmstengels zou ook een meer natuurlijk vestigingspatroon worden gestimuleerd. Na de aanleg is een forse verstuiving op gang gekomen, waarbij het zand aan de landwaartse zijde van de oorspronkelijke versterking is geaccumuleerd.

- Breskens oost en west: dit zijn geen voorbeelden van aangelegde duinenrijen maar van dijken die in het zand zijn verdwenen en daarmee een zeereep karakter hebben gekregen. De morfologie is vooral aan de voorzijde natuurlijker geworden.

4.2.2 Aanleg van een duinlandschap

Een stapje verder dan de aanleg van een duinenrij is de aanleg van een heel duinlandschap. In sommige gevallen is dan een stuk strand/vooroever afgesnoerd door een kunstmatige duinenrij, zoals bij de Hondsbossche Duinen, het Spanjaardsduin en de van Dixhoorndriehoek, waarmee valleien zijn gecreëerd om een zoete ontwikkeling te stimuleren. In andere gevallen is de afsnoering niet geheel aangelegd, waardoor er mogelijkheden zijn voor een zoute ontwikkeling, zoals bij de Prins Hendrik Zanddijk, Neeltje Jans en de Banjaard.

Bij de aanleg van een duinlandschap wordt ook ruimte gemaakt voor andere elementen dan alleen strand en zeereep; er zijn ook versterkingen waarbij de functie meer landschappelijk is.

- Texel Prins Hendrik Zanddijk: dit is een duinversterking aan de Waddenkust, waarbij ook een lagune en kwelder is aangelegd. Bijzonder aan deze versterking is dat de positie aan de Waddenkust atypisch is. De duinenrij is volledig dichtgeplant om verstuivingen te voorkomen. Behalve de kustveiligheid was natuurontwikkeling hier ook een doel.
- Hondsbossche Duinen: een nieuwe waterkering van zand voor een (afgekeurde) dijk met enige overdimensionering om enige natuurlijke ontwikkeling mogelijk te maken en met extra elementen t.b.v. natuurdoelen (duinvallei). Ook deze versterking had behalve een veiligheidsdoel ook een natuur (en recreatie) doel.
- De van Dixhoorndriehoek is één van de oudste landaanwinningen langs de Hollandse kust. Hier is een hoek van de kust tussen 's-Gravenzande en de Nieuwe Waterweg opgespoten, waarbij ruimte is gemaakt voor een aantal grote duinvalleien. Het opgespoten zand is afkomstig van het uitdiepen van de Nieuwe Waterweg, waardoor de kwaliteit niet optimaal is. Het zand bevat onder andere kleideeltjes en grind.
- Spanjaardsduin: Afsnoering van strand en vooroever door aanleg van een nieuwe duinenrij en ophogen van het afgesnoerde vooroeverdeel tot strand-niveau. In feite is dit geen versterking, omdat de waterkering landwaarts hiervan ligt. Het doel is natuurontwikkeling, met name van een natte duinvallei en grijze duinen, ter compensatie van mogelijke negatieve effecten van Maasvlakte 2 op de duinen van Voorne en Goeree. De doelen zijn zeer nauw omschreven, in termen van de te ontwikkelen habitattypen, oppervlaktes en een specifieke plantensoort (zie ook Appendix C).
- Neeltje Jans: voormalig werkeiland in de Oosterscheldekering (aangelegd door opspuiten van een zandplaat), later omgevormd naar natuur door opspuiten van extra zand, waarbij aan de Noordzeezijde een duinenrij en een sluftrachtige situatie is aangelegd.
- De Banjaard: qua configuratie lijkt dit gebied erg op Neeltje Jans, met een smal duingebied voor een dijk en een onvolledig afgesnoerde strandvlakte en enkele kleinere, volledig afgesnoerde valleien.

4.3 Conclusies en lessen uit analyse van studiegebieden

Indirecte of directe aanleg van een strandvlakte biedt door de forse uitbreiding van het landoppervlak veel perspectieven voor ontwikkeling van uiteenlopende geomorfologische eenheden en habitattypen, variërend van droog tot nat en van zout tot zoet. Het aantal mogelijke habitattypen is groot en omvat een groot deel van de habitattypen van het kust- en duinlandschap.

Lessen uit analyse van studiegebieden van strandvlakten zijn:

- Bij een te hoge ligging van strandvlakte in combinatie met schelprijk materiaal dat is gebruikt voor aanleg, ontstaan door selectieve erosie op den duur schelpenvloertjes. Door hoge ligging wordt aanvoer van sediment beperkt, dit werkt op den duur beperkend voor de verstuiving naar achterland.
- Omgrenzing van embryonale duinen kan worden beïnvloed door rijsporen en wandelpaden; recreatieve druk en onderhoud kunnen ontwikkeling embryonale duinen beperken.
- Configuratie van aanleg van duinmeren in landschap belangrijk. Als aangelegd duinmeer zand invangt verzand duinmeer en wordt doorstuiving naar achterland beperkt. Deze ontwikkelingen zijn beide onwenselijk. Hier moet dus rekening mee worden gehouden bij het ontwerp.
- Aanleg van stuifdijk kan ontwikkeling van verschillende landschapsstadia en vegetatie van xero-serie) enorm versnellen, er is daarbij wel ook risico voor snelle veroudering.

Aanleg van een duin/duinversterking biedt in vergelijking met aanleg van een strandvlakte minder perspectief voor een diverse ontwikkeling. In de voorbeelden van aanleg duin/duinversterking die we in Nederland kennen is de beschikbare ruimte veelal beperkt, waardoor er minder dynamiek naar achterland wordt toegestaan. Mogelijke habitattypen voor het droge duin blijven daardoor beperkt tot embryonale duinen en witte duinen, met een mogelijke ontwikkeling richting duinstruweel of grijze duinen. Wanneer de duinversterking grootschaliger wordt aangelegd met een langere dwarsgradiënt, zijn er meer mogelijkheden voor de natte habitattypen, met name vochtige/natte duinvalleien en voor het doorstuiven van zand naar het achterland. Maar wat betreft variatie in geomorfologie en habitattypen in het gebied zelf steekt een duinversterking vrij schraal af tegen de strandvlakte.

Bij de huidige praktijk van kustverdediging hangen mogelijkheden voor aanleg strandvlakte of duin sterk samen met de morfodynamische situatie van de kust. Aangroei door vorming van brede strandvlakten door middel van aanvoer van zand door zee is alleen mogelijk in situaties met veel zandaanvoer waarbij zandbanken in zee kunnen aanlanden op de kust. Zulke situaties komen voor in het Waddengebied en deels ook in de Zuidwestdelta. Een belangrijk deel van de kustlijn in de Zuidwestdelta en de Hollandse vastelandskust zou zonder suppletie of duinversterking een afslagkust zijn. De huidige kustverdediging fixeert vooral de huidige kustlijn en leidt lokaal tot zeewaartse uitbreiding van kust- en duingebied. Deze manier van kustverdediging leidt daardoor vooral tot behoud van stranden, embryonale duinen en dynamische zeeweringen en nauwelijks tot ontwikkeling van natte kust- en duinhabitats. Door een andere manier van aanleg, bijvoorbeeld door het zand niet bij aanleg te fixeren, ontstaan er wel mogelijkheden voor extra verstuiving naar het achterland. Dit is op de punt van Voorne toegepast. Het toevoegen van een strook zand langs de kust kan ook positieve effecten hebben op bijvoorbeeld de grondwaterstand, of verzoeting in het achterliggende gebied (Zie Hoofdstuk 6, paragraaf 6.3, kennisvraag 3).

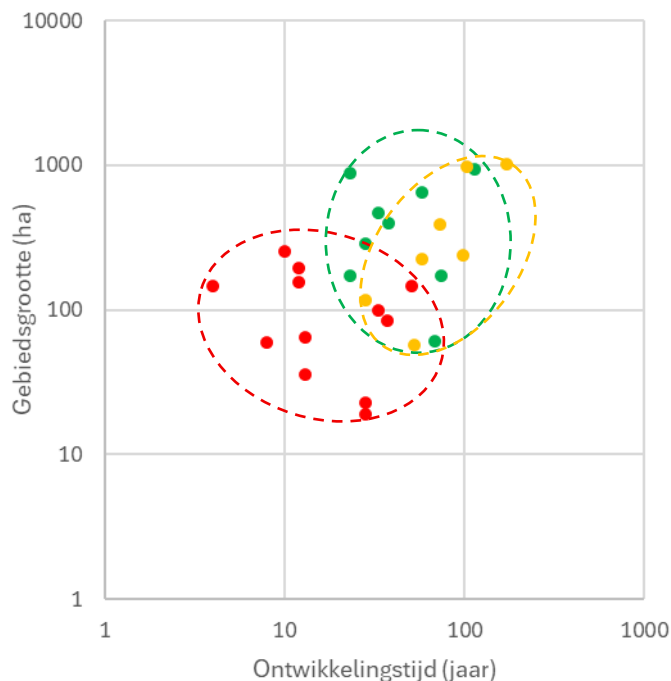
Lessen uit analyse van studiegebieden van aangelegde duin en duinlandschap zijn:

- Het volledig fixeren van duinen voor kustuitbreiding is niet noodzakelijk, vanuit ecologische ontwikkeling zelfs ongewenst. Het toestaan van dynamiek in het gebied zorgt voor meer variatie en ecologische ontwikkeling. Dit geldt ook voor het toestaan van doorstuiving naar achterland.
- De standaard aanplanting van duinen met helm met een dichte aanplant beperkt de dynamiek in de achterliggende duinen (voormalige zeereep) tot vrijwel niets en zorgt voor het volledig fixeren van een duin. Het gebruiken van ingeëgte helmstengels, het (deels) aanplanten van duinen, of het minder dicht aanplanten zijn mogelijkheden om dynamiek op delen toe te laten en verstuiving naar achterland op delen te kunnen stimuleren.
- Het is van belang dat het materiaal dat gebruikt wordt voor aanleg van duin/duinlandschap past bij het gebied. Dit geldt voor de sortering, maar ook het materiaal/samenstelling (kalkrijk/kalkarm).
- Overstuiving kan van een dijk ook een min of meer natuurlijke duinenrij maken (zoals bijvoorbeeld bij Breskens). Hier ligt wel een parallel met een stuifdijk bij een strandvlakte: er zijn mogelijkheden voor ontwikkeling van verschillende landschapsstadia en vegetatie van xeroserie, maar er is daarbij wel ook risico voor snelle veroudering.
- Aanleg t.b.v. natte duinvallei ontwikkeling vraagt om goede hydrologische modellering. Ook is aandacht nodig voor eolische dynamiek en ontstaan van natte duinvallei, de instuiving van zand moet in balans zijn met het kunnen ontwikkelen van vegetatie voor natte duinvallei.
- Bij de duinversterkingen zijn eisen voor waterveiligheid strikt gesteld, ook is er duidelijke systematiek voor de monitoring van deze eisen (de methodiek daarvoor is landelijk en uniform tussen beheerders). Op gebied van landschapsontwikkeling en ecologische ontwikkeling is dit minder duidelijk. De doelen zijn niet altijd even SMART geformuleerd, waardoor er ook niet altijd een duidelijke maatlat is wanneer aan de doelen wordt voldaan. Daarbij voert elke beheerder een monitoring op een eigen wijze uit. Bij het stellen van "krampachtige" eisen voor ontwikkeling en oppervlaktes habitattypen in een relatief kort tijdbestek (zoals bij Spanjaardsduin) is te zien dat dit veel kunstmatige aanpassingen vraagt. Er is dan weinig ruimte om in te spelen op een ontwikkeling in of buiten het gebied die anders gaat dan voorzien (en evengoed een kwaliteitsimpuls aan het gebied geeft). Bij het formuleren van doelen voor een zeer specifieke ontwikkeling is daarom van belang realistisch te zijn en een marge te hanteren in ontwerp voor ruimte en tijd zodat doelen ook werkelijk haalbaar zijn. Aandachtspunt is ook om in te zetten op systeemherstel, waarbij het vóórkomen / ontwikkeling van habitattypen een geschikte maatlat kan zijn, maar niet het (kwantitatieve) doel op zich. Niet al te strikte eisen geeft meer spontane natuurontwikkeling met mogelijk meer kwaliteit. Dit vraagt wel om balans, het stellen van eisen en meetbare doelen. Juist ook om te bepalen of doelen gehaald zijn, of op weg om behaald te worden of dat er bijgestuurd moet worden.

5 Conceptuele ontwikkeling aangelegde gebieden

In dit hoofdstuk vullen we de ontwikkelingsschema's van Hoofdstuk 3 aan voor de ontwikkelingen die we zien bij de verschillende manieren van zeewaartse uitbreiding die in Hoofdstuk 4 nader zijn geanalyseerd. We maken weer onderscheid in de ontwikkeling van strand en duin bij een aangroeiende (paragraaf 5.1) en eroderende kust (paragraaf 5.2).

Het is van belang te realiseren dat 'aangelegde' gebieden zowel qua ontwikkelingstijd als gebiedsgrootte afwijken van de natuurlijke en gestuurde studiegebieden (zie Figuur 22). De aangelegde gebieden zijn over het algemeen kleiner en minder lang in ontwikkeling. In Hoofdstuk 2 is al uitgebreid besproken wat de gevolgen hiervan zijn voor de geomorfologische- en ecologische ontwikkeling (ten opzichte van de andere gebieden). In Figuur 22 is echter ook af te leiden dat recenter aangelegde gebieden ($\sim <10$ jaar dus vanaf 2015) een groter (project)gebied bestrijken dan gebieden die eerder aangelegd zijn. Daardoor ontstaat er een interactie tussen 'tijd' en 'ruimte', wat de interpretatie van de resultaten en daarmee vooral het bepalen van doorlooptijden van ontwikkeling in aangelegde gebieden bemoeilijkt.



Figuur 22. Relatie tussen de ontwikkelingstijd en de gebiedsgrootte voor de verschillende type studiegebieden. Groen = natuurlijke ontwikkeling, geel = gestuurde ontwikkeling en rood – aangelegde gebieden.

5.1 Aangroeiende/gesuppleerde kust

Figuur 23 geeft het ontwikkelingsschema voor de aangroeiende of gesuppleerde kust, met de natuurlijke ontwikkeling, en de ontwikkeling voor de gestuurde en aangelegde typen zeewaartse uitbreiding.

De natuurlijke ontwikkeling langs een aangroeiende/gesuppleerde kust is uitgebreid beschreven in paragraaf 3.1 (Figuur 18). Uitgangspunt is dat de kustlijn stabiel is of zeewaarts beweegt, hetzij door natuurlijke aanzanding, hetzij door kunstmatige aanzanding. De ontwikkeling van strand en duin gaat zonder menselijke interventies. In het beginstadium van de natuurlijke ontwikkeling is er een strand en zeereep, in het eindstadium ligt er een volledig landschap. Van alle stadia zijn voorbeelden te vinden langs de Nederlandse kust. Een systeem kan langdurig in één stadium blijven hangen, zoals bij veel stranden langs de Hollandse kust het geval is. Er kunnen embryonale duinen ontstaan, die, afhankelijk van stormen, ook weer verdwijnen, maar de overgang naar een volgend stadium blijft uit. Wanneer de kust uitbreidt en embryonale duinen uitgroeien tot grotere complexen of duinenrijen zijn er twee mogelijke ontwikkelingen. De eerste gaat richting een zout landschap, bij onvolledige afsnoering. De tweede gaat richting een zoet landschap bij volledige afsnoering, wanneer de afgesnoerde strandvlakte/vallei buiten bereik van de zee komt. Door volledige afsnoering kan het zoute landschap door ontwikkelen tot een zoet landschap, maar het zoute landschap kan ook een eindfase zijn. In een eindfase is er geen geomorfologische ontwikkeling meer, maar verandert alleen nog de vegetatie door successie.

Door processen te sturen kan de natuurlijke ontwikkeling versneld of geforceerd worden. Een voorbeeld van sturing is de aanleg van een strekdam (Figuur 23). Hiermee wordt het sedimenttransport op de onderwateroever beïnvloed, waardoor het strand rondom de strekdam aanzandt. De ontwikkeling van strand naar strandvlakte wordt hiermee geforceerd. Zonder de strekdam zou deze ontwikkeling niet plaats vinden. Vergelijkbaar met een natuurlijke strandvlakte kan hierna embryonale duinvorming op gang komen, gevolgd door onvolledige en/of volledige afsnoering.

Een andere vorm van sturing is de aanleg van stuifdijken op een strandvlakte (Figuur 23), waarmee de depositie van zand gecontroleerd wordt. Hiermee wordt het proces van (on)volledige afsnoering versneld, waardoor de stadia van embryonale duinontwikkeling en vorming van duincomplexen worden overgeslagen. Ook kan in geval van onvolledige afsnoering het nog open gedeelte met een stuifdijk worden dichtgelegd. Op de Waddeneilanden kan de aanleg van een stuifdijk parallel aan de kustlijn de verbinding tussen Noordzee en Waddenzee verbreken, waardoor versneld kweldervorming en vegetatieontwikkeling optreedt. Hoewel de versnelde ontwikkeling van zoute en zoete vegetaties positief kan zijn, zorgen de stuifdijken ook voor een geringere dynamiek, waardoor veroudering ook sneller optreedt. Daarnaast kan door de afsnoering met een stuifdijk een deel van een strandvlakte versneld worden afgesnoerd waardoor na de afsnoering geen sedimentatie meer kan optreden en het niveau van de afgesnoerde vallei dan lager ligt dan bij spontane afsnoering het geval zou zijn geweest. Verder vormen stuifdijken onnatuurlijk rechte elementen in het landschap, met vaak scherpe overgangen. Stuifdijken zouden ook toegepast kunnen worden voor de ontwikkeling van een duinversterking, waarbij deze dan niet direct aangelegd wordt, maar door het plaatsen van stuifschermen en het zorgen van voldoende aanbod van zand (door suppleren) in de loop van een aantal jaren wordt opgebouwd. Nadeel is dat dit langer duurt, voordeel is dat het in de stuifdijk opgehoopte zand op natuurlijke wijze gesorteerd is en afgezet wordt.

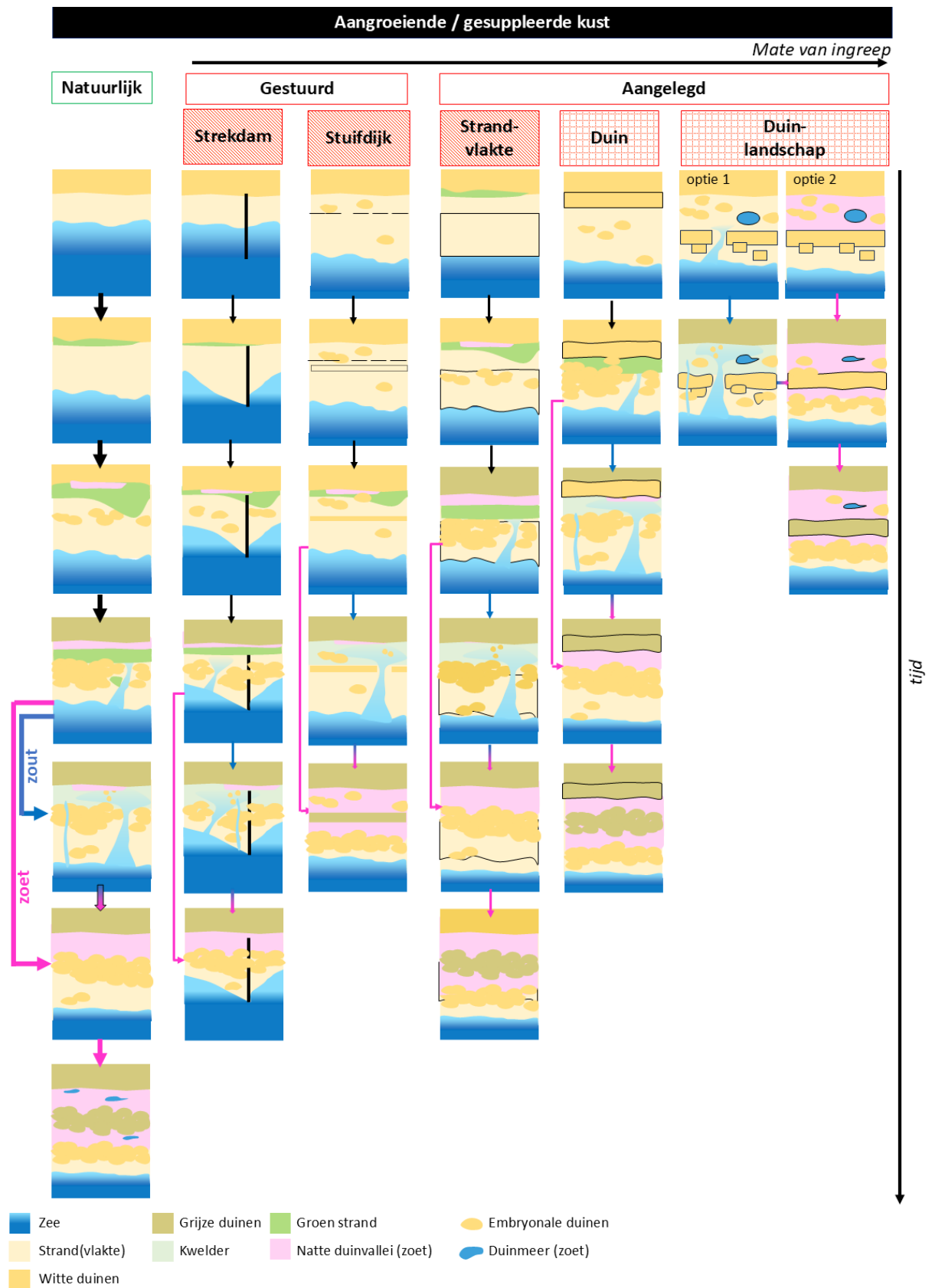
Een strandvlakte kan direct aangelegd worden (Figuur 23). Wanneer de strandvlakte vervolgens onderhouden wordt met suppleties kan door natuurlijke processen blijvende duinnatuur ontstaan,

met alle elementen die bij een natuurlijke ontwikkeling horen. Enerzijds kan de ontwikkeling door aanleg van een strandvlakte versneld worden, de aanleg gaat immers veel sneller dan het aanlanden van een zandplaat of de geleidelijke verbreding van een strand, anderzijds kan de ontwikkeling van duinnatuur geforceerd worden op een plaats waar deze spontaan niet tot ontwikkeling zou komen. Doordat de strandvlakte onderhouden wordt kunnen de aanwezige duinen verder groeien, en zou er op voldoende afstand van de kustlijn in de droge duinen zelfs een ontwikkeling richting grijze duinen kunnen plaatsvinden.

In plaats van het op laten stuiven van een stuifdijk, kan een duinenrij ook direct aangelegd worden (Figuur 23). Tot nu toe is dit alleen gebeurd op plaatsen waar de waterkering versterkt moest worden, zonder enig natuurdoel. Maar het is denkbaar dat op plaatsen met een smalle duinzone, zoals bijvoorbeeld bij Callantsoog, een duinenrij vóór de huidige zeereep een ontwikkeling richting grijze duinen op de zeereep mogelijk zou kunnen maken.

Kunstmatige aanleg van duinen met een natuurdoel gebeurt vooral in combinatie met meer elementen, dus bij de aanleg van een duinlandschap (Figuur 23). Het natuurdoel kan leidend zijn, maar het is ook mogelijk dat het doel kustverdediging is, met natuur als secundair doel. Voordeel is dat in korte tijd een volledig duinlandschap gerealiseerd kan worden, op plaatsen waar dit spontaan niet mogelijk zou zijn. De ecologische/hydrologische ontwikkeling kan vervolgens aan de natuur overgelaten worden. Nadeel is dat het opgebrachte zand niet door de wind gesorteerd is, geen natuurlijke gelaagdheid heeft en dat de morfologie kunstmatig is. Een natuurlijke morfologie zou nagebootst kunnen worden, door de vormen uit een bestaand landschap met een vergelijkbare configuratie (expositie, hoogte, schaal) te kopiëren. Een andere mogelijkheid is de basis voor het landschap aan te leggen en verdere vormgeving aan de wind over te laten. Er zijn bij de aanleg twee opties. De eerste is een duinlandschap aan te leggen met een gesloten duinenrij, en verschillende elementen landwaarts daarvan, met een zoete ontwikkeling. De tweede optie is een niet gesloten duinenrij en een zoute ontwikkeling.

Om ontwikkelingen te versnellen of te forceren zijn combinaties van bovengenoemde typen mogelijk. Bijvoorbeeld een strandvlakte aanleggen die gedurende een aantal jaren aan de golven wordt blootgesteld voor een goede sortering van zand, waarna op geschikte plaatsen één of meer stuifdijken worden aangelegd om een deel van de strandvlakte geheel of gedeeltelijk af te snoeren, waarna het geheel verder aan de natuur wordt overgelaten. Dit zou een alternatief voor de aanleg van het Spanjaardsduin kunnen zijn geweest, met mogelijk een betere instelling van een hydrologisch evenwicht, meer ruimte voor de ontwikkeling van vochtige duinvalleien en betere randvoorwaarden voor de ontwikkeling van grijze duinen. Mogelijk nadeel zou een langere tijdsduur voor deze ontwikkeling kunnen zijn.



Figuur 23. Ontwikkelingsschema voor een aangroeiende/gesuppleerde kust, waarin onderscheid wordt gemaakt tussen de natuurlijke, gestuurde en aangelegde ontwikkeling.

5.2 Eroderende kust

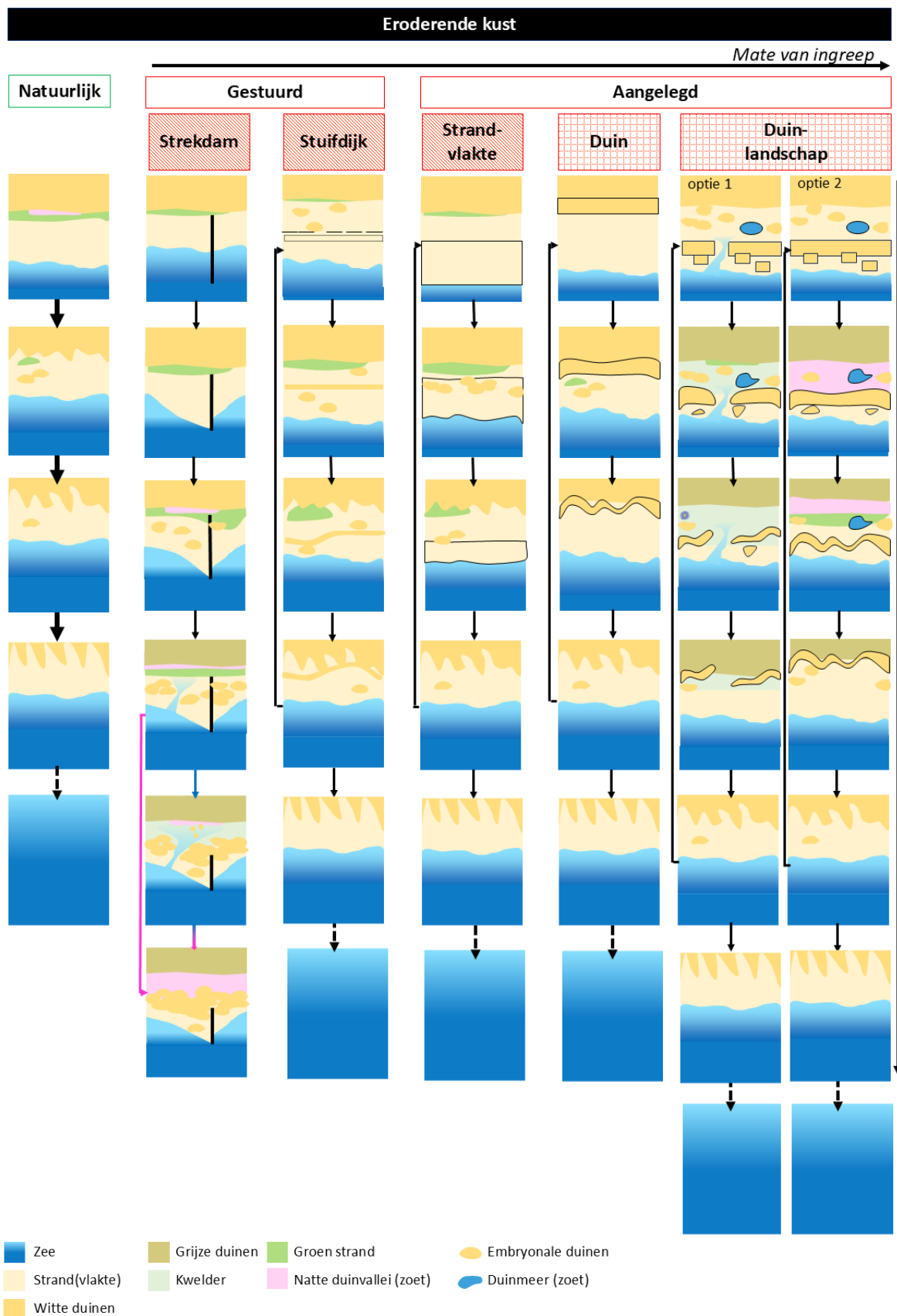
Figuur 24 geeft het ontwikkelingsschema voor de eroderende kust. In alle gevallen behalve de strekdam is het eindstadium dat door kustlijnerosie de kustlijn landwaarts is verplaatst en het systeem is overgegaan in zee. De weg daar naartoe is afhankelijk van het stadium waarin het systeem verkeert.

Bestaat het systeem alleen uit strand en zeereep, dan zal de zeereep landwaarts verplaatst (zie ook Figuur 18 en beschrijving in paragraaf 3.2). Afhankelijk van de mate van winderosie en de snelheid van achteruitgang, gaat dit gepaard met kleinschaliger of grootschaliger verstuingen. Wanneer de zeereep voldoende massa heeft zal deze gaan paraboliseren, er ontstaat een gekerfde of zelfs paraboliserende zeereep. Dit systeem schuift in de loop van de tijd verder landwaarts op.

Wanneer op het strand ook embryonale duinen aanwezig zijn, zullen deze eerst weg eroderen, waardoor het vrijkomende zand deels richting zeereep stuift en daar het volume in eerste instantie zal doen toenemen. Het verdere verloop zal gaan zoals hierboven geschetst. Bij aanwezigheid van een stuifdijk zal de erosie hetzelfde verlopen. De stuifdijk zal op een gegeven moment doorbreken. De hoeveelheid zand die richting zeereep stuift zal groter zijn en er zal meer tijd nodig zijn voor de volledige stuifdijk is weg geërodeerd dan in het geval van embryonale duinen. Dit soort situaties zien we wel op de Waddeneilanden (bijvoorbeeld de Cupidopolder op Terschelling), waar aan de uiteinden, in de buurt van de zeegaten, een aangroeisituatie na verloop van tijd overgaat in een afslagsituatie.

Bij een onvolledig afgesnoerde strandvlakte zal de invloed van de zee in het afgesnoerde deel eerst toenemen. Mogelijke brakke condities zullen zouter worden (Figuur 24). Ondertussen zullen de duinen die de afsnoering vormen weg eroderen. Hierbij kunnen washovers ontstaan. Geleidelijk zal het hele systeem weg eroderen, tot de zeereep, daarna is de ontwikkeling als hierboven. Bij een volledig afgesnoerde strandvlakte zullen de duinen die de afsnoering vormen weg eroderen, tot ze doorbreken en er een vergelijkbare situatie als bij onvolledige afsnoering ontstaat. De ontwikkeling zal verder vergelijkbaar zijn.

Een strekdam bij een eroderende kust zal voorkomen dat de strandvlakte verdwijnt. De strekdam zal zand vanuit de aangrenzende, eroderende kustvakken in blijven vangen.



6 Beantwoording kennisvragen

Dit hoofdstuk gaat in op de kennisvragen. Kennisvraag 1 en 2 worden beantwoord op basis van literatuurstudie en inzichten uit de studiegebieden zoals beschreven in Hoofdstuk 2 tot en met Hoofdstuk 5. Kennisvraag 3 en 4 worden beantwoord op basis van literatuurstudie. Elk van de vier kennisvragen wordt in een afzonderlijke paragraaf behandeld. De kennisvraag is daarbij aan het begin van elke paragraaf in een kader opgenomen.

6.1 Kennisvraag 1

Wat is nodig in termen van volume, tijdsduur en vorm bij zeewaartse uitbouw om te komen tot een volwaardige en volledig ontwikkelde duinnatuur op eerst de uitbouwkust en vervolgens de afslagkust?

In dit onderzoek zijn twee soorten van zeewaartse kustuitbreiding geanalyseerd: strandvlakte en duin. Binnen elk van deze soorten zijn varianten onderscheiden van directe en indirecte aanleg (ook wel gestuurde gebieden genoemd in dit onderzoek). De varianten onderscheiden zich door een verschil in mate van sturing van de processen om 'een volwaardige en volledig ontwikkelde duinnatuur' te bewerkstelligen, waarbij een gebied met volwaardige en ontwikkelde duinnatuur is gedefinieerd als een gebied met een variatie aan goed ontwikkelde geomorfologische eenheden en habitattypen. De benodigde tijd die nodig is om te komen tot een volwaardige en volledig ontwikkelde duinnatuur is mede afhankelijk van de mate van sturing. Hoe minder sturing, hoe meer tijd benodigd is om een volwaardige en volledig ontwikkelde duinnatuur te bewerkstelligen. In Figuur 23 en Figuur 24 zijn de stadia van ontwikkelingen van deze gebieden om te komen tot een volwaardige en volledig ontwikkelde duinnatuur schematisch weergegeven.

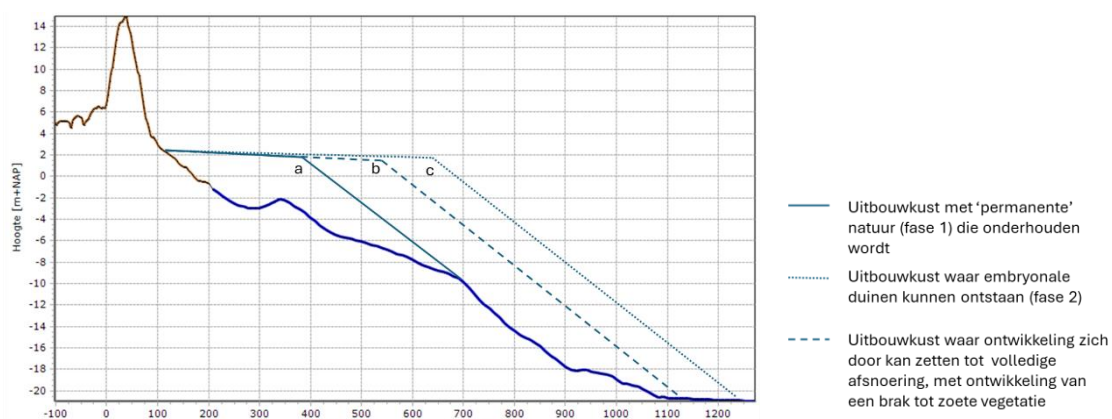
De resultaten van dit onderzoek laten zien dat indirecte of directe aanleg van een strandvlakte door de forse uitbreiding van het landoppervlak veel perspectieven biedt voor ontwikkeling van verschillende geomorfologische eenheden en habitattypen, variërend van droog tot nat en van zout tot zoet. Aanleg van een duin/duinversterking biedt in vergelijking met aanleg van een strandvlakte minder perspectief voor een diverse ontwikkeling. Dit wordt vooral verklaard door de beperkte beschikbare ruimte van dit type zeewaartse uitbreiding in de geanalyseerde studiegebieden. Mogelijke habitattypen voor het droge duin blijven daardoor beperkt tot de xeroserie met embryonale en witte duinen, met een mogelijke ontwikkeling richting duinstruweel of grijze duinen. Bij een grootschaliger duinversterking met een langere dwarsgradiënt, zijn er meer mogelijkheden voor de natte habitattypen, met name vochtige/natte duinvalleien en voor het doorstuiven van zand naar het achterland. Maar ook een grootschalige duinversterking kent minder variatie in geomorfologie en habitattypen in het gebied zelf in vergelijking met een duingebied met strandvlakte.

Voor de aanleg van een strandvlakte hangt het aan te brengen volume van verschillende factoren af. Het aan te brengen volume zand, in samenhang met de diepte van de onderwateroever, bepaalt de ruimtelijke schaal van de zeewaartse uitbreiding (oppervlak wat gerealiseerd kan worden) en de tijdschaal (tijdsperiode die nodig is om oppervlak weer helemaal weg te eroderen). Welke ruimtelijke schaal nodig is, is mede afhankelijk van de natuur die nagestreefd wordt. Daarbij is zowel de kustlangse als de -dwarse lengte van belang. We onderscheiden verschillende varianten.

De eerste variant is een uitbouwkust die onderhouden wordt, waar dus "permanente" natuur op kan ontstaan. In eerste instantie zullen embryonale duinen ontstaan. De benodigde ruimte om

embryonale duinen te krijgen is op zich niet groot. Langs een breed strand met voldoende zandaanbod kan al binnen een jaar of vijf een smalle zone embryonale duinen tegen de zeereep ontstaan. Maar embryonale duinen los van de zeereep herbergen meer kleinschalige gradiënten en worden daarom waardevoller geacht. Op grond van bestaande situaties (Appendix B) komen we tot de volgende minimale dimensies: breedte kustdwars 150-250 m, >300 m kustlangs, minimale afstand tot de hoogwaterlijn 100 m (dus totale strandbreedte 250-350 m), aanleghoogte maximaal 2-2.5 m NAP, helling 0.17°, aflopend naar de laagwaterlijn. Afhankelijk van de diepte van de onderwateroever komt dit neer op een aan te brengen volume van ten minste 0,5 Mln m³ (Zie ter illustratie Figuur 25 lijn a, hierbij is nog geen rekening gehouden met erosie door de jaren heen).

In tweede instantie groeien embryonale duinen door tot een duinenrij waarbij een deel van de strandvlakte wordt afgesnoerd. De ontwikkeling van vegetatie is zout tot brak. Om tot volledige ontwikkeling te komen vergt dit wat meer ruimte dan alleen embryonale duinen. Op grond van bestaande situaties komen we tot de volgende dimensies: breedte kustdwars 200-350 m, >500 m kustlangs, minimale afstand tot hoogwaterlijn 100 m, aanleghoogte 2-2.5 m NAP, helling 0.17°. Afhankelijk van de diepte van de onderwateroever komt dit neer op een aan te brengen volume van ten minste 1,5 Mln m³ (Zie ter illustratie Figuur 25 lijn b, hierbij is nog geen rekening gehouden met erosie door de jaren heen).



Variant	Breedte kustdwars	Lengte kustlangs	Minimale afstand tot hoogwaterlijn	Inschatting benodigd volume
a	150 -250 m	300 m	100 m	Ten minste 0,5 Mln m ³
b	100 -350 m	500 m	100 m	Ten minste 1,5 Mln m ³
c	150 -250 m	300 m	200 m	Als b + 0,5 Mln m ³

Figuur 25. Illustratie van aan te brengen volume zand in een typisch dwarsprofiel voor een uitbouwkust voor drie varianten van uitbouwende kust.

In derde instantie zet de ontwikkeling nog verder door richting volledige afsnoering, met ontwikkeling van een brakke tot zoete vegetatie. De benodigde dimensies zijn vergelijkbaar met die voor onvolledige afsnoering, alleen is het voor de ontwikkeling gunstiger wanneer de afstand tot de hoogwaterlijn groter is, geschat op 200 m. Dit betekent, weer afhankelijk van de diepte van de onderwateroever, een aanvullend volume van ten minste 0,5 Mln m³ extra ten opzichte van de onvolledig afgesnoerde variant (Zie ter illustratie Figuur 25 lijn c, hierbij is nog geen rekening gehouden met erosie door de jaren heen).

De uitgebouwde kust die niet onderhouden wordt, gaat over in een afslagkust. Op zich gelden voor embryonale duinen dezelfde dimensies als hierboven, maar in geval van een afslagkust zal extra ruimte gereserveerd moeten worden om voldoende levensduur te garanderen. Een zeewaartse uitbreiding die na enkele jaren alweer verdwenen is, heeft geen meerwaarde ten opzichte van de verstoring die het oplevert voor de onderwateroever. Dit betekent een grotere kustlangse lengte (>1 km) en breedte (>600 m), wat automatisch veel meer ruimte voor duinontwikkeling oplevert. Het minimaal benodigde volume wordt daarmee niet bepaald door de ontwikkelingsruimte voor duinnatuur, maar door de gewenste levensduur.

In Hoofdstuk 5, paragraaf 5.2 werd de ontwikkeling geschetst bij een eroderende kustlijn. In de afslagfase eroderen de duinen ook door secundaire erosie door de wind. Hierbij ontstaan in het afslagklif stuifkuilen en kerven die voor flink landwaarts transport zorgen. Als het eroderende duinmassief groot is, dus veel volume bevat, kan het landwaartse transport ook groot zijn, zodanig zelfs dat er een transgressief duin en een paraboliserende zeereep ontstaat (zie bijvoorbeeld Hesp et al., 2022). Dit kan het uiteindelijke doel van een zeewaartse uitbreiding zijn, omdat dit soort processen vrijwel nergens in Nederland op kunnen treden, door ruimtegebrek, aanwezigheid van infrastructuur enz. Het is moeilijk in te schatten hoe groot het volume van het duinmassief moet zijn voor een dergelijke ontwikkeling. Waarschijnlijk is de benodigde schaal een orde groter dan wat hierboven is aangegeven. De erosie van de aanvankelijk aangegroeide duinen op het Noorderstrand van Schiermonnikoog en de Cupidopolder op Terschelling laten zien dat het volume niet genoeg is voor een grootschalige, transgressieve ontwikkeling. Er is wel op kleine schaal sprake van een rollende zeereep, secundaire verstuiving en hier en daar ontwikkeling van washovers, maar de totale hoeveelheid zand die in beweging is, is veel te weinig voor een transgressief duinsysteem. Pool & van der Valk (1988) hebben berekend dat bij de vorming van de Jonge Duinen langs de Hollandse kust transport hoeveelheden van 40 m³/m per jaar optraden. Dit is ca 5x meer dan de gemiddelde netto groei van duinen voor de Nederlandse kust. Op basis van De Vries et al. (2012) en Van der Wal (2004), bedraagt de gemiddelde netto groei van duin (inclusief effect van duinafslag) voor de Nederlandse kust bedraagt 8,7 m³/m/jaar). Bij zo een transgressieve ontwikkeling verdwijnt een veelvoud van de overstuiving via de onderwateroever. Stel dat dit een factor 3 is, dan zou door overstuiving 40 m³/m.jaar de duinen in geblazen worden en 120 m³/m.jaar via de onderwateroever afgevoerd worden.

Volume (grootte) en tijd nodig voor de gemorfologische ontwikkeling zijn echter niet de enige beperkende factoren. Uit de analyse van aanwezige habitattypen blijkt dat er andere (kwaliteits)factoren zijn die de gewenste ontwikkeling van duinnatuur met een hoge biodiversiteit bepalen. Dit is een breed scala aan factoren, deels in beeld zoals de fysieke samenstelling van suppletie materiaal, recreatiedruk en ander medegebruik, maar mogelijk ook (complexere) biologische relaties waarvan het veel lastiger is – deels door het ontbreken van detailinformatie – een kwalitatieve of semi-kwantitatieve inschatting te maken.

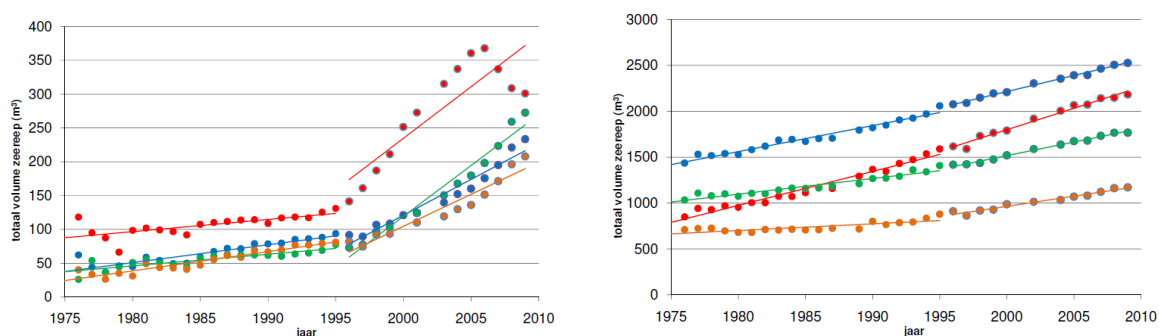
6.2 Kennisvraag 2

Welke ontwikkelingen in het gebied met zeewaartse uitbouw kunnen een kwaliteitsimpuls geven aan het al bestaande achterliggende duingebied? En wat is dan de gewenste timing van deze ontwikkelingen?

Het effect van suppleties op het sedimentvolume in de zeereep is niet eenduidig vast te stellen en verschilt per locatie. Hoe suppleties de dynamiek van de kustreep beïnvloeden wordt door lokale omstandigheden bepaald. Wel is in eerdere studies gezien dat gemiddeld een toename van

aanzanding in de duinen plaatsvindt als gevolg van suppleren (Arens et al., 2010 en Deltares, 2019). Arens et al. (2010) hebben op basis van gegevensanalyse aangetoond dat de trend van aanzanding in het dungebiet sinds suppleren is toegenomen op een aantal locaties. In veel gebieden is tussen 1990 en 2000 een omslag waar te nemen, waarbij erosie overgaat in aanzanding, of waar de mate van aanzanding sterk toeneemt (voorbeeld in Figuur 26, links). Deze trendbreuk komt overeen met het moment van starten van het dynamisch kustbeheer, waarvan suppleties een onderdeel zijn (Arens et al., 2010). In een detailanalyse van de kustreep bij Schoorl en Schouwen komt Deltares (2019) ook tot de bevinding dat aanzanding van de zeereep hier sterk afhankelijk is van het aanbod via vooroever- en strandsuppletie.

Deze aanzandende trend is ook zichtbaar op locaties waar niet is gesuppleerd, wat suggereert dat het effect van suppleties op aangroei van duinvolume niet alleen geldt voor de plek in de nabijheid van suppletie. Ook zijn er locaties waar geen trendbreuk te zien is en de trend van volumetoename in het duin vóór suppleren al was ingezet (voorbeeld in Figuur 26, rechts, Arens et al., 2010).



Figuur 26. Totaal volume in de zeereep voor Ameland west tussen rijkstrandpaal 3.00 en 5.00 (links), en Terschelling west tussen rijkstrandpaal 2.00 en 6.00 (rechts). De kleuren komen overeen met verschillende raaie. Bron: Arens et al., 2010.

Na aanleg van de Zandmotor heeft onderzoek plaatsgevonden naar het effect op de natuurkwaliteit van het achterliggend dungebiet Solleveld (IJff et al., 2021). De zanddynamiek in de binnenduinen is mogelijk afgenomen in de periode 2012-2020, ook is de hoeveelheid zoutspray in de buitenduinen lager in transecten ter hoogte van de Zandmotor vergeleken met transecten ten noorden en zuiden van de ingreep. Uit de vegetatiekartering blijkt dat in het achterliggende gebied het areaal witte duinen enigszins afneemt ten faveure van duindoornstruwelen en ook is er een beginnende ontwikkeling naar (meer) grijze duinen waargenomen. Deze resultaten zijn echter niet algemeen toepasbaar voor alle situatie met (strandvlakte) suppleties. Door de aanleg van kustversterking in 2010 met grootschalige helmaanplant was al veel dynamiek verdwenen uit het systeem, en was doorstuiving van zand sowieso al minimaal. In situaties waar de achterliggende duinen (veel) dynamischer zijn is dat mogelijk anders. Arens et al. (2012) kwamen tot dezelfde conclusie: het effect van suppleties op dynamiek en doorstuiving naar het achterland is verschillend tussen locaties langs de kust. Verstuiving naar het achterland heeft geen effect op de morfologische ontwikkeling in het achterland (geen hoogteverandering), maar wel op de ecologische ontwikkeling (input van kalk, nutriënten). Dit blijkt bijvoorbeeld uit een hoge pH tot achter de zeereep, en een verschuiving van vegetatietypen.

In dit onderzoek is vooral gekeken naar de geomorfologische eenheden en habitattypen in de gebieden van zeewaartse kustuitbreiding. De vraag met betrekking tot kwaliteitsimpuls naar het achterland beantwoorden we kwalitatief. Daarbij gaan we in op de potentie die zeewaartse uitbreiding kan hebben op eolische dynamiek.

Er zijn twee soorten effecten denkbaar van een zeewaartse uitbreiding op de bestaande duinen landwaarts:

1. **Stabilisatie door verandering relatieve ligging.** Door het nieuwe gebied komt het bestaande duingebied verder van de kust af te liggen, waardoor allerlei gradiënten (zoutspray, zanddynamiek, windkracht) afnemen, en het gebied verder stabiliseert. Dit is in feite wat we bij de Zandmotor zien gebeuren, alleen speelt daar een effect van de duinversterking Delfland doorheen, die net voor aanleg van de Zandmotor is aangelegd. Doordat deze met helm is ingeplant, en is aangelegd met een flauw profiel, heeft de duinversterking al het van de Zandmotor aanstuivende zand zeer effectief ingevangen, en de doorvoer landinwaarts compleet geblokkeerd. Het is waarschijnlijk dat dit effect op de langere termijn ook was gaan spelen, naarmate de embryonale duinen op de Zandmotor verder tot ontwikkeling zouden komen en ook een effectieve zandvang zouden vormen. Door beheer en aanvullende maatregelen die interactie met het achterland kunnen bewerkstelligen liggen er ook kansen. Met een maatregel als de aanleg van kerven kan er verbinding tussen de zeewaartse uitbreiding en het achterland gecreëerd worden waardoor doorstuiving naar achterland mogelijk is en er een kwaliteitsimpuls in het achterland kan optreden. Hiervoor moeten kerven wel aangelegd zijn onder de juiste randvoorwaarden (zoals juiste oriëntatie lengte-as kerf, juiste breedte opening, aansluiting met strand, ontwikkeling vegetatie in de kerf). In kerven waar deze factoren optimaal zijn, is doorstuiving van zand naar het achterland duidelijk waarneembaar.
2. **Toename verstuiving.** Door het aanleggen van een grote zandvlakte is in potentie een zandstroom op gang te brengen naar de achterliggende duinen waardoor de dynamiek daar zou kunnen toenemen. Door bijvoorbeeld instuiving (en opstuiving) kan de kwaliteit van kalkrijke grijze duinen en duindoornstruwelen weer toenemen en kunnen ook achter de zeereep weer witte duinen ontstaan. Er is een flinke dosis beheer voor nodig om dit op gang te houden. Op die manier zou het achterliggende gebied kunnen verjongen.

Overigens is er ook nog een andere kwaliteitsimpuls denkbaar, namelijk in het gebruik van de ruimte. De aanleg van een nieuw gebied voor een bestaand gebied kan mogelijkheden bieden om functies uit het bestaande gebied te verplaatsen naar het nieuwe, wat een kwaliteitsimpuls kan opleveren. Dit valt buiten het bestek van ons onderzoek, maar het is wel iets waar bij het nadenken over zeewaartse oplossingen rekening mee kan worden gehouden. Zeker in gebieden waar al een enorme druk is op de ruimte zou dit voor positieve effecten kunnen zorgen.

Met andere woorden, in potentie is door zeewaartse kustuitbreiding met megasuppleties een kwaliteitsimpuls in het achterliggende gebied te bewerkstelligen door het creëren van gradiënten in zoutspray, eolische zanddynamiek en hydrologische condities – door vergroting van de zoetwaterlens, zie ook 6.3 en 6.4.1 – naar het achterland en het beschikbaar maken van sediment voor verstuiving naar het achterland. In de studiegebieden van deze studie is deze kwaliteitsimpuls niet duidelijk waarneembaar en te koppelen aan de zeewaartse uitbreiding.

Een kwaliteitsimpuls is waarschijnlijk alleen te realiseren is als er goede aansluiting is tussen het gebied van zeewaartse kustuitbreiding en het achterliggende gebied. Dit betekent dat er veelal aanvullende maatregelen en beheer nodig zijn om kwaliteitsimpuls in het achterliggende gebied van het gebied van de zeewaartse kustuitbreiding te kunnen bewerkstelligen.

6.3 Kennisvraag 3

Wat is de optimale ontwikkeling van gradiënten in zoutspray, eolische zanddynamiek en hydrologische condities voor duinecologie – en wat kan de rol van megasuppleties hierin zijn?

Voor het ontstaan en duurzame instandhouding van een compleet duinecosysteem is schaal en variatie (in ruimte en tijd) van groot belang (Lansu et al., 2025). De lengte van gradiënten dient voldoende groot te zijn, waardoor er ruimte is voor natuurlijke successie, en ook retrogressie door bijvoorbeeld secundaire verstuing, en het ontstaan van washovers zonder dat dit tot (regionaal) verlies leidt van soorten, areaal aan kenmerkende vegetatietypen en daarmee Natura 2000 habitattypen. Volgens Lansu et al. (2025) is er een breedte van de duinzone van ten minste 1500m nodig om alle langs de Nederlandse kust voorkomende habitattypen te herbergen. Bij een gemiddelde duinbreedte van 1800 m wordt 75% van alle plantensoorten aangetroffen, bij een breedte van 2200 m 90%. Voor een volledig landschap zijn dus flinke duinbreedtes nodig, aanmerkelijk breder dan de 900m van de Zandmotor. Maar in smalle duingebieden, zoals Oranjezon (maximale breedte 1.5 km), of op locaties waar alleen maar één enkele duinenrij ligt, betekent een verbreding van enkele honderden meters al direct een belangrijke ruimtewinst.

In de volgende alinea's wordt ingegaan op de benodigde gradiënten in zoutspray, eolische zanddynamiek en hydrologie voor de ontwikkeling van duinecologie.

Zoutspray

De verspreiding en reikwijdte van zoutspray wordt beïnvloed door de mate van golfenergie, windsterkte en richting, afstand tot de zee, reliëf, vegetatiestructuur, neerslag en bodemeigenschappen (Du & Hesp, 2020). Een hoge, gesloten zeereep in combinatie met een dichte struweelvegetatie kan bijvoorbeeld de zoutspray gradiënt landinwaarts sterk beperken, doordat het zout in de ruwe vegetatie wordt ingevangen. Dynamisering van de zeereep in de Kennemerduinen leidde tot een afname van zoutinspoeling in de bodem door een afname van ruwheid en vegetatiedichtheid en daardoor minder zoutinvang (Stuyfzand & Arens, 2015). Een megasuppletie in de vorm van of leidend tot een hoge, weinig overspoelde strandvlakte doet de zoutspray gradiënt zeewaarts verplaatsen. Een lagergelegen megasuppletie zou door een bredere branding kunnen leiden tot meer (brekende) golven, waardoor er meer zoutspray ontstaat die (in potentie) verder landinwaarts reikt.

Eolische Zanddynamiek

Uit de analyse van gegevens uit de onderzochte gebieden blijkt dat door zeewaartse kustversterking er slechts op de strandvlakte en in de zeereep een toename is van eolische zanddynamiek. Bij een hoge (en gesloten) zeereep zonder verdere dynamisering (creëren van kerven en stuifkuilen, stimuleren van washovers, vegetatiebeheer, etc.) zal de lengte van de zanddynamiek gradiënt beperkt blijven. Dit is een belangrijk aandachtspunt dat bij zeewaartse uitbreidingen moet worden geadresseerd. Door te variëren in de dichtheid van aanplant kan de mate van doorstuiving beïnvloed worden. Door helemaal geen stuifbeperkende maatregelen te nemen, zou de doorstuiving groter kunnen worden dan zonder de zeewaartse uitbreiding, zeker als dit in combinatie gaat met stuifbevorderende maatregelen in de bestaande duinen. Inrichting van recreatieve maatregelen kan hier ook een negatieve rol bij spelen. Op de duinversterking Delfland bijvoorbeeld is een fietspad aangelegd. De duinversterking zelf is zodanig dichtgeplant dat er geen enkele doorstuiving plaatsvindt. Het Hoogheemraadschap Delfland wil nu juist die doorstuiving versterken en heeft daarom verschillende kerven aangelegd, maar te sterke verstuing door deze kerven leidt onmiddellijk tot problemen op het achterliggende fietspad.

Hydrologie

Zeewaartse kustversterking door megasuppleties en aanleg van duinen en duingebieden, zeespiegelstijging en een toename van de grondwateraanvulling door hogere neerslagjaarsommen kunnen alle drie zorgen voor een stijging van de grondwaterstand in de duingebieden (Cirkel & Aggenbach, 2024; zie ook bijlage D). Indien deze niet of weinig gedraineerd zijn kan dit tot sterke vernatting leiden van de duinvalleien. Dit biedt kansen voor uitbreiding en herstel van nat habitat in (nu nog) droge duinvalleien en zal ook gevolgen hebben voor huidige grondwaterafhankelijke duinvalleien. De sterkste vernatting zal optreden in duingebieden zonder of met beperkte afwatering, en wordt nu ook al in enkele gebieden van PWN waargenomen (Cirkel & Aggenbach, 2024). Dit is een trendbreuk met de veelal verdrogende trend die in veel duingebieden is opgetreden vanaf eind 19^e eeuw tot ver in de 20^e eeuw (Van den Burg et al., 2009).

Kustaangroei ter hoogte van duinsystemen met een grote zoetwaterbel levert snelle ontwikkeling op van grote groene stranden met brakke en zoete natte vegetatie. Aangroeisystemen met langdurig onvolledig afgesnoerde strandvlakte zijn belangrijk voor ontwikkeling naar natte habitattypen met zout-zoet gradiënten (haloserie) en een duidelijk brakke component. Deze systemen zijn zeer belangrijk voor brakke natuur omdat die in Nederland zeldzaam zijn geworden door de rigide scheiding van zee en land.

Gradiënten en megasuppleties

De grote (natuurlijke) kustaangroeisystemen die zijn ontstaan door zandaanvoer door zee hebben grote variatie in geomorfologie, abiotiek en habitat en kunnen zich ontwikkelen over een langere tijd (> 50 jaar) zoals blijkt uit de uitgevoerde analyses; er ontstaat een gevarieerd samenspel van bovengenoemde gradiënten en abiotische condities. De langere ontwikkelingstijd biedt namelijk kansen voor ontwikkeling van habitattypen van oudere successiestadia zoals ontkalkte droge duinen en vochtige duinvalleien. Het stimuleren van de ontwikkeling van dergelijke systemen met megasuppleties heeft tot nu toe nog niet plaatsgevonden. Zeer grootschalige onderwatersuppletie op de juiste plekken zou kunnen leiden tot de nieuwe ontwikkeling van zulke systemen, waarbij het essentieel is dat de schaal zodanig groot is en de (ecologische) doelen zodanig robuust geformuleerd zijn dat (frequent) ingrijpen zoals dat nu in veel gevallen noodzakelijk is achterwege gelaten kan worden: De facto 'Building with Nature'.

6.4 Kennisvraag 4

Wat zijn de gevolgen van zeewaartse kustuitbreiding met megasuppleties voor zoetwaterzekerheid (par. 6.4.1) en waterveiligheid (par 6.4.2.)?

6.4.1 Zoetwaterzekerheid

In Appendix D is een analyse opgenomen naar klimaatverandering, zeespiegelstijging en zoetwaterzekerheid van de duinkust. De tekst in deze paragraaf betreft een samenvatting van de analyse in Appendix D.

Kustuitbreiding resulteert, door een toenemend infiltratieoppervlak boven de hoogwaterlijn, in groei van de zoetwaterbel. Deze groei kan, afhankelijk van de mate van uitbreiding, de door zeespiegelstijging veroorzaakte krimp compenseren en komt bovenop een vernattende trend in de neerslag en grondwateraanvulling. Kustuitbreiding is dus positief voor de zoetwaterzekerheid in de kustregio.

De groei van de zoetwaterbel gaat echter gepaard met een stijgende freatische grondwaterstand. Deze stijging komt bovenop de stijging door grotere grondwateraanvulling en zeespiegelstijging. Deze vernatting van het duin heeft gevolgen voor de natuur in de natte duinvalleien (par. 6.3), maar ook voor infrastructuur voor de drinkwaterbedrijven in het duin en functies in de binnenduinstrand. Als geïsoleerde inunderende laagtes verbonden raken en gaan afstromen naar het achterland of wanneer een duingebied in belangrijke mate wordt gedraineerd, dan kan het zoetwatervolume minder snel groeien of zelfs afnemen. In het geval van een relatief klein duinsysteem met ondiepe zoetwaterlens kan upconing van zout water optreden onder het drainerende systeem.

Naast drainage en afstroming naar het achterland kan ook afstroming in zeewaartse richting optreden. Bij grootschalige zeewaartse uitbreidingen hangt het effect op het zoetwatervolume daarom sterk af van de mate van afsnoering van strandvlakten door al dan niet natuurlijke duinvorming. Bij meer afsnoering kan minder zoetwater het systeem via oppervlakkige afstroming en duinbeken verlaten en zal de groei van de zoetwaterlens groter zijn dan bij een open systeem. Daarnaast neemt bij verder gaande afsnoering ook de kans op overstroming met zeewater en verzilting van de zoetwaterlens af.

Wanneer strandvlakten niet afsnoeren zal een groot deel van het neerslagoverschot kunnen afwateren over maaiveld of via een beek/geul en zal de opbouw van zoet grondwater en stijging van de grondwaterstand geringer zijn. Daarbij kunnen zich langs hogere duinen zoete kwelzones ontwikkelen met een relatief stabiele waterstand (kwelvalleien). In zulke open strandvlaktes kan ook overstroming optreden met zeewater wat de verzoeting afremt. Langdurig open kustduinsystemen zijn daarmee uit oogpunt voor duinnatuur interessant omdat zich daar complexe zout-zoet gradiënten kunnen ontwikkelen.

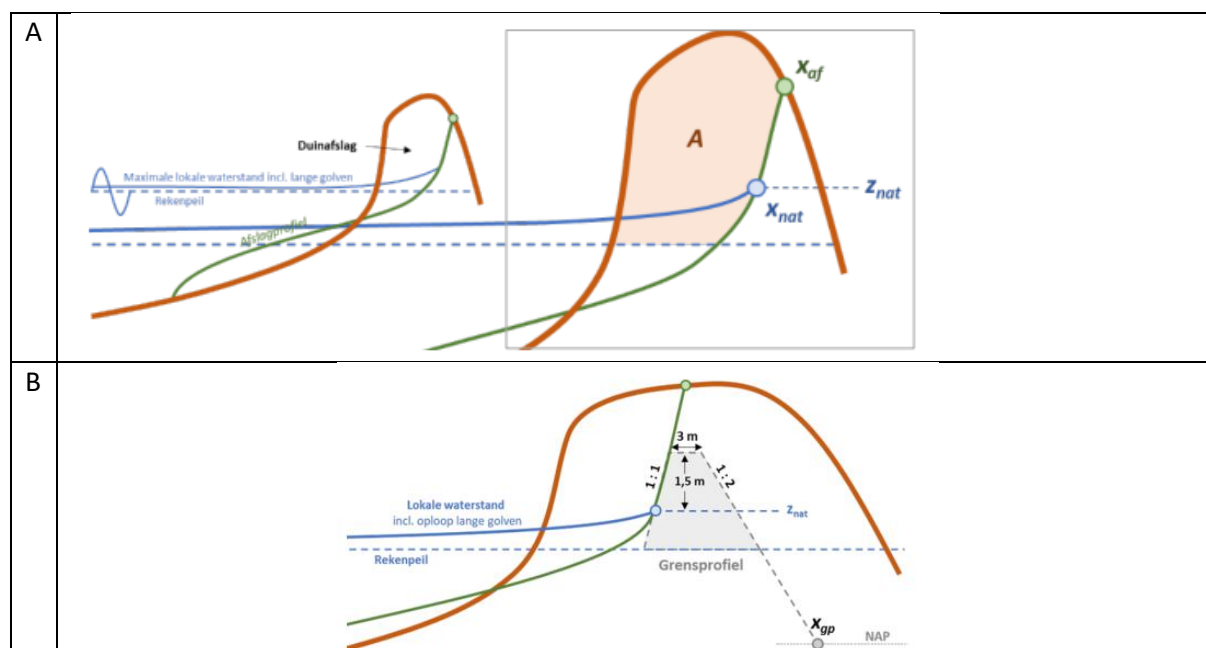
Zonder handhaving van de kustlijn zal zeespiegelstijging leiden tot kusterosie en daarmee tot afname van de lokale zoetwatervoorraad. Wanneer door suppletie en andere vormen van kustverdediging de kustlijn wordt gehandhaafd, zal bij gematigde zeespiegelstijging de zoetwaterbel beperkt afnemen en de grondwaterstand in het duin stijgen. Als de vernattende trend qua grondwateraanvulling doorzet heeft dit in gebieden zonder open infiltratiesystemen eveneens een remmend effect op de afname van de zoetwaterlens. Bij zeewaartse uitbreiding van de kust zal de zoetwaterlens zelfs bij sterkere zeespiegelstijging kunnen groeien.

In gebieden met (peilgestuurde) infiltratie en terugwinning van oppervlaktewater voor de drinkwatervoorziening dempt de drinkwaterproductie in sterke mate de verandering van freatische standen. Hoe wijdverspreid dit effect is hangt samen met de situering en schaal van infiltratieplassen en terugwinputten en kanalen. Bij compacte systemen is het effect lokaal terwijl bij meer verspreide systemen zoals Meijndel het effect veel verder uitstraalt. Bij grotere grondwateraanvulling en hogere freatische standen remt de infiltratie uit de panden en neemt het aandeel duinwater in de onttrekking toe. Tenslotte treedt in een aantal duingebieden autonome krimp van de zoetwaterlens op. Dit wordt veroorzaakt door historische ingrepen in de waterhuishouding van het achterland zoals inpolderingen en peilverlagingen waarmee de zoetwaterlens nog niet in evenwicht is. Zeewaartse uitbreiding kan ook een deel van deze autonome krimp compenseren.

Zie Appendix D voor de verdere hydrologische onderbouwing en referenties.

6.4.2 Waterveiligheid

De duinen, zijn primaire keringen en bieden bescherming tegen overstromingen bij hoogwater vanuit met name de Noordzee en de Waddenzee. Met het Beoordelings- en ontwerpinstrumentarium (BOI) worden de primaire keringen elke 12 jaar beoordeeld of deze voldoen aan de norm. Vanaf 2023 gebeurt dit met het model XBeach (RWS, 2023). Bij de beoordeling wordt gekeken of duinafslag en vervolgmechanismen (geotechnische instabiliteit en erosie van kruin/binnentalud door golfoploop/-overslag) kunnen leiden tot het falen en doorbreken van de zandige waterkering en overstroming van het achterland (Figuur 27a). Als ten gevolge van deze processen onder omstandigheden die gelden bij de norm nog een restduin met specifieke dimensies kan worden ingepast (Figuur 27b) kan ervan worden uitgegaan dat het duin niet zal doorbreken. Als in het restprofiel geen grensprofiel meer kan worden ingepast, voldoet het duin niet aan de norm en moet deze worden versterkt. Het versterken van keringen, en dus ook duinen vanuit oogpunt van waterveiligheid gebeurt in het kader van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP).



Figuur 27. A) Schematische weergave van de relevante kwantitatieve indicatoren in relatie tot het duinafslagproces. B) Schematische weergave van de vorm en de dimensies van het zogenaamde grensprofiel. (Uit: Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium (RWS, 2023).

Binnen het programma Kustlijnzorg wordt de kustlijn dynamisch gehandhaafd door middel van suppleties. Uitgangspunt in het beleid is dat de kust zodanig beheerd wordt dat natuurlijke processen zoveel mogelijk gehandhaafd blijven. De wind en zee krijgen de ruimte om sediment te verplaatsen tussen de ondiepe zee, het strand en de duinen. Dit leidt tot een natuurlijk, gevarieerd en robuust kustlandschap dat kan meegroeien met de stijgende zeespiegel. De ligging van de kustlijn wordt jaarlijks gemeten.

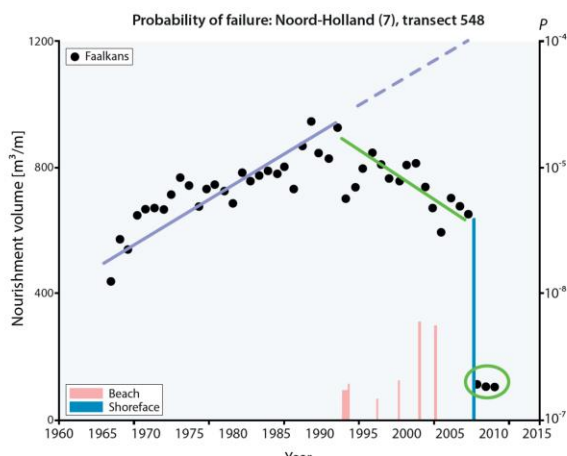
Voor het beantwoorden van het waterveiligheidsaspect van deze kennisvraag gaan we weer uit van de twee soorten van mega-suppleties: zeewaartse uitbreiding met strandvlakte en zeewaartse uitbreiding met duinenrij of duinversterking

Met betrekking tot het type duinenrij/-versterking, is het evident dat het zand zal bijdragen aan de waterveiligheid. Door te suppleren in het duingebied is er een instante versterking van het duingebied. Immers – een hoger en/of breder duin zal minder snel doorbreken, en kan meer afslag verduren. Bovendien zijn de meeste van de duinsuppleties dicht beplant, zodat er geen verstuiwing kon optreden (en het duin daarmee dus ook niet erodeert). De Hondsbossche Duinen en Voorne zijn daarop een uitzondering. Daarbij is er bij het ontwerp expliciet aandacht besteed aan dynamiseren van de zeereep. Alle duinsuppleties zijn uitgevoerd met het oog op veiligheid (KPZSS, 2024).

Voor het type van strandvlakte is het effect op waterveiligheid indirecter. Het effect is tweezijdig: ten eerste kan een zeewaartse uitbreiding zorgen voor de verplaatsing van de afslaglocatie (1), en ten tweede kan de aanwezigheid van extra zand zorgen voor een versterking en verhoging van de duinenrij (2). Wij behandelen beide opties hieronder.

Effect van strand op afslaglocatie.

Een megasuppletie in de vorm van een strandvlakte heeft als gevolg dat de kustlijnpositie zich zeewaarts verplaatst. Figuur 28 illustreert de verandering in faalkans van de eerste duinenrij voor een locatie langs de Noord-Hollandse kust. De figuur laat zien dat in de periode 1965 - 1992 de faalkans van de waterkering toeneemt (paarse trendlijn), wat betekent dat de kustveiligheid afneemt. Na strandsuppleties in de jaren daarna (1993 - 2007) neemt de faalkans geleidelijk aan af, weergegeven met de groene lijn. De vooroeversuppletie in 2008 zorgde voor een sterke afname van de faalkans. De faalkansen in de jaren na 2008 zijn significant kleiner (omcirkeld met groen), wat duidelijk aangeeft dat (mega)suppleties bijdragen aan de waterveiligheid op deze locatie.



Figuur 28. Het effect van strandsuppleties (roze staaf) en vooroeversuppleties (blauwe staaf) op de faalkans van de eerste duinenrij. Het suppletievolume is op de linkeras af te lezen. De zwarte bolletjes in de figuur geven de faalkans weer. De faalkans is op de rechteras weergegeven. Uit Deltares (2014), op basis van Giardino et al., (2012).

HKV (2024) heeft een analyse uitgevoerd naar de veiligheid van de kustlijn, waarbij de ligging van de MKL (momentane kustlijn, de ligging van de kustlijn in een bepaald jaar) direct wordt gelinkt aan de waterveiligheid, oftewel, de afslaglocatie. Uit de resultaten volgt dat de relatie tussen afslaglocatie en MKL-positie gemiddeld genomen 0.43 bedraagt. Dit houdt in dat een 10 meter zeewaartse verplaatsing van MKL-positie gemiddeld genomen zorgt voor een zeewaartse verplaatsing van de afslaglocatie van 4,3 meter. Rondom dit gemiddelde zit een vrij grote spreiding, welke lokaal sterk kan verschillen, en hieronder leggen wij de verschillen uit.

In de rapportage van HKV (2024) wordt geconcludeerd dat bij 69% van de gebieden waterveiligheid geen enkel probleem is, en dat de kustlijn robuust genoeg is met ruime marges voor veiligheid. In deze gebieden zullen (mega)suppleties dus niet bijdragen aan een toename van de waterveiligheid, simpelweg omdat de gebieden al volledig veilig zijn. In 21% van de gebieden is er een minder grote marge. In 2/3 van deze gebieden is er een sterke correlatie tussen kustlijnpositie en waterveiligheid. Dit betekent dat als de kustlijn wordt uitgebreid, door (mega)suppleties, de waterveiligheid toeneemt.

In de overige 1/3 is er geen sterke correlatie tussen kustlijnpositie en waterveiligheid. Deze gebieden bevinden zich op Schiermonnikoog, Terschelling, Hondsbossche Duinen, Voorne en de westkop van Goeree. De redenen hiervoor zijn onbekend, maar er wordt gespeculeerd dat bij aangelegde gebieden, zoals de Hondsbossche duinen, er nog geen natuurlijk evenwicht is ontstaan. Omdat de Hondsbossche Duinen uitsteken ten opzichte van de rest van de Noord-Hollandse kustlijn, treedt er erosie van de strandvlakte op, terwijl de duinen aangroeien en zich zeewaarts verplaatsen. Dit soort specifieke lokale omstandigheden kunnen resulteren in een zeewaartse verplaatsing van de afslagpositie terwijl de MKL in landwaartse richting verplaatst. Dit levert een situatie op waarbij de kustlijnpositie (door suppleties) niet direct gerelateerd is aan waterveiligheid. We merken op dat een (tijdelijk) terugtrekkende kustlijn niet betekent dat niet aan de normen van waterveiligheid wordt voldaan. Zoals eerder genoemd wordt de waterveiligheid in een apart spoor elke 12 jaar beoordeeld.

Na een megasuppletie, kan de veranderde helling van het kustprofiel in meer of mindere mate gevolgen hebben voor de mate van afslag. Een verandering (versteiling) van het kustprofiel zou op kunnen treden door zeespiegelstijging (Deltares, 2023).

De Vries et al. (2012) geeft aan dat niet alleen de breedte van het strand, maar ook de breedte van de vooroever effect heeft op de hoeveelheid verstuing en groei van het duin. In relatief steile kustprofielen is relatief weinig groei van duinen waargenomen. Vooroeversuppleties kunnen dus ook bijdragen aan de toename van de waterveiligheid. Het is echter onbekend hoe de relatie tussen helling en afslag zich exact kenmerkt, en vervolgonderzoek is nodig om de relatie tussen helling en afslag te kwantificeren.

Versterking en verhoging van de duinenrij door doorstuiving

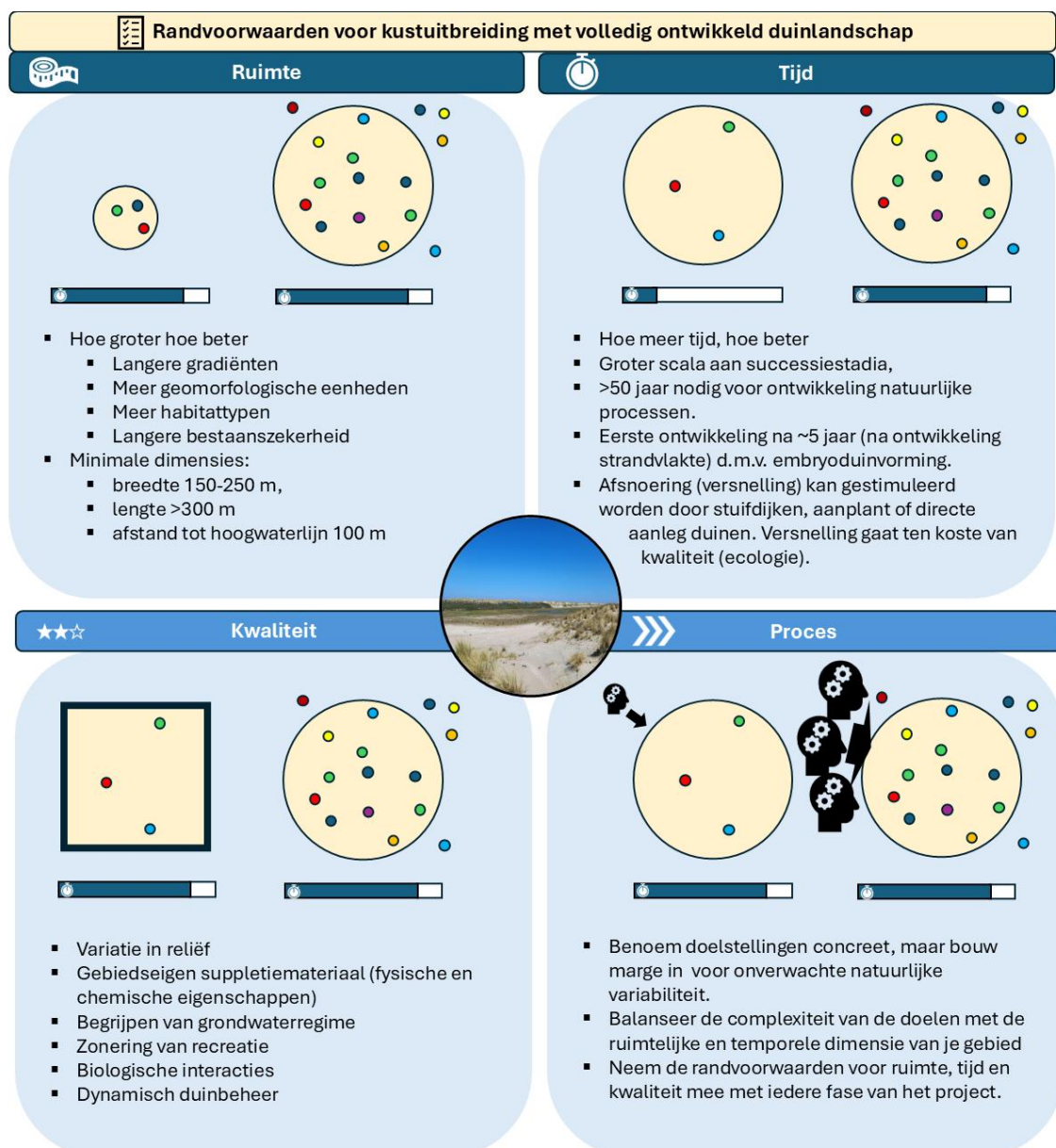
In eerdere studies is gezien dat gemiddeld een toename van aanzanding in de duinen plaatsvindt als gevolg van suppleren (Arens et al., 2010 en Deltares, 2019). Het effect is echter zeer locatiespecifiek (KPZSS, 2024). Gemiddeld wordt circa 30% van het suppletiezand teruggevonden in de duinen (Arens, 2009), en zal dus bijdragen aan een toename van de waterveiligheid. Een toe of afname van ongeveer 25 meter duin gaat samen met een verandering in de overschrijdskans van de duinwaterkering met een factor 10 (van Dongeren et al., 2008).

De exacte korrelgrootte van de (mega)suppletie is niet van belang voor waterveiligheid. Het zand dat eolisch wordt getransporteerd naar de duinen is relatief fijn, en zal eerder worden weggeslagen bij een storm. Echter, als gevolg van het afslagproces wordt het zand gemixt, en komt het onder andere

onder het originele grovere sediment. Bovendien, als er voldoende depositie plaatsvindt, zal de afslag alleen nog maar in dit aangegroeide gedeelte plaatsvinden, en draagt het alsnog bij aan de veiligheid van het originele duin (Ecoshape., 2018a en 2018b).

7 Richtlijnen voor ontwerp strandvlakte en duin

Dit hoofdstuk geeft richtlijnen voor toepassing van zeewaartse kustverdediging (megasuppleties) voor het creëren / sturen van landschapsvormen en duinnatuur. De richtlijnen zijn afgeleid uit de analyses van geomorfologie en habitatontwikkeling in de studiegebieden, gegevens en werkliteratuur zoals in voorgaande hoofdstukken gerapporteerd. Uit de analyse van geomorfologische eenheden bleken met name de aspecten tijd en ruimte van belang. Voor habitatontwikkeling komt er naast aspecten van tijd en ruimte nog dimensie van kwaliteit bij. Verder zijn er enkele procesaspecten die we afleiden. De richtlijnen zijn samengevat in Figuur 29. De vervolparagrafen van dit hoofdstuk beschrijven elk van deze aspecten.



Figuur 29. Schematische weergave van de aspecten die een rol spelen bij een succesvolle megasuppletie.

7.1 Ruimte

Een algemene richtlijn is: hoe groter hoe beter. Een groter oppervlak geeft meer ruimte voor natuurlijke ontwikkeling en processen, geeft een breder scala aan gradiënten, kansen op een vollediger landschap en meer diversiteit, wat wordt weerspiegeld door een groter aantal geomorfologische elementen en habitattypen. Meer ruimte maakt zonering (zie hieronder) makkelijker en biedt ook de mogelijkheid functies (recreatie en natuur) in de ruimte te scheiden.

Als voorbeeld: Voor een goed functionerend afslaglandschap (eroderend), waarbij de zeereep paraboliseert, parabolen landwaarts migreren in een transgressief duinlandschap (zoals wij vermoeden dat het parabolienlandschap dat op veel plekken langs de kust aanwezig is, is ontstaan) is de schaal van de huidige Zandmotor te klein. De hoeveelheid zand die in beweging moet komen is een orde groter dan op dit moment in afslagsituaties langs de Nederlandse kust (de Zandmotor, maar ook het Noorderstrand op Schiermonnikoog, de Cupidopolder op Terschelling) te zien is. De hoeveelheid sediment die hiervoor nodig is, is moeilijk in te schatten en ook afhankelijk van de diepte van de onderwateroever. Een ruwe schatting is dat een mega-suppletie voor een goed functionerend afslaglandschap 2-3 keer zo ver in zee zou moeten steken als de Zandmotor en kustlangs zich minstens over een vergelijkbare afstand (4 km) zou moeten uitstrekken, maar waarschijnlijk over een grotere afstand. Een betrouwbaardere schatting zou door kustmorfologen moeten worden gemaakt. Het benodigde volume zal naar (zeer ruwe) schatting 50-100 miljoen m³ bedragen.

De schaal van de Zandmotor is op zich voldoende voor de ontwikkeling van een systeem met embryonale duinen en onvolledig en volledig afgesnoerde valleien. Omdat de Zandmotor niet onderhouden wordt, is het alleen de vraag of er genoeg tijd is voor deze ontwikkeling, of dat tegen de tijd dat afsnoering gaat optreden en de hydro- en haloseries tot ontwikkeling komen, de breedte door afslag te smal is geworden.

Als megasuppleties worden aangelegd met een natuurdoel (eventueel in combinatie met een veiligheidsdoel en een recreatiedoel) biedt de aanleg of via indirecte weg laten ontstaan van een strandvlakte de beste kansen op het ontstaan van een volledig systeem. Zie voor vereisten voor een optimale aanleg hieronder.

- Voor een onvolledig systeem met voornamelijk embryonale duinen zijn naar schatting de volgende minimale dimensies van de strandvlakte nodig: breedte kustdwars 150-250 m, >300 m kustlangs, minimale afstand tot de hoogwaterlijn 100 m (dus totale strandbreedte 250-350 m), aanleghoogte 2-2.5 m NAP, helling 0.17°.
- Als meer ruimte beschikbaar is kunnen embryonale duinen doorgroeien tot een duinenrij waarbij een deel van de strandvlakte wordt afgesnoerd. De ontwikkeling van vegetatie is zout tot brak. Naar schatting zijn dan de volgende dimensies nodig: breedte kustdwars 200-350 m, >500 m kustlangs, minimale afstand tot hoogwaterlijn 100 m, aanleghoogte 2-2.5 m NAP, helling 0.17°.
- Als nog meer ruimte beschikbaar is zet de ontwikkeling nog verder door richting volledige afsnoering, met ontwikkeling van een brak tot zoete vegetatie. De benodigde dimensies zijn vergelijkbaar met die voor onvolledige afsnoering, alleen is het voor de ontwikkeling waarschijnlijk gunstiger wanneer de afstand tot de hoogwaterlijn groter is, geschat op 200 m.

7.2 Tijd

Natuurlijke ontwikkeling kost tijd, en hoe complexer de na te streven ecosystemen/landschappen zijn, hoe meer tijd nodig is voor deze tot ontwikkeling komen. Om een volledig systeem door natuurlijke processen te laten ontstaan is veel tijd nodig, orde 50 jaar. Embryonale duinen kunnen al

binnen vijf jaar tot ontwikkeling komen. Na aanleg van een strekdam duurt dit langer, 15-30 jaar, omdat eerst een strandvlakte van voldoende dimensie moet ontstaan. Versnelling is mogelijk door bijvoorbeeld duingroei te stimuleren met stuifdijken of aanplant, of directe aanleg van duinen. Het proces van afsnoering kan hiermee flink verkort worden. Aanplantpatronen kunnen jarenlang zichtbaar blijven, zelfs met flinke overstuiving. Kunstmatige duinvormen, zoals strak aangelegde stuifdijken blijven als kunstmatig element in het landschap herkenbaar. Aanplant, stuifdijken of directe aanleg kunnen ook op zodanige wijze worden ingezet dat een meer natuurlijke morfologie ontstaat. Kunstmatige elementen kunnen binnen een tiental jaren een veel natuurlijker morfologie krijgen onder invloed van overstuiving, afhankelijk van de hoeveelheid zand die beschikbaar is voor overstuiving. Desondanks kan hier een aanplantpatroon in zichtbaar blijven. Aanleg van een kunstmatig duin of duinlandschap scheelt tijd maar gaat ten koste van de kwaliteit (zie paragraaf 7.3).

7.3 Kwaliteit

Voor de ontwikkeling van complete duin- en kustecosystemen waarbij een range aan kenmerkende habitattypen naast en na elkaar kunnen voorkomen is voldoende tijd (en ruimte) maar met name ook een juiste kwaliteit noodzakelijk. Deze kwaliteit wordt onder andere bepaald door de wijze van suppleren, type materiaal, biologische interacties, gebruiksfuncties en allerlei (externe) drukactoren zoals hoge stikstofdepositie. In de volgende alinea's worden voor een aantal van deze kwaliteitselementen beknopt richtlijnen besproken ten dienste van het uitvoeren van megasuppleties met een zo groot mogelijk positief effect op de natuurkwaliteit. Er wordt ingegaan op: hoogte en variatie in (micro)reliëf; fysische en chemische samenstelling; (grond)waterregime en drinkwaterwinning; recreatie en recreatie infrastructuur; biologische interacties; dynamisch duinbeheer en externe drukfactoren.

Hoogte en variatie in (micro)reliëf

De maximale suppletiehoogte moet lager liggen dan gemiddeld springtij. Er is dan nog (voldoende) golfwerking voor verplaatsing en sortering van materiaal landinwaarts (verstuiving en zoutspray), waardoor suppletie maximaal ten goede kan komen aan het bestaande duingebied.

Het realiseren van variatie in aanleghoogte binnen een gebied kan een aangrijpingspunt zijn voor het ontstaan van (toekomstige) kerven en washovers, of het gedeeltelijk afgesloten raken van strandvlaktes.

Fysische en chemische samenstelling

Door het toepassen van gebiedsvreemd materiaal in een aantal van de studiegebieden (o.a. Van Dixhoorndriehoek, Voorne Punt met klei en grind en Spanjaardsduin, Zandmotor met recalcitrante schelpenvloertjes) is de ontwikkeling van zowel geomorfologische elementen als natuurwaarden niet optimaal, het is daarom belangrijk dat het suppletiemateriaal vergelijkbaar is met materiaal dat onder natuurlijke condities op de kust terecht zou komen (wanneer er sprake zou zijn van een aangroeiende kust). Het gaat hierbij om:

- Korrelgrootte (zeefkromme / D50)
 - Kalkhoudendheid (rijk voor Rhenodunaal, armer voor Wadden)
 - Zoveel mogelijk vrij van artefacten zoals grote hoeveelheden grof schelpmateriaal, klei en puin.
- Dit kan geborgd worden door relatief lokaal zand te winnen en toe te passen in een vooroeversuppletie waardoor op natuurlijke wijze sedimentsortering plaatsvindt zodat materiaal naar de kust getransporteerd wordt en goed gesorteerd zand de duinen in geblazen wordt (zie Hondsbossche Duinen)

(Grond)waterregime en drinkwaterwinning⁶

Grootschalige strandvlakte suppleties kunnen het lokale grondwatersysteem sterk beïnvloeden. Een deugdelijke modelstudie en optimalisatie van het ontwerp is nodig om te:

- voorkomen dat zoute kwel indringt achter de zeereep wanneer dit voor bestaande natuurwaarden en/of drinkwaterwinning onwenselijk is.
- Zorgen dat verandering in de waterhuishouding ten goede komt aan bestaande en nieuw te vormen elementen: voorkom dat bestaande waardevolle duinvalleien 'verdrinken' of dat nieuwe afgesnoerde strandvlaktes 'droog' komen te staan (zie studiegebied Spanjaardsduin)
- Voorkomen dat door een generieke grondwaterstandverhoging ontwatering via bestaand oppervlaktewater toeneemt waardoor de zoetwaterlens verkleint.
- Goed inzicht te hebben in de te verwachten grondwaterstand, zeker wanneer de suppletie (mede) tot doel heeft dat vochtige/natte ecosystemen tot ontwikkeling komen.

Recreatie en recreatie infrastructuur

Al bij ontwerp moet rekening gehouden worden met de (mogelijke) impact van recreatie op de ontwikkelingsmogelijkheden (zowel morfologisch als ecologisch) van een suppletie:

- Recreatie infrastructuur zoals fietspaden, strandhuisjes en strandpaviljoens zijn vaste, harde elementen in het landschap die sterke beperkingen kunnen opleggen aan (gewenste) dynamische processen van doorstuiving en duinontwikkeling.
- Strandbeheer (machinaal reinigen) van stranden en strandvlakten en frequent verkeer van 4x4 voertuigen, trekkers etc. remt de ontwikkeling van embryonale duinen en daarmee ook de mogelijkheid voor het ontstaan van een nieuwe zeereep en (deels) afgesnoerde strandvlakten, zoals duidelijk te zien is bij de ontwikkeling op de Zandmotor. Zo snel mogelijk na ontstaan/aanleg zou gezoneerd moeten worden om dit te voorkomen. Waar embryonale duinen ontstaan zou leidend moeten zijn voor toegestane rijbewegingen, in plaats van dat rijbewegingen bepalen waar embryonale duinen kunnen ontstaan.
- Reguliere betreding door recreanten van kwetsbare gebieden zoals vochtige duinvalleien en droge duingraslanden zorgt voor verstoring van flora en fauna en moet voorkomen dan wel gereguleerd worden.

Zeker in dungebieden van Holland kan lokaal de recreatiedruk erg hoog zijn. Maatregelen om te voorkomen dat dit een te grote negatieve invloed heeft op natuurontwikkeling zijn bijvoorbeeld:

- Zonering van recreatieve activiteiten
- Beperkte of geen openstelling van gebiedsdelen
- Strandbeheer aanpassen of achterwege laten

Ten laatste dient men vooral realistisch te zijn: niet alles kan overal en op bepaalde locaties zal een suppletie door o.a. recreatie invloed minder opleveren dan op andere plekken. Het zou goed hiervoor plekken met de minste potentie voor natuurontwikkeling te reserveren en omgekeerd de locaties met hoge potentie voor natuurontwikkeling hiervan te vrijwaren.

Biologische interacties

Uiteindelijk draait het bij hoog biodiverse natuur om de soortenrijkdom van flora en fauna. Als kenmerkende soorten zich niet kunnen vestigen of handhaven zal het ook niet mogelijk zijn om voldoende areaal kwalificerende habitattypen te realiseren. Soorten interacteren met elkaar (begrazing, prooi-predator, parasiet-gastheer etc.) en met hun fysieke omgeving (graven, vastleggen

⁶ Zie Appendix 4 voor een gedetailleerde analyse van mogelijke effecten van suppleties op het grondwaterregime.

zand, regulering vochthuishouding etc.). Als specifieke soorten of functionele soortgroepen ontbreken (of juist overheersen), kan dat betekenen dat een ontwikkeling van een bepaald habitatype niet duurzaam mogelijk is in een gebied.

- Stimuleer natuurlijke begrazing (o.a. konijnen) om bijvoorbeeld dominantie van duindoornstruwelen te voorkomen en pas gericht, kleinschalig beheer toe als dat niet mogelijk is.
- Houd rekening met aanwezigheid en afstand tot bronpopulaties van kenmerkende (en sleutelsoorten) en lokale limiterende factoren voor dispersie. In bepaalde situaties kan introductie (bijv. via maaisel) een goede oplossing zijn.

Dynamisch duinbeheer

Onder dynamische condities is de toevoegende waarde van suppleties voor instandhouding en ontwikkeling van duinnatuur het grootst. Het is dan ook essentieel dat in ontwerp, aanleg en beheerfase rekening gehouden wordt om dit zoveel mogelijk te stimuleren:

- Voorkom (grootschalig) vastleggen van zand door aanplant door helm, omdat hiermee de dynamiek binnen en landwaarts van de suppletie volledig wordt stil gelegd. Waar noodzakelijk kan beter materiaal ingeëgd worden of gebruik worden gemaakt van rietpoten (Voorne Punt, Spanjaardsduin); voorkom indien mogelijk rigide aanplant patronen die vaak nog jaren zichtbaar blijven. Variëren met aanplant dichtheid, zo mogelijk afgewisseld met kale plekken, kan al zorgen voor enige dynamiek en een minder kunstmatige morfologie. Volledige fixatie is over het algemeen niet nodig, enige dynamiek betekent niet gelijk een afname van de veiligheid, maar is gunstig voor een natuurlijke aanpassing van een kunstmatig aangebracht reliëf, natuurlijkere overgangen en variatie in gradiënten van bijvoorbeeld overstuiving.
- Neem aanvullende maatregelen in bestaande zeereep (bijv. maken van kerven, verwijderen van vegetatie) om de positieve gevolgen van suppleties op achterliggende, bestaande duingebied te versterken.

Statisch, aangelegd duinlandschap (Kustwerk Katwijk), waar geen ruimte is voor dynamische processen leveren zeer beperkte meerwaarde voor de natuur. In dergelijke gevallen kan de landschappelijke inpassing van harde infrastructuur (kustverdediging of anderszins) een hele valide reden zijn om voor een dergelijk oplossing te gaan, maar als (ook) realisatie van natuurdoelen nagestreefd dient te worden kan beter voor een andere oplossing gekozen worden.

Externe drukfactoren

In grote delen van het Nederlands kustgebied en dan met name langs de Hollandse kust wordt de kritische depositiewaarde van habitattypen zoals grijze duinen en vochtige duinvalleien overschreden. Het afgelopen decennium is de totale stikstofdepositie niet meer sterk afgenomen en de verwachting is ook niet dat dit (onder huidige beleid) de komende jaren sterk zal verbeteren (RIVM, 2024). Er dient dan ook rekening te worden gehouden dat natuurlijke ontwikkelingsreeksen (bijv. van witte duinen richting grijze duinen en vochtige duinvalleien) niet per se zullen optreden, of in ieder geval niet met bijbehorende complete, soortenrijke vegetatietypen (kwalificerend voor habitattypen).

Naast stikstofdepositie zijn er nog andere bovenregionale factoren zoals klimaatdisruptie en zeespiegelstijging die niet zonder gevolgen zijn voor de ontwikkeling van duin- en kusthabitats.

7.4 Proces

De doelstellingen bij een project op gebied van natuur zijn niet altijd concreet benoemt. Projecten zijn veelal geïnitieerd vanuit waterveiligheid en kustverdediging. Daarbij zijn de indicatoren om de

ecologische doelstellingen en landschapsontwikkelingen te monitoren vaak niet helder. Het definiëren van doelstellingen en bijbehorende indicatoren om te bepalen of doelstellingen worden behaald of wanneer moment van ingrijpen/bijsturen nodig is belangrijk. Een voorbeeld waarbij wel duidelijke doelstellingen zijn gedefinieerd op gebied van ecologie is het gebied van Spanjaardsduin. In dit gebied zijn de doelstellingen zo strikt geformuleerd in termen van ontwikkeltijd en ruimte dat de uitvoerbaarheid lastig blijkt. Bij aanleg van een strand en duinlandschap is het de vraag of heel strikte natuurdoelen gesteld moeten worden, over aantal hectares te realiseren habitatype of dat er meer gewerkt moet worden vanuit het creëren van een landschap waarbinnen een variatie aan habitatypen kan ontstaan. Dan kan er meer aan toeval en natuurlijke ontwikkeling overgelaten worden.

Bij het stellen van doelen is het reserveren van meer ruimte dan de benodigde ruimte om de doelen te bereiken raadzaam om onverwachte ontwikkelingen op te kunnen vangen. Hiermee kan worden voorkomen dat er teveel kunstmatige ingrepen nodig zijn en kan er ook een en ander aan toeval en natuurlijke ontwikkeling overgelaten worden. Dit geldt ook voor de factor tijd. Het tijdpad voor het behalen van doelen moet realistisch zijn en ruimte bieden om te kunnen omgaan met natuurlijke variabiliteit die de ontwikkeling kan vertragen. . Complexere landschappen vereisen een complexer denkproces, meer inzicht in interacties, een lange termijn visie en planning etc. Dit vraagt een langjarig beleid (> 25 jaar).

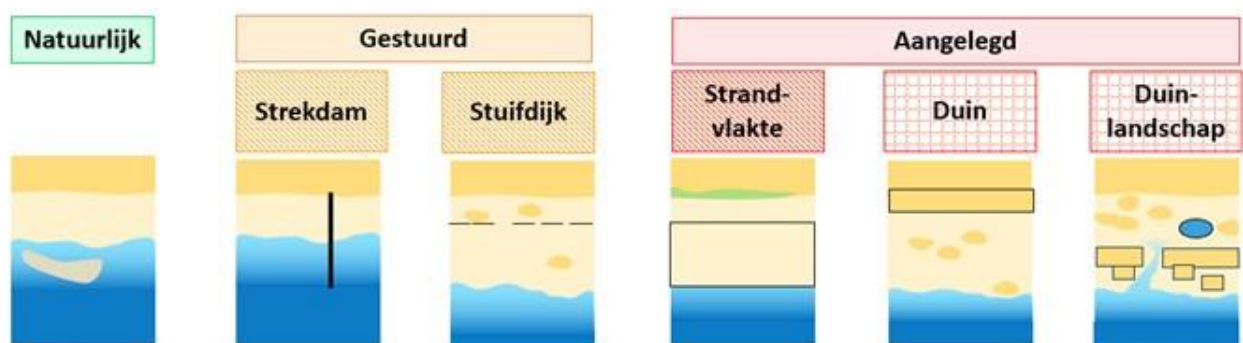
De ecologische en landschapsontwikkelingen voor een project dienen niet alleen bij een programma van eisen door inhoudelijke mensen te worden opgesteld. Bij aanbesteding van het project dient ook een controle te worden gedaan op welke manier in de aanbidding aan deze inhoudelijke eisen wordt voldaan en hoe dit is geborgd en kan worden gemonitord.

8 Conclusies en Aanbevelingen

8.1 Conclusies

Aan de hand van 4 kennisvragen, gericht op 1) de behoeften voor volledig ontwikkelde duinnatuur in gebied van zeewaartse uitbouw; 2) mogelijke effecten van zeewaartse kustuitbreiding op het achterliggend bestaande duingebied 3) beschouwing van effecten van zeewaartse kustuitbreiding op gradiënten in zoutspray, eolische zanddynamiek en hydrologische condities en 4) effecten van zeewaartse kustuitbreiding met megasuppleties op zoetwaterzekerheid en waterveiligheid beantwoorden we de centrale vraag in dit onderzoek: Hoe kunnen zeewaartse oplossingen zo worden vormgegeven dat ze optimaal bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe natuur en/of verbetering van bestaande natuurwaarden?

Voor de beantwoording van kennisvraag 1 en 2 zijn in dit onderzoek ontwikkelschema's opgesteld voor 6 typen van ontstaanswijzen voor een zeewaartse kustuitbreiding (Figuur 30): 1) zeewaartse kustuitbreidingen die van nature zijn ontstaan, 2) zeewaartse kustuitbreiding die is ontstaan na de aanleg van 2) een strekdam; of 3) een stuifdijk; zeewaartse uitbreiding die is ontstaan door directe aanleg van 4) een strandvlakte, 5) een duin en 6) een duinlandschap.



Figuur 30. Schematische weergave van zeewaartse kustuitbreidingen die in dit onderzoek zijn beschouwd.

Voor het creëren van een zeewaartse kustuitbreiding zijn er twee soorten te onderscheiden: 1) zeewaartse uitbreidingen waarbij een strandvlakte wordt aangelegd (direct, dan wel indirect) en 2) zeewaartse uitbreidingen waarbij een duinenrij/duinversterking (zeereep) wordt aangelegd, direct of indirect.

Een constatering in dit onderzoek is dat aangelegde gebieden een geringere diversiteit aan geomorfologische eenheden en habitattypen bevatten in vergelijking met de natuurlijke en gestuurde gebieden. Dit is te verklaren vanuit één of een combinatie van vier essentiële factoren/randvoorwaarden: ruimte, tijd, kwaliteit en proces.

- 1) **Ruimte.** Voor de aanleg van nieuwe natuur of het versterken van bestaande natuurwaarden is voldoende ruimte cruciaal. In de aangewezen proefgebieden blijkt de oppervlakte vaak te beperkt om een volledig kustlandschap te laten ontstaan. Ook binnen een kleinere ruimte kan een waardevol landschap groeien, maar dit bestaat dan uit slechts enkele elementen en mist volledigheid.
- 2) **Tijd.** Geomorfologische en ecologische processen vragen tijd. Bepaalde landschapselementen zoals het ontwikkelen van een strand en embryonale duinen ontstaan relatief snel, maar het vormen van een aaneengesloten duinenrij kost aanzienlijk meer tijd. Voor ecologische ontwikkeling voorbij de pioniersfase zijn bodemvormende processen noodzakelijk. Deze komen

pas na verloop van tijd op gang. Voor een volwaardig kustlandschap is dan ook een periode van meer dan 50 jaar nodig.

- 3) **Kwaliteit.** De ontwikkeling van het landschap hangt sterk af van de kwaliteit van de randvoorwaarden. Denk hierbij aan: Fysische samenstelling van het suppletie materiaal; Hoogteverschil en micro-reliëf; chemische samenstelling suppletie materiaal; zonering van recreatie; begrijpen grondwaterregime; biologische interacties; dynamisch duinbeheer
- 4) **Procesmatig.** Veel projecten zijn primair opgezet vanuit waterveiligheid en kustverdediging. Ecologische en landschappelijke doelen worden tegenwoordig wel vaker meegenomen, maar deze zijn vaak onvoldoende concreet en staan niet altijd in verhouding tot de beschikbare ruimte, tijd en kwaliteitsfactoren die nodig zijn om de ecologische en landschappelijke doelen te kunnen realiseren. Het formuleren van een doelstelling voor een volledig ontwikkeld landschap binnen een beperkte zone, met ongeschikt suppletie materiaal en een termijn van slechts 25 jaar, is niet realistisch. Complexe landschappen vragen om een diepgaand procesdenken, inzicht in onderlinge interacties en een langetermijnvisie met bijbehorende planning.

In de onderzochte gebieden is geen merkbare kwaliteitsverbetering in het achterland (kennisvraag 2) vastgesteld die verband houdt met de zeewaartse kustuitbreiding. Toch biedt deze uitbreiding met megasuppleties wél potentie om een impuls aan het achterliggende landschap te geven. Dit kan gerealiseerd worden door het ontstaan van gradiënten in zoutspray, windgestuurde zandverplaatsing en veranderingen in hydrologische omstandigheden (kennisvraag 3). Ook het beschikbaar maken van sediment voor verstuuving naar het achterland draagt hieraan bij. Een kwaliteitsimpuls komt echter pas tot stand bij een goede koppeling tussen het zeewaarts uitgebreide kustgebied en het achterland. Dit vereist vaak aanvullende maatregelen en specifiek beheer. Het is dan ook aan te bevelen om in het ontwerp van zeewaartse kustuitbreidingen bewust rekening te houden met mogelijke kwaliteitsverbeteringen in het achterliggende gebied.

Zonder actieve kustlijnhandhaving zal zeespiegelstijging leiden tot kusterosie, wat een bedreiging vormt voor de lokale zoetwatervoorraad. Een zeewaartse kustuitbreiding met megasuppleties biedt kansen voor zowel de ontwikkeling van een zoetwaterlens als verbetering van de waterveiligheid (kennisvraag 4). Deze processen vergen echter een lange periode van natuurlijke ontwikkeling — doorgaans meer dan 50 jaar. Waterveiligheid valt in Nederland onder strikte wettelijke normen die worden nageleefd. Megasuppleties kunnen mogelijk bijdragen aan een efficiëntere invulling van het beleid. Dit vraagt om aanvullend onderzoek.

Afhankelijk van de doelstelling (creëren van een of meerdere landschapselementen of een volledig landschap) is het ontwerpproces complexer en zijn er verschillende randvoorwaarden voor kwaliteit, ruimte en tijd die van belang zijn. Hoe vollediger het landschap, hoe meer geomorfologische en ecologische eenheden en hoe complexer het ontwerpproces. Een doelstelling voor het ontwikkelen van een volledig landschap vereist een lange termijn visie en langjarig consistent beleid.

8.2 Aanbevelingen

Naar aanleiding van dit onderzoek zijn verschillende zaken naar voren gekomen die interessant / noodzakelijk zijn om verder te onderzoeken om tot betere (eenduidigere en kwantitatieve) richtlijnen te komen. Hieronder lichten we er zes toe: Kwantitatieve randvoorwaarden en richtlijnen; Gradiënten; Achterland; Vegetatie; Zoetwaterzekerheid.

Kwantitatieve randvoorwaarden en richtlijnen

Het is een lastige taak om de randvoorwaarden en richtlijnen voor een succesvolle megasuppletie te kwantificeren. Deels heeft dit te maken met de grote natuurlijke variabiliteit in de verschillende gebieden, waardoor het lastig is om te generaliseren. Voor het andere deel vereist het kwantificeren van de randvoorwaarden en richtlijnen een nog gronderigere analyse van de beschikbare data. In dit rapport zijn de geomorfologische eenheden per gebied geïnventariseerd op vooral aanwezigheid. Voor enkele gebieden zijn gegevens gekarteerd. Op dit moment beperkt de beschikbare data zich tot kartering van embryoduin, op:

- Texel Eierlandse dam (1996, 2005, 2010, 2017 en 2023).
- Schouwen Verklipperstrand (1996, 2005, 2010, 2017 en 2023)
- Zandmotor (jaarlijks 2011 t/m 2020, 2024, 2025)

De kartering van rijsporen beperkt zich tot:

- Texel Eierlandse dam (2022)
- Schouwen Verklipperstrand (2005, 2023)
- Zandmotor (2012, 2013 en 2023)

Meer karteringen dienen uitgevoerd te worden om kwantitatieve relaties te kunnen trekken over het voorkomen van embryoduin en de bijbehorende randvoorwaarden, zoals hoogteligging en helling.

Het beter karteren van de studiegebieden kan, naast meer informatie over embryoduininformatie, ook worden ingezet om meer inzicht te krijgen over habitatontwikkeling en oppervlaktekartering van geomorfologische eenheden. Karteren kan handmatig, maar recente technologische ontwikkelingen bieden geautomatiseerde mogelijkheden:

- GIS supervised classification: dit is een techniek die gebruikt wordt om satellietbeelden of luchtfoto's automatisch op te delen in verschillende categorieën (zoals water, witte duinen enz.), waarbij je het systeem voorziet van trainingsgegevens (je vertelt welke gebieden wat zijn). Er kan gebruik worden gemaakt van luchtfoto's of LiDAR hoogtekarten, maar ook van multispectrale satellietbeelden met meerdere banden, waardoor andere reflectiewaarden kunnen worden meegenomen. Vervolgens leert een geselecteerd algoritme op basis van de spectrale kenmerken van de trainingsdata hoe de verschillende typen eruitzien. Het algoritme wordt hierna toegepast op alle pixels, en resulteert in een classificatiekaart.
- Artificiële intelligentie (AI): dit is een meer geavanceerde methode, waarbij het mogelijk is om een algoritme te leren gebieden te herkennen gebaseerd op satellietbeelden en hoogtekarten. Naast bijvoorbeeld de t0 en t1 habitatkaarten, zouden de bovengenoemde karteringen van embryoduin en rijsporen kunnen dienen als trainingsset. Deze AI-tool zou kunnen worden ingebouwd in de viewer van de Sand Tracer⁷, een online tool die nu gebruikt wordt om inzicht te krijgen in geomorfologische kustontwikkeling.

Gradiënten

In dit onderzoek is naar voren gekomen dat variatie in geomorfologie essentieel is voor variatie in habitats. Gradiënten spelen daarbij een rol, maar het aspect van de gradiënten is nu nog niet goed kwantificeerbaar. Om hier meer grip op te krijgen is het noodzakelijk om de gradiënten in omgevingsfactoren (bijv. wind, zout, zon, etc) te kwantificeren. Hiermee kunnen waardevolle inzichten worden verkregen om de kwaliteit in de zeewaartse uitbreiding te verhogen/waarborgen.

⁷ De Sand Tracer is raad te plegen met een inlog die op verzoek kan worden aangemaakt en de volgende link: <https://sandtracer-acceptatie.hkvservices.nl>,

Achterland

Gradiënten zijn ook belangrijk voor de kwaliteit van de achterliggende gebieden. Het zwaartepunt van de analyses en karteringen in dit onderzoek liggen bij de ingreep. Aangezien veel van de achterliggende gebieden Natura 2000 gebieden zijn is in deze gebieden wel informatie van de habitatype kaarten beschikbaar. Er ontbreekt informatie om deze ontwikkeling te kunnen koppelen aan mogelijke effecten door zeewaartse ontwikkelingen in het voorliggende gebied. Op dit moment is er alleen data beschikbaar bij de Zandmotor. Om Kennisvraag 2 in meer detail te kunnen beantwoorden is het noodzakelijk om gegevens te verzamelen die de ontwikkelingen in het achterliggend gebied kunnen relateren aan de ontwikkelingen in de zone van zeewaartse kustuitbreiding. Monitoringsinspanningen bij zeewaartse kustuitbreidingen in de toekomst zouden daarom niet alleen in gebied van de kustuitbreiding te monitoren, maar ook ontwikkelingen in het achterland bij de monitoring meenemen.

Vegetatie

Er valt meer te halen uit vegetatieonderzoek van de verschillende studiegebieden, maar dit was binnen dit onderzoek niet mogelijk i.v.m. de beschikbare tijd. Een uitgebreider vegetatieonderzoek vergt onder andere veldbezoeken om de vegetatiekaarten aan te vullen en te verifiëren.

Voor een uitgebreider vegetatieonderzoek is verificatie van de vegetatiekaarten noodzakelijk. In veel kustgebieden wordt de vegetatie van de haloserie niet met veldkarteringen verricht, maar wordt deze bepaald op basis van luchtfoto's en remote-sensing technieken. Daardoor is er de facto een grote data-lacune met betrekking tot het historische en actuele patroon van een belangrijk deel van vegetatietypen en dus ook van habitatypen die gebonden zijn aan kusten. Hierdoor is in veel gebieden ook te weinig inzicht in de dynamiek van vegetatietypen en habitats. Om dat te vergroten is het noodzakelijk de vegetatie- en habitatkartering te verbeteren. De huidige karteringen zijn met name in de haloserie niet goed.

Daarnaast zou het waardevol zijn om daadwerkelijk elkaar opvolgende successiestadia in duinsystemen scherp te krijgen. Hiervoor is onderzoek naar langjarige tijdreeksen van Permanente quadraten⁸ (PQ's) in combinatie met abiotische data noodzakelijk. De huidige informatie is vooral gebaseerd op historische waarnemingen (mogelijk is de situatie nu heel anders – hydrologische en bodemchemische toestand wel heel anders dan toen Jac. P. Thijsse over de Blonde Duinen schreef en Viktor Westhoff onderzoek deed in het Kennemerduin), informatie uit onderzoeken buiten Nederland en veel losse (soms anekdotische) waarnemingen van onderzoekers die niet altijd goed vastgelegd zijn en/of onderbouwd zijn met data. Als er namelijk meer inzicht is in die relaties, kan daar bij het ontwerp van megasuppleties rekening mee gehouden worden, waardoor verwachtingen van de ontwikkelingen van verschillende typen duinnatuur realistischer ingeschat kunnen worden.

Zoetwaterzekerheid

Onze analyse over de invloed van megasuppleties op zoetwaterzekerheid is gebaseerd op algemene regels en aannames geleerd uit andere studies. Er zijn echter nog geen grootschalige studies over effect van megasuppleties op zoetwaterbel uitgevoerd, wat sterk zou bijdragen aan het begrip, en daarom kan helpen met het ontwerp van megasuppleties.

⁸ Permanente quadraten zijn vaste proefvlakken (vaak 2x2m in duingebieden) waarvan om de zoveel jaar een gedetailleerde vegetatieopname gemaakt wordt.

9 Literatuur

- Arcadis. (2021). Natuurdoelanalyse Natura 2000 Solleveld & Kapittelduinen.
- Arcadis, RoyalHaskoningDHV, & Sweco. (2022). Natuurdoelanalyse Natura 2000-gebied Voornes Duin.
- Arens, S.M., S.P van Puijvelde & C. Brière, 2010. Effecten van suppleties op duinontwikkeling. Rapportage Geomorfologie. Rapport 2010/OBN142-DK in opdracht van Directie Kennis, Ministerie van Economische Zaken, Landbouw en Innovatie en Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Milieu.
- Arens, S. M., Everts, F. H., Kooijman, A. M., Leek, S. T., Nijssen, M., & De Vries, N. P. J. (2012). Ecologische effecten van zandsuppletie op de duinen langs de Nederlandse kust.
- Beekman, F., 2007: De Kop van Schouwen onder het zand. Duizend jaar duinvorming en duingebruik op een Zeeuws eiland, Uitgeverij Matrijs, Utrecht, p. 1-304. Ook verschenen in 2006 als proefschrift Universiteit van Amsterdam.
- BIJ12. (2025). Nationale Databank Vegetatie- en habitatkarteringen.
https://atlas.bij12.nl/WebViewer/index.html?viewer=NDVH_Prof
- Van den Burg, A. B., Kooijman, A. M., Arens, S. M., Oost, A. P., Löffler, M., Jungerius, P. D., Grootjans, A. P., Stuyfzand, P. J., De Leeuw, C., Esselink, P., Wolters, M., Nijssen, M., Van Turnhout, C. A. M., Van Oosten, H. H., & Vogels, J. J. (2009). Preadvies Duin- en Kustlandschap. Rapport DK nr. 2009/dk113-O.
- Cirkel, G., & Aggenbach, C. (2024). Gevolgen zeespiegelstijging en klimaatverandering op zoetwaterbel en duinvalleien, Literatuurstudie KWR 2024.073.
- Deltares, 2009, Megasuppleties langs de Nederlandse kust A) Een verkenning naar de effecten voor de ecologie B) Een opzet voor een integraal onderzoeksplan voor ecologie, veiligheid en socio-economie. Harriette Holzhauer, Bert van der Valk (red), Pieter-Koen Tonnon, Jebbe van der Werf en Ap van Dongeren, Joost Stronkhorst, Chris Sprengers, Albert Oost, Jan Mulder, Gerben de Boer (Deltares) en Martin Baptist, (IMARES), Rapport Z4792 (Deltares) - C 114/08 (IMARES), januari 2009
- Deltares, 2014. Kustlijnzorg en waterveiligheid; een verkenning van mogelijkheden om kustlijnzorg doelmatiger af te stemmen op waterveiligheid. J Stronkhorst en M. Loffler, rapport 1208904, Deltares, Delft
- Deltares, 2019, Natuurlijk Veilig door Kust- en Zeereepbeheer. In opdracht van Rijkswaterstaat WVL. Kenmerk 11203683-002-ZKS-0014.
- Deltares, 2023, Sedimentbehoefte Nederlands kustsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging, In opdracht van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging Ministerie Infrastructuur en Waterstaat / Deltacommissaris, Rapportnummer: 11207897-002-ZKS-0004.
- Van Dieren, J.W., 1934, Organogene Dünenbildung, Den Haag, Martinus Nijhoff, 304p.
- Dongeren A van et al, 2008. Bepaling beschermingscontouren kustplaatsen. Rapport Deltares, TU Delft & Alkyon.
- de Vries, S. , H.N. Southgate, W. Kanning en R. Ranasinghe. (2012) Dune behavior and Aeolian transport on decadal timescales. Coastal Engineering, Vol 67, p41-53.
- Du, J., & Hesp, P. A. (2020). Salt Spray Distribution and Its Impact on Vegetation Zonation on Coastal Dunes: a Review. In Estuaries and Coasts (Vol. 43, Issue 8). <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00820-2>
- Ecoshape 2018a, Innovatieproject Hondsbossche Duinen - B2-P2: Analyse effecten maatregelen, W.P. Bodde, J.K. Leenders, A.H. Verheijen, C. Wegman, 154 blz.
- Ecoshape, 2018b, HPZ Innovatieproject - Thema C3 Verstuiving, IJff, S, Arens, B, Bodde, W. 64 pp
- Giardino, A, Santinelli G, Bruens A, 2012. The state of the coast; case study: North Holland. Rapport Deltares, Delf

- Hennekens, S. M., Smits, N. A. C., & Schaminée, J. H. H. (2025). SynBioSys Nederland versie 3.7.0.
- Hesp, P.A., M. DaSilva, G. Miot da Silva, D. Bruce & R. Keane, 2022. Review and direct evidence of transgressive aeolian sand sheet and dunefield initiation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022-1-16. DOI: 10.1002/esp.5400.
- Het tij geleerd, samenwerkingsverband, 2008, Eilanden natuurlijk. Natuurlijke dynamiek en veerkracht op de Waddeneilanden, ISBN 9789070322304, 95 blz.
- HKV, 2024, Basiskustlijn en waterveiligheid, Opdrachtgever: Rijkswaterstaat, PR5123, 166
- IJff, S. , Arens, B., Vertegaal, K., & Huisman, B. (2021). Monitoring natuur- en duinontwikkeling Zandmotor. Zandmotor evaluatie periode 2012-2020. Rapport Deltares 11201431-003-ZKS-0012.
- van de Koot, W.Q.M. & D. van der Goes, 2024. Zwakke Schakel N-H. Vervolgmonitoring Flora- en Vegetatie. G&G-Rapport 2024-039 in opdracht van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier.
- Klijn, 1981, Nederlandse kustduinen, geomorfologie en bodems, Wageningen, 198 blz.
- KPZSS, 2024, Systeemanalyse Zandige Kust, Duindynamiek en Zeespiegelstijging - Beschouwing van het duingebied bij toenemende zeespiegelstijging, September 2024, 51 blz.
- Lansu, E. M., Höfer, S., Rietkerk, M., Wassen, M. J., Lammers, E. J., Reijers, V. C. & 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.
- Pool M & L van der Valk 1988. Volumeberekening van het Hollandse en Zeeuwse Jonge Duinzand in het kader van het Kustgeneseproject (taakgroep 1000). Intern Rapport Rijks Geologische Dienst, Haarlem, pp.31, 9 bijlagen.
- Provincie Noord-Holland. (2025). Natuurdoelanalyse Duinen en Lage Land Texel.
- RIVM. (2024) Monitor stikstofdepositie in Natura 2000-gebieden 2024, RIVM-rapport 2024-0076
- RWS (2023). Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium. BOI Zandige keringen. Versie 2.1. januari 2023
- Stuyfzand, P.J. & S.M. Arens (2015). Effecten van meteorologische condities, het kerven en kaalscheren van de zeereepzone op de samenstelling van regenwater, bodemvocht en grondwater in de Kennemerduinen. KWR-rapport BTO 2015.220(s), 170p.
- van der Wal, D. (2004), Beach-Dune interactions in nourishment areas along the Dutch coast. *Journal of Coastal Research*, vol 20, p 317-325.

10 Appendices

Appendix A: Overzicht studiegebieden

A.1 Studiegebied, type en wat we van het gebied kunnen leren

Nr	Studiegebied	Type	Wat kunnen we van dit gebied leren?
1	Schiermonnikoog oost	natuurlijk	Begin van duinvorming van scratch op een strandvlakte met noord-expositie. Interessant om te vergelijken met de andere sites met duinvorming vanaf scratch (zandmotor, Texel Eierlandse dam, Hors, Vliehors)
2	Schiermonnikoog Noorderstrand	natuurlijk	Het strand aan de noordkant van Schiermonnikoog is sterk verbreed. Op het strand is een nieuwe duinengordel ontstaan, met tussen de nieuwe duinen en de oude zeereep (stuifdijk) een zone met brakke natuur. Inmiddels rolt deze zone weer op door erosie van de kustlijn. Dit studiegebied geeft inzicht in de strand-karakteristieken die leiden tot duinvorming en achterliggende brakke natuur en tot het type duinen wat ontstaat als een nieuwgevormde duinenzone weer begint te eroderen. Leidt dit tot een paraboliserende zeereep?
3	Ameland Oost	natuurlijk	combinatie erosieve zeedijk hoefijzer washovers , zeereep.
4	Ameland Groene Strand	natuurlijk	Door aanzanding van een strandhaak is een enorme strandvlakte ontstaan, enigszins vergelijkbaar met een natuurlijke versie van de Zandmotor. Op de strandvlakte is een groen strand ontstaan en na verloop van tijd ook embryonale duinen. Dit deelgebied geeft ons goed vergelijkingsmogelijkheden voor de ontwikkeling van embryonale duinen op een strandvlakte, bijvoorbeeld in vergelijking tot een kunstmatige situatie zoals de Zandmotor, maar ook een andere natuurlijke setting zoals bij de Hors op Texel of op het Verklikkerstrand op Schouwen.
5	Texel De Hors	natuurlijk	De Hors geeft ons inzicht in de ontwikkeling van embryonale duinen op een natuurlijke strandvlakte. Dit geeft vergelijkingsmogelijkheden met andere situaties van embryonale duinontwikkeling op natuurlijke, seminatuurlijke en kunstmatige strandvlaktes. De embryonale duinen zijn hier oud, in vergelijking tot andere gebieden. Behalve embryonale duinen is er ook sprake van ontwikkeling van afgesnoerde valleien en kerfontwikkeling in de zeereep. Dit deelgebied geeft daarmee ook inzicht in de snelheid van kerfontwikkeling, de randvoorwaarden voor het ontstaan en de respons op een omslag van een erosieve zeereep naar een meer accumulatieve zeereep, met embryonale duinontwikkeling vóór de kerven. Door de mate van kerfontwikkeling is hier enigszins sprake van een paraboliserende zeereep.
6	Groote Keeten	natuurlijk	Dit studiegebied geeft ons inzicht in de vorm van dynamiek en de natuurlijke geomorfologie van een aanstuivende zeereep zonder dat er embryonale duinen voor ontstaan. De vraag is of dit het effect is van de geringe strandbreedte of een lage hoogte van het stand? Embryonale duinen zitten hier in de voet van de zeereep. Het geeft inzicht in het type vegetatie wat ontstaat in een vrijwel onverstoorde zeereep die al tientallen jaren aanstuift. Het geeft ook inzicht in de mate van kerfontwikkeling in een aanstuivende situatie. Waarom stuiven kerven hier niet dicht? Het geeft ook inzicht in de respons van het systeem op stabiliserende ingrepen, komen de kerven weer terug, en zo ja zijn de eigenschappen dan hetzelfde gebleven?
7	Goeree Kwade Hoek	natuurlijk	Dit gebied kan ons inzichten geven in de kwelder- en duinontwikkeling op een grote strandvlakte. M.i. is dit gebied

Nr	Studiegebied	Type	Wat kunnen we van dit gebied leren?
			bijzonder omdat in tegenstelling tot wat je veel op de Waddeneilanden veel ziet, de kweldervorming hier niet landwaarts, maar zeewaarts van de stuifdijk optreedt. Misschien vergelijkbaar met groene strand ontwikkeling Ameland.
8	Schouwen Verklikkerstrand	natuurlijk	Dit gebied is ook een voorbeeld van hoe duinen tot ontwikkeling komen op een aangroeiende strandvlakte. De groei van de strandvlakte wordt mogelijk bepaald door de suppleties (en afslag) op de kop van Schouwen. Dit kan inzicht geven in hoe je met suppleties op de ene plek aangroei op een andere plek kan stimuleren met ontwikkeling van habitats die sterk lijkt op autonome kustuitbreidingen. Er zijn overigens meer plekken waar aangroei van het strand gedreven lijkt door suppleties stroomafwaarts (Oranjezon, kust tussen Bergen en Schoorl,). Mogelijk dat hier kennis te halen is over de relatie tussen suppleties en aangroei
9	Walcheren Oranjezon	natuurlijk	effect van suppleties elders op duinontwikkeling, effect van zandgolven
10	Terschelling De Boschplaat	gestuurd	Dit studiegebied geeft ons inzicht in de snelheid van kwelderontwikkeling na aanleg van een grote stuifdijk op een strandvlakte. Door de aanleg van de stuifdijk ontstond aan de Waddenzijde een luwe situatie, met kwelderontwikkeling tot gevolg. Het geeft ons ook inzicht in de snelheid van veroudering van vegetatie. Zonder analyse van oorspronkelijke vegetatiekarteringen is dat niet mogelijk, habitatkaarten zijn te grof om onderzoek te doen naar ontwikkeling Boschplaat
11	Terschelling Cupidopolder	gestuurd	De Cupidopolder is ontstaan in respons op de aanleg van de stuifdijk op de Boschplaat. De dynamiek van de Boschplaat veranderde daardoor (kwelderontwikkeling, zie deelgebied Boschplaat), maar aan de Noordzezijde van de stuifdijk ontstond ook een nieuwe situatie. Hier ontstond een duinenveld, met kleine, onvolledig afgesnoerde stukjes strand met brakke natuur. Later werden valleitjes verder afgesnoerd d.m.v. stuifdijkjes, waardoor de brakke natuur verzoette. Inmiddels is door erosie van de punt van de Boschplaat een groot deel van het duingebied alweer verdwenen. Dit studiegebied geeft ons inzicht in het ontstaan van embryonale duinen vóór een gesloten duinenrij, de invloed van strandontwikkeling hierop, en over het weer verdwijnen door erosie. Hoe ontwikkelt de dynamiek zich in een eroderend embryoonaal duinenveld, ontstaat er parabolisering?
12	Terschelling Noordsvaarder	gestuurd	Door aanzanding van een grote zandplaat, waarop diverse stuifdijken zijn aangelegd is een gebied met een enorme rijkdom aan gradiënten en landschapselementen ontstaan. Hoe verhoudt dit zich tot bijvoorbeeld de ontwikkeling van de Boschplaat, ook een situatie met strandvlakte en stuifdijken? Dit studiegebied geeft ons inzicht onder welke omstandigheden zo een grote variatie aan gradiënten kan ontstaan, wat het effect van onvolledige afsnoering is. Het geeft ons ook inzicht in de snelheid van kerfontwikkeling in een forse duinenrij, na staken van het beheer.
13	Vlieland Kroon's Polders	gestuurd	Dit gebied geeft ons inzicht in de ontwikkeling van zoete natuur na inpoldering van grote delen van een strandvlakte, aan de waddenzijde. Door gaten in de omringende dijk heeft de (Wadden)zee toegang gekregen tot het gebied, waardoor er een omvangrijke gradiënt van zoet-zout is ontstaan. Dit gebied geeft ons inzicht in de veranderingen na de introductie van zout water en in de snelheid van valleiontwikkeling na inpoldering, variatie in hydrologische condities.

Nr	Studiegebied	Type	Wat kunnen we van dit gebied leren?
14	Texel Eierlandse dam	gestuurd	Door de aanleg van een lange strekdam is een strandvlakte ontstaan. Hierop zijn embryonale duinen tot ontwikkeling gekomen. Er is een opvallend verschil tussen het strand ten noorden en ten zuiden van de strekdam. Dit gebied geeft ons inzicht in het effect van strandhoogte voor embryonale duinontwikkeling. Het gebied geeft ons vergelijkingsmogelijkheden voor de ontwikkeling van embryonale duinen op een strandvlakte, onder semi-natuurlijke condities (ontwikkeling van embryonale duinen op een natuurlijke strandvlakte, op een aangelegde strandvlakte en op onder invloed van strekdammen ontstane strandvlaktes).
15	Texel Kreefte Polder	gestuurd	De Kreeftepolder is een door stuifdijken volledige afgesnoerde strandvlakte op de Hors. Dit deelgebied geeft ons inzicht in de snelheid van ontwikkeling van een natte duinvallei, de invloed van hydrologische randvoorwaarden en de snelheid waarmee door stuifdijkaanleg zoete duinvalleivegetatie kan worden ontwikkeld.
16	Kennemerstrand	gestuurd	Dit gebied geeft, net als Eierlandse Dam, inzicht in de ontwikkelingen op een strandvlakte die is ontstaan na aanleg van een strekdam. Het betreft voornamelijk embryonale duinontwikkeling. Mogelijk ook inzicht in de ontwikkeling van een afgesnoerd duinmeer, maar mogelijk ook is deze ontwikkeling te kunstmatig.
17	Texel Prins Hendrikzanddijk	aangelegd	Dit studiegebied geeft ons inzicht in de ontwikkeling van vegetatie op zowel droog duin als kwelder in een volledig kunstmatige situatie en met een afwijkende expositie t.o.v. alle andere studiegebieden. Vooral m.b.t. droge duinen is de situatie uniek, omdat er vrijwel geen andere situaties zijn met duinen aan de waddenkant (m.u.v. Vlieland).
18	Hondsbossche Duinen	aangelegd	Dit gebied geeft inzicht in hoe de vegetatie zich ontwikkelt op een volledig kunstmatig systeem dat onder invloed van natuurlijke processen (met name aanstuiving) natuurlijker wordt. Wat is het effect van de strandconfiguratie (smaller strand, lagere ligging), bijvoorbeeld in vergelijking tot de Zandmotor?
19	Kustwerk Katwijk	aangelegd	Dit gebied geeft inzicht in de vegetatie die kan ontstaan op een volledig kunstmatig duin, zonder enige dynamiek, waar bovendien nog een parkeergarage onder ligt. In hoeverre is er sprake van natuurlijke elementen? Wat zijn de verschillen met vegetatie in een natuurlijke zeereep?
20a	Duinversterking Delfland	aangelegd	Dit gebied geeft inzicht hoe door aanstuiving een volledig kunstmatige duinenrij natuurlijker wordt. Het geeft ook inzicht in hoe snel een kunstmatig patroon van helm overgaat in een natuurlijk patroon. Het geeft ook inzicht hoeveel zand er nodig is voor een natuurlijker reliëf, wat het effect is van het lokale zandbudget, wat het effect is van de ontwikkeling van embryonale duinen vóór de duinversterking en het effect van lokale verstarring en variatie in zoutspray en overstuiving.
20b	oude Duinversterking Delfland	aangelegd	Op de oude duinversterking (jaren 1980) heeft de vegetatie veel meer tijd gehad om te ontwikkelen. Hierdoor zijn er waardevolle lessen te leren over deze vegetatieontwikkeling en het effect van de aanleg van een nieuwe duinversterking, waardoor de oude duinversterking in één keer een stuk verder landinwaarts is komen te liggen. Mogelijk zijn er m.b.v. het Zandmotoronderzoek ook effecten van verschillen in zoutspray en overstuiving vast te stellen. Voor aanleg van de zandmotor vond hier voor de zeereep ontwikkeling van embryonale duinen plaats. Dit gebied kan ons inzicht geven in de randvoorwaarden voor embryonale

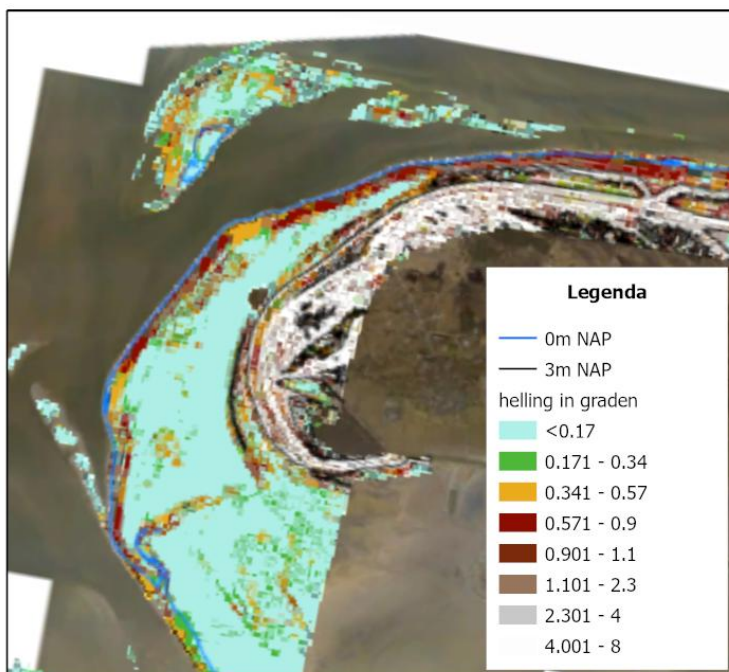
Nr	Studiegebied	Type	Wat kunnen we van dit gebied leren?
			duinontwikkeling op een smal strand. Wanneer groeien de duinen tegen en wanneer voor de zeereep?
21	Zandmotor	aangelegd	Dit gebied geeft ons inzicht in de ontwikkeling van een grote strandvlakte, het effect op de aangrenzende duinen, de ontwikkeling van embryonale duinen vanaf scratch, de invloed van een duinmeer en lagune op de eolische transport en aangrenzende zeereep, de invloed van een hoge ligging op zandtransport en desert pavement, de invloed van een strandvlakte op de zoutspray naar de bestaande duinen
22	Spanjaardsduin	aangelegd	Respons van hydrologie op aanleg van een kunstmatige vallei en duinenrij. Tijdsduur van geomorfologische activiteit. Snelheid van vegetatieontwikkeling in droge duinen en een natte duinvallei. Snelheid van verruiging op een kunstmatig duin. Snelheid van omvorming van kunstmatig duin naar meer natuurlijke zeereep. Effecten van verschillende vormen van aanplant. Effect van plaatsen van rietpoten op vestiging planten. Effect van ineggen maaisel op vegetatieontwikkeling natte duinvallei. Effect van inzaaien tarwe/rogge mengsel op stabiliseren van uitstuwende vallei. Ontwikkeling van habitats en vergelijking met verwachte (potentiële) habitats.
23	van Dixhoorndriehoek	aangelegd	Dit is een grote opgespoten driehoek waarbij gebruik is gemaakt van niet heel erg systeemeigen zand. Het bevat nutriënten, grind en klei en is daarmee nogal afwijkend van normale duinvalleien. Hoe beïnvloedt dit de morfologische en ecologische ontwikkeling? Dit gebied kan ons meer leren over de maakbaarheid van duinvalleien, de snelheid van ontwikkeling van een duinvalleivegetatie, de effecten van extreme recreatiedruk, de mogelijkheden om met aanstuivend (suppletiezand) kunstmatige landschappen weer natuurlijker te maken. Verder over de relatie tussen ontwikkeling morfologie en recreatiedruk. Hoe kwetsbaar is een droog duinlandschap, is er iets te zeggen over de mate van degradatie, verschillen binnen het gebied in relatie tot recreatiedruk?
24	Voorne Punt	aangelegd	Dit is een afwijkend gebied, met een transgressieve duinontwikkeling. Er is niet ingeplant, maar ingeëgd, hoe ontwikkelt de dynamiek zich? Heeft dit een negatieve invloed op de zandvoorraad, of is de ontwikkeling vergelijkbaar met systemen die wel ingeplant/gestabiliseerd zijn?
25	Neeltje Jans	aangelegd	We beschouwen of alleen het deel met Noordzeekust. Er is geen info over habitattype Grevelingen kant Te leren lessen hangen af van de aanleggeschiedenis, hoe is dit tot stand gekomen, is de slufteer aangelegd of vanzelf ontstaan? Het gebied kan ons dan inzicht geven in de snelheden van ecologische ontwikkeling.
26	Noord-Beveland de Banjaard	aangelegd	aangroei voor een dijk, ontwikkeling van afsnoering en half afgesnoerde vallei
27	Breskens oost	aangelegd	Dit is een voorbeeld van een dijk die onder invloed van suppleren langzaam in het zand verdwijnt. Een klein systeem, maar het kan wel inzicht geven in de ecologische ontwikkeling en waarden van een opgestoven zanddijk (Zelfde als Breskens west)
28	Breskens west	aangelegd	Dit is een voorbeeld van een dijk die onder invloed van suppleren langzaam in het zand verdwijnt. Een klein systeem, maar het kan wel inzicht geven in de ecologische ontwikkeling en waarden van een opgestoven zanddijk. (Zelfde als Breskens oost),

Appendix B: onderscheid strand en strandvlakte

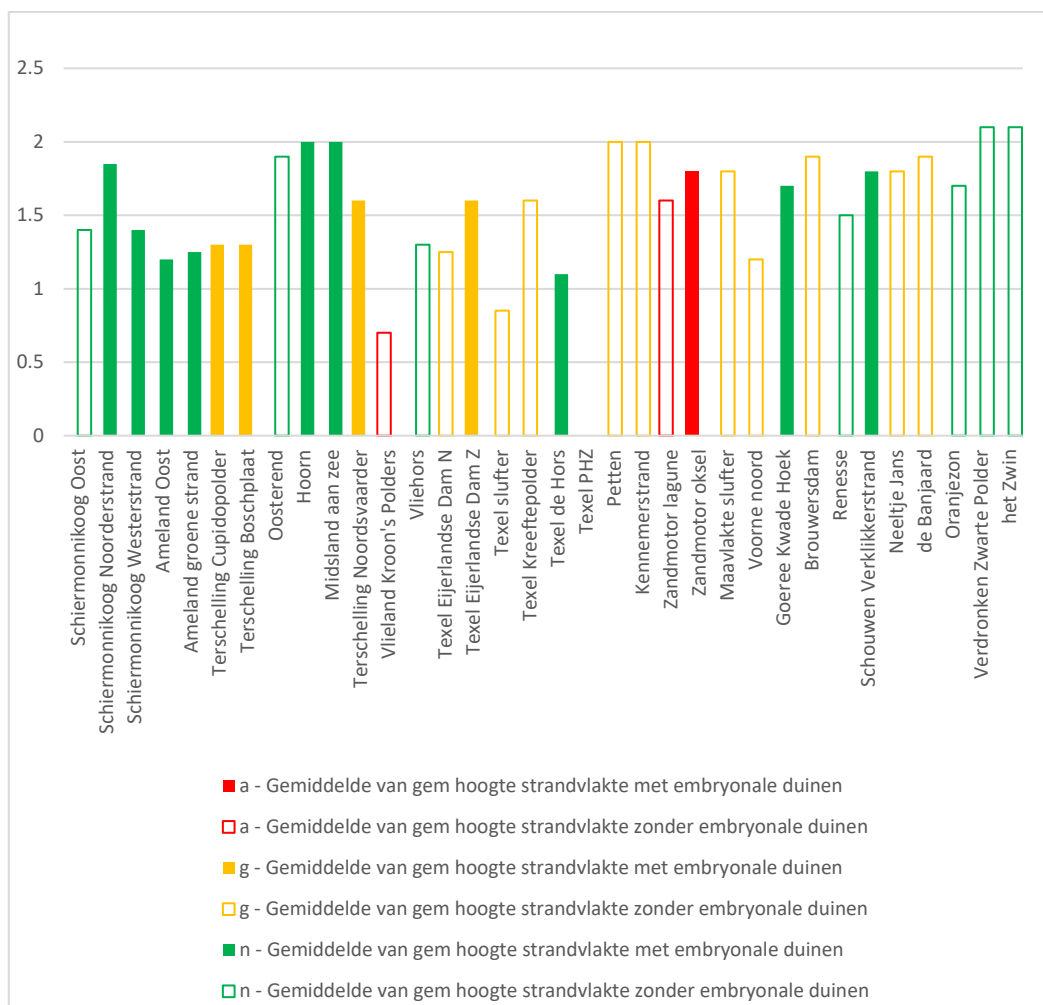
Strandvlaktes hebben een flauwe helling, gemiddeld kleiner dan 0.17 graden. Dat betekent een gemiddeld hoogteverschil van 0.3m over 100 m, dus 0.3%). In de vlakte ligt vaak een deel waar de hoogte met toenemende afstand tot de duinvoet weer toeneemt, dus met een tegengestelde helling. Dit heeft een effect op de drainage (stagnerend water, zoetere condities, mogelijk van belang voor kieming/vestiging vegetatie), maar mogelijk ook op slibafzetting en anaerobe condities, wat een effect kan hebben op de ecologische ontwikkeling. De geringe helling draagt ook bij tot natte omstandigheden omdat afwatering van vloedwater, toestromend duinwater en neerslag relatief traag verloopt. Het zeewaarts liggende hoge deel van de strandvlakte kan ook beschutting geven tegen golfslag bij hoge vloed en daarmee ook vegetatieontwikkeling bevorderen.

Een hellingshoek van <0.17 graden lijkt een goed criterium voor het onderscheiden van strandvlaktes t.o.v. gewoon strand. Het oppervlak moet wel boven 0 m NAP liggen (grofweg tussen 1 en 3m NAP, afhankelijk van het getij en de hoogte van stormvloeden). Beneden grofweg 1m NAP betreft het geen strandvlakte, maar een intergetijdengebied. Boven circa 3 m NAP ligt de strandvlakte buiten het bereik van de meeste stormvloeden, waardoor het oppervlak niet meer door golven wordt bewerkt en er bijvoorbeeld schelpenvloertjes (Figuur 20) kunnen ontstaan door eolische activiteit (zoals op het hoge deel van de Zandmotor en in het Spanjaardsduin).

Figuur 31 geeft een voorbeeld voor het Westerstrand van Schiermonnikoog. De lichtblauwe kleur geeft de kleinste hellingshoek aan, kleiner dan 0.17 graden. In de duinen zijn de hellingshoeken (veel hoger) en vanaf (ongeveer) de laagwaterlijn liggen de hellingshoeken over het algemeen tussen 0.17 en ruwweg 1 graad. De strandvlakte komt er duidelijk uit. Langs de hele kust is voor gebieden met een duidelijke flauwe helling van tenminste 100m breed de gemiddelde hoogte en de breedte van de zone met hellingshoek <0.17 graden bepaald. De landwaartse grens van de zone met een hellingshoek <0.17 graden ligt meestal rond de 1.5-2m NAP.



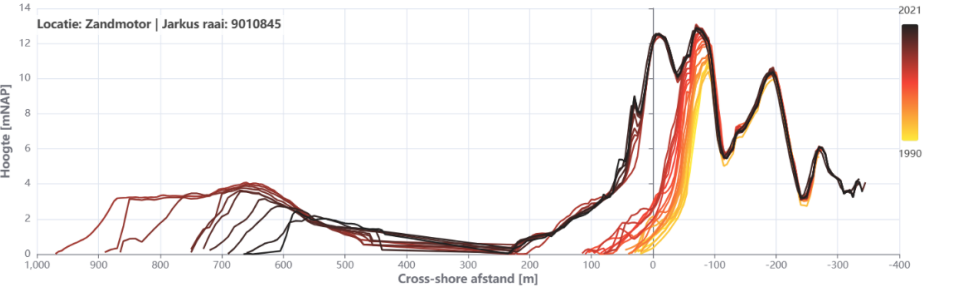
Figuur 31. Hellingshoek Westerstrand Schiermonnikoog



Figuur 32. Gemiddelde hoogte voor verschillende typen strandvlakte met en zonder embryonale duinen, voor aangelegde (a), gestuurde (g) en natuurlijke (n) gebieden.

Appendix C: factsheets

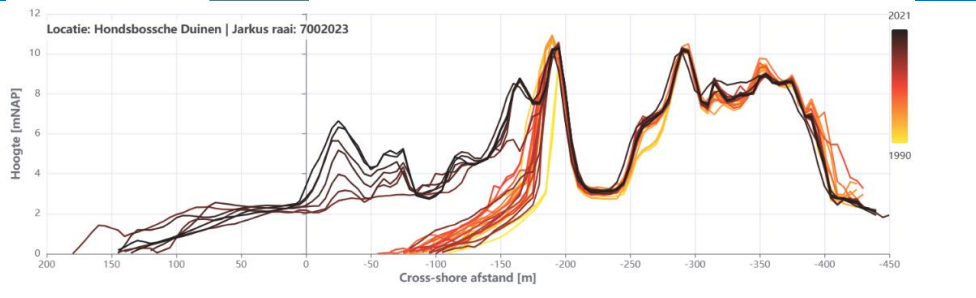
Zandmotor

Gebied	Zandmotor
	
 Algemene kenmerken	
Kenmerken	• Mega-suppletie ($20 * 10^6 \text{ m}^3$) • Kunstmatig • Tijdelijke natuur (verwachte levensduur 25-50 jaar) • Vrije ontwikkeling met eroderende kustlijn • Variatie in salt spray als gevolg van fluctuaties in zoetwater uitstroom Rijnmond
Locatie en Oriëntatie	Zuid-Holland, NW
Natura 2000	99 Solleveld en Kapittelduinen
Zeewaterniveau (m+NAP)	Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Hoek van Holland en Scheveningen Laagwater: -0,59 m +NAP Hoogwater: 1,06 m +NAP
Jaartal aanleg	2011
Oppervlakte (ha)	400
Kustlengte (m)	3500
Dwarslengte (m)	1000 bij aanleg, 525m 2024
Doelstellingen aanleg	• Veiligheid: levering van zand aan kustdelen stroomafwaarts • Natuur: strand- en strandvlakte en te vormen nieuwe duinen, kwaliteitsverbetering achterliggend duincomplex • Recreatie: strand, duinmeer, lagune t.b.v. wandelen, kite-surfen
 Typering ecologie	
Aantal habitattypen	6
Kenmerkende vegetatie	• Ontwikkeling van embryonale duinen (2110) op strandvlakte • Witte duinen met helmgras (2120) in ontwikkeling op strandvlakte en tegen zeereep • Potentie tot vochtige duinvallei (2190) in huidige duinmeer
Ontwerpaspecten ecologie	• Duinmeer: midden op de zandmotor is een duinmeer aangelegd die voor een groot deel van het voorliggende strand als zandvang fungeert. Het gebied in de luwte hiervan ontvangt daarom minder zand, waardoor er vrij snel een ruige vegetatie is ontstaan. • Duinversterking: van te voren was de verwachting dat door het aanleggen van een enorme strandvlakte er een grote hoeveelheid zand richting duinen van Solleveld zou stuiven. De aanleg van de duinversterking met dichte aanplant van helm heeft echter al het aanstuivende zand ingevangen. De duinversterking zelf wel natuurlijker geworden, maar de doorvoer landwaarts van de oude zeereep is gestagneerd, met verruiging tot gevolg. • Schoonmaken strand: de gemeente den Haag maakt in het seizoen hoogfrequent het strand schoon waardoor embryonale duinontwikkeling, en daarmee natuurontwikkeling, vanaf RSP107.88 naar het noorden

	onmogelijk is. Dit treedt al wel op in het zuidelijke deel in de gemeente Westland, waar schoonmaken achterwege gelaten wordt.
 Typering geomorfologie	
Aantal geomorfologische eenheden	6
Kenmerkende geomorfologie	• Strandvlakte met embryonale duinontwikkeling vóór en tegen duinversterking • Snel afnemende dynamiek vanaf duinvoet landwaarts • Zandaanvoer strandvlakte onderbroken door duinmeer en lagune • Lagune zeer dynamisch • Duinmeer stuift vol • Gradiënt in zand transport van zuid (hoog) naar noord (laag) • Gradiënt in salt spray van zuid (hoog) naar noord (laag) • Effect van breedte van de strandvlakte op salt spray • Hoge liggende centrale deel door aanleg, ver boven hoogwaterniveau en stormvloedpeil
Ontwerpaspecten geomorfologie	• Hoogte: een groot deel van de zandmotor is zo hoog aangelegd dat hier in feite geen sprake is van een strandvlakte. De hoogte is zodanig dat golven hier geen enkele invloed uit kunnen oefenen, ook niet bij extreem hoog water. Het gevolg is dat op het hoger liggende deel schelpenvloertjes ontstaan die niet meer afgebroken worden, waardoor dit deel niet meer als zandbron voor zandtransport naar het duin kan fungeren. Na verloop van tijd fungeerde alleen het intergetijdengebied nog als zandbron, omdat hier wel door sortering door golfwerking steeds opnieuw verstuifbaar zand aan het oppervlak kwam te liggen. • Het duinmeer vangt veel zand in, waardoor de dynamiek tegen de zeereep ten (noord)oosten hier beperkt is, daar minder aanvoer van zand. • Lagune: net als het duinmeer vangt de lagune zand in dat vanaf de strandhaak landwaarts stuift. De geul door de lagune zorgt voor dynamiek op het strand ten noorden. • Zoneren recreatie: Bij het ontwerp en zonering is geen rekening gehouden met embryoduinontwikkeling. Door de ontwikkeling van embryonale duinen werd het onmogelijk om sommige stukken te berijden met een 4WD, terwijl op vaste rijroutes, zoals bijvoorbeeld dicht bij de duinvoet, er door intensieve berijden geen duinontwikkeling kon plaatsvinden. Dit zorgt voor een ontbrekende connectie tussen embryonale duinen en de duinvoet, met o.a. hydrologische implicaties heeft, zoals het binnendringen van de zee bij hoog water via het rijspoor naar de embryonale duinen. Een deel van de embryonale duinen is ingekaderd door rijsporen, en heeft daarmee een kunstmatige begrenzing.
 Ontwikkeling	
Morfologie	• Met name aan de zuidkant (stroomopwaartse zijde) is een wadden-achtig systeem ontstaan, waar het strand op een natuurlijke wijze is aangezand, waar de hoogte van het strand t.o.v. zeeniveau natuurlijk is en waar op grote schaal embryonale duinen tot ontwikkeling komen. • Invloed duinversterking op afname eolische dynamiek achterliggende gebied
Ecologie	• Door bovenstaande (morfologische) beperkingen is er slechts mondjesmaat ontwikkeling van embryonale duinen •
Hydrologie	• Risico van verzilting van de waterwinning van Dunea in het bestaande duin door toestroom van zout grondwater uit de zandmotor • Risico van toestroom van vervuild grondwater uit oude vuilstorten in de zeewering naar de waterwinning van Dunea • Beide risico's zijn gemitigeerd door aanleg van grondwaterbemaling in / net achter de zeereep.

Recreatie	• Effect recreatie/berijden op ontwikkeling embryonale duinen heeft daarmee ook effect heeft invloed op kwaliteit ontwikkelde natuur • Disconnectie embryonale duinen en bestaande duinen door berijden
	Toekomstbeeld
Ecologie	Geen relevante ecologische ontwikkeling verwacht
Morfologie	• Korte termijn: Het duinmassief zal waarschijnlijk beperkt in hoogte zijn (zeereepvorming vanuit embryonale duinen). • Mogelijk groeien embryonale duinen zodanig aan elkaar dat er volledige afsnoering plaats vindt. Door het rijspoor langs de duinversterking wordt dit wel gehinderd. • Lange termijn: Op langere termijn oprollen van het nieuwgevormde duin, met mogelijk bijbehorende dynamiek, door erosie van de Zandmotor. Dit proces zal niet heel grootschalig zijn, gezien de verwachte dimensies van het ontwikkelde duingebied. Eventuele secundaire duinvorming die dan optreedt zal kleinschalig zijn, niet in de vorm van parabolisering en grootschalige verstuingen.
	Richtlijnen
Afgeleide richtlijnen	• Hoogteligging van de suppletie: zorg voor incidentele of frequente bewerking door golven – ligging onder stormvloedpeilhoogteligging van de suppletie: leg deze niet zo hoog aan dat in het bestaande duin (tijdelijke) verbrakking kan gaan optreden • Zonering recreatie: zorg voor (deel)gebieden waar een echt ongestoorde ontwikkeling mogelijk is, zowel door directe (verstoring)effecten door recreatie maar ook door intensief recreatiegericht beheer en onderhoud. • Voorkom dat door de ontwikkeling van rijsporen de grenzen van embryonale duinvelden worden bepaald. Dit is ook nodig om ervoor te zorgen dat embryonale duinen en zeereep als één eenheid (hydrologisch, ecologisch) kunnen functioneren. • Aanzanding stroomopwaarts is te sturen met dimensies van de mega-suppletie • Vooraf beter kijken naar hydrologische effecten op functies in het bestaande duingebied. Er zou op zich een positief effect op de zoetwaterbel kunnen optreden door de verbreding van het strand, en met de ontwikkeling van embryonale duinen met de verbreding van de duinen. Door de aanwezigheid van puinduinen (met afval) kon dit mogelijk positieve effect niet benut worden.

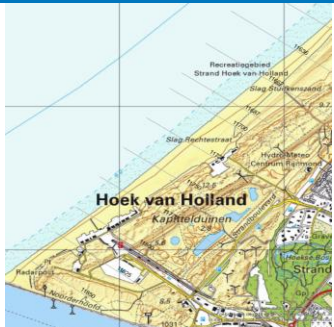
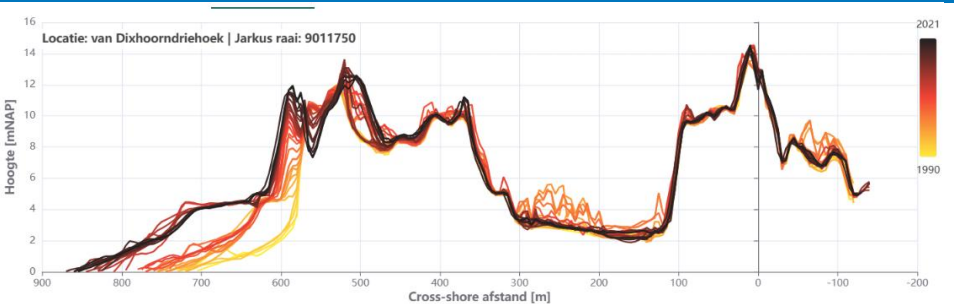
Hondsbossche duinen

Gebied	Hondsbossche duinen
	 Locatie: Hondsbossche Duinen Jarkus raai: 7002023
 Algemene kenmerken	
Kenmerken	• Aangelegd ($35 * 10^6 \text{ m}^3$), kunstmatig • Vooroever, strand, duinvallei en duinen zijn in een keer aangelegd. • Experimenten met verschillende luwe laagtes en aanplantpatronen. In een deel is er een tweede duinenrij met natte duinvallei hiertussen. • Het strand ligt hier op een normale hoogte, en wordt door golven bewerkt.
Locatie en Oriëntatie	Noord-Holland, WNW
Natura 2000	n.v.t.
Zeewaterniveau (m+NAP)	Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Oude Schild en IJmuiden Laagwater: -0,75 m +NAP Hoogwater: 0,84 m +NAP
Jaartal aanleg	2015
Oppervlakte (ha)	200
Kustlengte (m)	6000
Dwarslengte (m)	320
Doelstellingen aanleg	• Kustverdediging met ruimte voor natuur en recreatie • Gevarieerde natuur met ontwikkelingen van embryoduin, wandelende duinen, grijze duinen, duinstruweel en vochtige duinvalleien.
 Typering ecologie	
Aantal habitat typen	8
Kenmerkende vegetatie	• Natte vegetatie tussen strandpaal 22 en 24 (gebaseerd op CIR-luchtfoto). Inundatie van laagste delen. • De vallei lijkt dicht te groeien met riet (r08Bb03d Rietland met Heen). Wel is er een eerste aanzet voor kwalificerende vegetaties van H2190A Open water te zien met vegetaties van: r05RG11 – RG Aarvederkruid (RG <i>Myriophyllum spicatum</i>-[<i>Potamogeton</i>]) en r04RG01 – RG Breekbaar kransblad (RG <i>Chara globularis</i>-[<i>Chara fragilis</i>]). Ook worden er typische soorten van H2190A gezien zoals Waterpunge en Rugstreeppad (van de Koot et al. 2024). • Helm is vitaal in gebieden met veel dynamiek, neemt af bij extreme dynamiek, en is minder vitaal in gebieden zonder dynamiek. Hetzelfde kan gezegd worden over habitatype H2120, Witte duinen. Ook dit habitatype komt kwalificerend voor langs de gehele Hondsbossche Duinen en bestaat uit verschillende vegetaties van de Helm-associatie. Typische soorten hiervan nemen ook toe, zoals Noordse helm, Blauwe zeedistel, Zeewolfsmelk en Zeemelkdistel. Deze gemeenschappen zullen zich nog verder ontwikkelen (van de Koot et al. 2024). Door de lagere dynamiek zijn de vegetaties van beide habitattypen in het noordelijke deel wel minder vitaal dan in het zuidelijk deel. • Smalle zone met embryonale duinen vanaf 2017 tot heden. In de zeereep zijn langs de gehele Hondsbossche Duinen op verschillende plekken embryonale duinen ontstaan, die kwalificeren als H2110 Embryonaal duin. Vooral de vegetatievariant r24Aa01 - Associatie van Zandhaver en

	Biestarwegras (<i>Honckenyo-Agropyretum juncei</i>) is aanwezig, alhoewel de soortenrijkdom nog vrij laag is, maar volop in ontwikkeling (van de Koot et al. 2024). - Aan de oostkant is de dynamiek lager. Hier komen sneller soorten van minder dynamische omstandigheden voor, waaronder typische soorten van H2130 Grijze duinen. Het gaat hier om Duinaveruit, Buntgras, Ruw vergeet-mij-nietje, Zanddoddegras en Echt bitterkruid. De vegetaties zijn momenteel echter nog niet voldoende ontwikkeld om te kwalificeren voor het Natura 2000 habitatype. - In dit deel zijn ook struweelsoorten aangeplant, waaronder Duindoorn. Mede hierdoor zijn er reeds voor H2160 Duindoornstruweel kwalificerende stukken aanwezig. Deze zijn in het zuidelijk deel van de Hondsbossche Duinen beter ontwikkeld dan in het noordelijke deel, mede door het minder goed aanslaan van de aanplant in het noorden. Het gaat hier om vegetaties van de Associatie van Duindoorn en Liguster (r38Ab01 - <i>Hippophao-Ligustretum vulgaris</i>).
Ontwerpaspecten ecologie	- Eisen van opdrachtgever dat de zone gunstig is voor vochtige duinvalleien met open water (H2190A) en hoge moerasplanten (H2190D). Er is een eerste aanzet voor kwalificerende vegetaties van H2190A Open water te zien met vegetaties van: r05RG11 – RG Aarvederkruid (<i>RG Myriophyllum spicatum</i>-[<i>Potametea</i>]) en r04RG01 – RG Breekbaar kransblad (<i>RG Chara globularis</i>-[<i>Charetea fragilis</i>]). Ook worden er typische soorten van H2190A gezien zoals Waterpunge en Rugstreeppad (van de Koot et al. 2024). - In 2016 helm aangeplant met daartussen kale vlakken op kunstmatige tweede duinenrij.
 Typering geomorfologie	
Aantal geomorfologische eenheden	4
Kenmerkende geomorfologie	- Erosie van strand en onderwateroever in centrale 7 km en sedimentatie aan flanken. - Sterke aanstuiving van de zeereep en overstuiving van de vallei. - Er is zoutinvloed achter de dijk, vooral door kwel onder de dijk door. - Er is een zeer geringe overstuiving over de dijk, een aantal jaren gemonitord met zandvangsers. - Accumulatie van gemiddeld 27m³/m.jaar zand in het duingebied over de periode 2015-2023, waarvan 70% terecht komt op de duinvoet, en 30% op de kruin. Er is wel een gradient, aan de zuidkant is de aanstuiving (veel) groter dan aan de noordkant. De aanstuiving gaat ten koste van het zandbudget van strand en vooroever, de verliezen zijn hier groter dan de winst door aanstuiving. Wilgenschermen, vegetatie en luwe laagtes zijn ingezet om zand vast te houden.
Ontwerpaspecten geomorfologie	- De kunstmatige zanddijk is door een sterke aanstuiving snel in een veel natuurlijk ogende duinenrij getransformeerd. Het strand levert veel zand en door regelmatige omwoeling door golven ontstaan er geen schelpenvloertjes, waardoor het strand als zandbron blijft fungeren. - De ligging van het strand binnen het bereik van golven is een belangrijke randvoorwaarde voor een permanente zandaanvoer richting duinen. - Aanleg van een kaarsrechte duinvallei achter een smalle en dynamische duinenrij levert geen goede randvoorwaarden voor duinvalleiontwikkeling. De vallei stuift vanuit het zuiden vol, waardoor deze 300m korter is geworden. Vanuit de zeewaartse duinenrij stuift er ook veel zand in de vallei, waardoor deze circa 10m smaller is geworden en de overgang van duinenrij naar vallei steiler. Door deze manier van aanleg lijkt e ontwikkeling van een natte duinvallei gedoemd binnen afzienbare tijd te mislukken. - De eis dat de achterliggende dijk niet mag overstuiven beperkt de mogelijkheden voor dynamiek.

 Ontwikkeling	
Morfologie	• Snelle (<5j) aanpassing naar natuurlijke situatie vergelijkbaar met omliggende gebieden, waarschijnlijk door omvangrijke verstuiving. • Duinvoet verplaatst zich richting zee, en strand erodeert (2-4x zo snel als duinvoet), hierdoor ontwikkeling tot even breed strand als omliggende gebieden (~100 m). • Toename in duinvolume 3x groter dan bij omliggende gebieden (in 5j) • In 2025 1,2M m3 vooroeversuppletie gepland om (onverwacht) sterke erosie ter plekke bij HD te mitigeren
Ecologie	n.v.t.
Hydrologie	n.v.t.
Recreatie	Recreatie vooral aan de noord- en zuidkant, minder of niet in het middendeel. Er is een strandreservaat afgezet in het middendeel, smal en met een tweedraads raster open voor honden. Omdat de verstoring waarschijnlijk niet geheel wordt weggenomen, en slechts over een beperkte breedte, is het strandreservaat waarschijnlijk niet optimaal voor strandbroeders. Er zijn bovendien vraagtekens bij de specifieke locatie, die inhoudt dat het al kleine reservaat in het noordelijke deel doorkruist wordt door een publiekelijk toegankelijk pad van het strand naar een parkeerplaats bij vogelreservaat de Putten. Net ten Zuiden van het reservaat komt een vergelijkbaar pad op het strand uit.
 Toekomstbeeld	
Ecologie	Korte termijn: Ontwikkeling van witte duinen op de twee zeewaarts gelegen duinrijen en vochtige duinvalleien in de laagte tussen de twee duinenrijen in het noordelijk deel. Lange termijn: Mogelijk droger worden de condities in de laagte door instuiving van zand en daardoor ontwikkeling naar Kruipwilgstruwelen (H2170) en eventueel drogere habitats.
Morfologie	Korte termijn: Periodieke aanwezigheid van embryonale duinen afhankelijk van suppletie- en erosiecycli Lange termijn: Afhankelijk van suppletie keuze en toelaten overstuiving achterliggende dijk. Bij beperkte suppleties (waardoor meer erosie van het duin en mogelijk sterkere, secundaire verstuiving) en keuze voor geen overstuiving van de dijk (waardoor geen kans voor doorstuiving) is de ruimte voor dynamiek binnen de bestaande duinzone beperkt en zullen er hoogstwaarschijnlijk verstuivingsbeperkende maatregelen genomen moeten worden.
 Richtlijnen	
Afgeleide richtlijnen	• Grote verschil met de Zandmotor is dat het strand binnen het bereik van de golven ligt, waardoor het wordt hergesorteerd en er zand beschikbaar blijft voor verstuiving. Door het grotere brongebied voor verstuiving gaat de ontwikkeling van strand en zeereep daardoor snel richting natuurlijke vormen.

Van Dixhoorndriehoek

Gebied		Van Dixhoorndriehoek	
			
		 Algemene kenmerken	
Kenmerken		• Zandopspuiting van het zand dat vrijkwam bij aanleg Europoort. • Initieel werd het zand afgedekt met teeltaarde. • De kust voor de Van Dixhoorndriehoek is van extra zand voorzien in 1976 en 1977 en vrijwel jaarlijks tussen 1988 en 2000. Ook in 2003, 2004 en 2007 is hier zand gesuppleerd op het strand • In de periode 2014 tot 2106 heeft grootschalige herinrichting in het buitenduin van de Van Dixhoorndriehoek plaatsgevonden. Het struweel is hier verwijderd door ontgraving, het reliëf is vergroot en er is fijnkorrelige zand aangebracht om de verstuiwing te bevorderen	
Locatie en Oriëntatie		Zuid-Holland, NW	
Natura 2000		Solleveld en Kapittelduinen	
Zeewaterniveau (m+NAP)		Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Hoek van Holland Laagwater: -0,55 m +NAP Hoogwater: 1,11 m +NAP	
Jaartal aanleg		Rond 1970	
Oppervlakte (ha)		112	
Kustlengte (m)		1600	
Dwarslengte (m)		830-1000	
Doelstellingen aanleg		• Kustverbreding	
		 Typering ecologie	
Aantal habitat typen		4	
Kenmerkende vegetatie		• Witte duinen (H2120) - G • Kalkrijke grijze duinen (H2130A) - M/G • Duindoornstruwelen (H2160) - G • Kalrijke vochtige duinvallen (H2190B)	
Ontwerpaspecten ecologie		n.v.t.	
		 Typering geomorfologie	
Aantal geomorfologische eenheden		4	
Kenmerkende geomorfologie		• Kunstmatig aangelegd gebied met duinen en valleien. Bij de aanleg is zand gebruikt met grind en klei, waardoor de bodemopbouw niet ideaal is voor de ontwikkeling van een duinecosysteem. • Een volledig door recreatie verstoorde zeereep, met twee grote kerfachtige openingen aan de noordkant en in het midden, waardoor zand naar binnen stuift. • Naar binnen stuivend zand werd door een dichte duindoornbegroeiing ingevangen en hoopte daar op. Een deel van dit zand is bij de	

	herinrichting in 2014/2015 gebruikt om "'slecht" zand van de oorspronkelijke inrichting af te dekken. Binnenduin met een dichte begroeiing van struweel • Duinvalleien.
Ontwerpaspecten geomorfologie	• Opspuiting is met niet-systeemeigen materiaal, en bevat daardoor nutriënten, grind en klei.
 Ontwikkeling	
Morfologie	• De recreatiedruk is enorm hoog en drukt een flinke stempel op het gebied. Een echte zeereep kan nauwelijks door ontwikkeling komen door de intensieve betreding, maar ook omdat er strandpaviljoens in de zeereepzone liggen. Ook de duinen erachter worden betreden via illegale paden en de parkeerfaciliteiten die pal achter de zeereep liggen. Sinds de herinrichting in 2014 is de betreding afgenomen. • Er zijn enkele forse open stukken in de zeereep waardoor zand naar binnen kan stuiven, het meest extreem aan de noordkant, op de overgang naar het Spanjaardsduin. In het zuidelijk deel is het grootste deel van de ontwikkeling geblokkeerd of beïnvloed door strandpaviljoens en strandvilla's. • Verstuiving van strand via zeereep naar de achterliggende duinen is beperkt tot de open, kerfachtige stukken in midden en noord. De verstuiving loopt vrij snel vast in de vegetatie. • De valleien zijn geomorfologisch gezien stabiel.
Ecologie	• Door de uitgangssituatie (o.a. afgedekt met teelaarde) heeft zich snel een duindoornstruweel kunnen vestigen, waardoor natuurlijke dynamiek grotendeels tot stilstand kwam. In de periode 2012 tot 2016 heeft grootschalige herinrichting in de Van Dixhoorndriehoek plaatsgevonden. Het struweel is hier verwijderd door ontgraving, het reliëf is vergroot en er is fijnkorrelige zand aangebracht om de verstuiving te bevorderen. • Het afgelopen decennium is de toestand van de witte duinen in het gebied verbeterd, met name door bovengenoemde ingrepen (Sweco, 2018a). Een dergelijke verbetering is nog niet opgetreden voor de kalkrijke grijze duinen en vochtige duinvalleien in het gebied. Dit komt met name aan het lage aantal kenmerkende soorten.
Hydrologie	n.v.t.
Recreatie	• Droge duingraslanden worden negatief beïnvloed door hoge recreatiedruk (wandelaars). • Er zijn veel strandpaviljoens en strandvilla's, er is een treinstation dat bijna op het strand ligt. De betreding was extreem, lijkt de laatste jaren beter gereguleerd.
 Toekomstbeeld	
Ecologie	Door het grootschalig terugzetten van de duindoornstruwelen is de dynamiek in het gebied toegenomen, waardoor op termijn mogelijk ook de andere habitattypen profiteren. De recreatiedruk en daarmee de verstoring (en lokale eutrofiering door honden) blijft echter hoog en ook de restanten van in het verleden opgebrachte teelaarde en lokale aanwezigheid van puinen zullen natuurlijke successie en ontwikkeling blijven beïnvloeden
Morfologie	Korte termijn: Aan de zuidkant weinig ontwikkeling door de recreatie-infrastructuur. In het midden en noordelijk deel zou een iets natuurlijker zeereep tot ontwikkeling kunnen komen met een overstuivingsgradient. In de valleien geen verandering Lange termijn: Zolang de intensiteit van de recreatie niet afneemt zal er weinig veranderen. Door suppleren zal er verstuifbaar zand binnen blijven komen en kan via de verstuiving zand enigszins naar binnen stuiven. De gradient zal echter kort blijven, gezien de beperkte breedte van het gebied en de snelle overgang naar een door duindoorn gedomineerde, dichte begroeiing.
 Richtlijnen	

Afgeleide richtlijnen

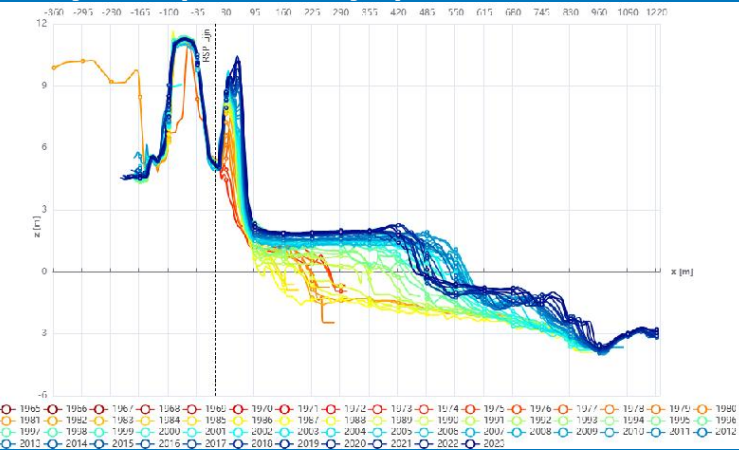
- De recreatie is hier zodanig dominant aanwezig dat van een min of meer natuurlijke ontwikkeling van de zeereep geen sprake kan zijn. In gebieden waar een dergelijke intensieve vorm van recreatie wordt nagestreefd, kan beter geen natuurdoel worden nagestreefd.
- Het gebruik van grind- en kleinhoudend zand is niet bevorderlijk voor de kwaliteit van de te ontwikkelen ecosystemen.

Prins Hendrik Zanddijk

Gebied		Prins Hendrik Zanddijk
		Niet beschikbaar
 Algemene kenmerken		
Kenmerken		• Opgespoten zanddijk, volledig kunstmatig • Initieel aangelegd met duinenrij, kreek/sluffer en kwelder. Een jaar later is het kunstmatig duin dicht ingeplant met helm. • Strandhaak met schelpenrijk zand
Locatie en Oriëntatie		Texel, ZO
Natura 2000		N.v.t.
Zeewaterniveau (m+NAP)		Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Oude Schild Laagwater: -0,73 m +NAP Hoogwater: 0,61 m +NAP
Jaartal aanleg		2018
Oppervlakte (ha)		111
Kustlengte (m)		3000
Dwarslengte (m)		700
Doelstellingen aanleg		• Veiligheid • Impuls aan natuurwaarden
 Typering ecologie		
Aantal habitat typen		2
Kenmerkende vegetatie		• Aangelegd duin ingeplant met helm, afgeleide van witte duinen (H2120) en ontwikkeling embryonale duinen (H2110) aan de voet van het gecreëerde duincomplex. • (Wadden)zeewaarts is ontwikkeling van zilte pioniersbegroeiing (H1310) en slijkgrasvelden (H1320)
Ontwerpaspecten ecologie		• Grotendeels bij aanleg creëren van 'eind'situatie (wat betreft duinen), vastlegging laat niet veel ruimte voor ontwikkeling en successie.
 Typering geomorfologie		
Aantal geomorfologische eenheden		3
Kenmerkende geomorfologie		• strandhaak achtig duin op a-typische locatie met "lagune". Gefixeerd duin zonder enige dynamiek om zandverliezen te voorkomen • Embryonale duinvorming op strand en strandhaak
Ontwerpaspecten geomorfologie		• Basisvolume voor veiligheidseisen, plus een slijtlaag om verwachte zandverliezen te compenseren.

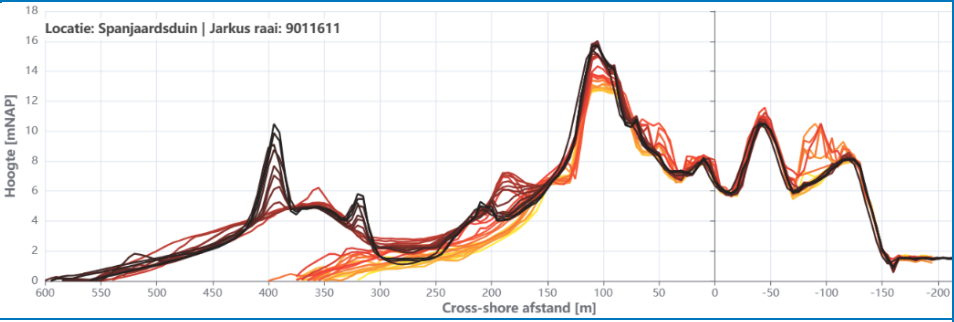
 Ontwikkeling	
Morfologie	De strandhaak verlengt naar het noordoosten, knijpt daar de "lagune" dicht, waardoor strand daar erodeert. Strand erodeert over de hele lengte, maar ondanks dat het smal is ontstaan er embryonale duinen op, waardoor een smalle strook kaal strand overblijft (25m breed). In de lagune is geen kweldervorming. De duinenrij is volledig inactief, 100% dicht geplant. De duinvoet erodeert niet maar kruipt eerder iets het strand op.
Ecologie	Na aanleg is er naast helm ook struweel aangeplant (Duindoorn en andere soorten). Recente waarnemingen laten zien dat zich naast de aangeplante soorten ook veel andere soorten gevestigd hebben, met name pioniers (Blauwe zeedistel, Zeekool), maar bijvoorbeeld ook Struikheide en Kattendoorn.
Hydrologie	Er loopt momenteel onderzoek naar de ontwikkeling van zoetwaterlens in het gebied door de Universiteit Leuven.
Recreatie	Aanwezig. Onbekend hoe het ecologie en geomorfologie beïnvloedt.
 Toekomstbeeld	
Ecologie	Korte termijn: Door de grootschalige aanplant van Helm en struweel zal het beetje dynamiek wat er momenteel nog is snel afnemen. Mogelijk dat de embryonale duinen die zich aan de duinvoet ontwikkelen zich nog doorontwikkelen tot witte duinen, maar gezien de beperkte ruimte en het gebrek aan natuurlijke aanvoer van materiaal is dat zeker niet vanzelfsprekend. Lange termijn: Een verdere ontwikkeling van de ingeplante duinen naar grijze duinen door uitspoeling van kalk en opbouw van organisch materiaal is mogelijk.
Morfologie	Korte termijn: In de duinenrij zou alleen enige ontwikkeling mogelijk zijn door afslag. Op korte termijn zal hier weinig veranderen. Strand en strandvlakte versmallen door erosie, de zandtong zal mogelijk iets verder naar het noorden verlengen, zorgt daar wel voor versterkte erosie van het strand. Op het strand aan de zuidkant en op de zandtong zal de ontwikkeling van embryonale duinen door gaan. Mogelijk dat er in de rustigere delen kweldervorming gaat optreden. Lange termijn: Erosie zal blijven overheersen en er zal regelmatig aanvulling van zand nodig zijn. Daardoor zal dit altijd in hoofdzaak een gekunsteld systeem blijven, met een aantal natuurlijke elementen.
 Richtlijnen	
Afgeleide richtlijnen	Geen, het is een volledig kunstmatig systeem en is nog te recent geleden aangelegd.

Neeltje Jans

Gebied	
	Neeltje Jans (Noordzee-zijde) 
 Algemene kenmerken	
Kenmerken	- Dijk bij Oosterscheldekering - Noordzeezijde heeft duinstrook met sluffer (bijna-afgesnoerde strandvlakte) en enige dynamiek. - Landzijde is kunstmatig, gericht op valleiontwikkeling en stabiel landschap.
Locatie en Oriëntatie	Zeeland, NW
Natura 2000	Ingeklemd tussen Voordelta en Oosterschelde
Zeewaterniveau (m+NAP)	Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Oosterschelde 04 Laagwater: -1,23 m +NAP Hoogwater: 1,46 m +NAP
Jaartal aanleg	1986
Oppervlakte (ha)	40
Kustlengte (m)	2000
Dwarslengte (m)	250
Doelstellingen aanleg	Omvorming van werkeiland t.b.v. aanleg Oosterscheldekering naar natuur door TBO's
 Typering ecologie	
Aantal habitat typen	4
Kenmerkende vegetatie	- Het strand bestaat uit slik- en zandplaten (H1140B) en een smalle zone embryonale duinen (H2110). - De zeereep bestaat uit witte duinen (H2120) daarachter duindoornstruwelen (H2160) en kalkrijke grijze duinen (H2130A) - De sluffer is begroeid geraakt (2006-2010) met natte vegetatie, mogelijk ontwikkeling naar een type vochtige duinvallei (H2190)
Ontwerpaspecten ecologie	- Opbouw van mini-zoetwaterbel, wat vernatting en verzoeting ten gevolge heeft. Onbekend of dit ook bewust zo ontworpen is. - Gewenste ontwikkeling naar vochtige duinvallei in sluffer.
 Typering geomorfologie	
Aantal geomorfologische eenheden	6
Kenmerkende geomorfologie	- Zeereep breidt zich uit aan de noordkant, maar erodeert vanaf 2014. - In 2014 is de sluffer bijna dichtgestoven, waarna het gaat begroeien, en in 2019 volledig is begroeid. In 2023 is alleen de voorkant hiervan nog open. Achterliggende vallei stroomt niet meer vol.

	Rond 2013 is er in het uiterste noorden een forse stuifkuil ontstaan (of gemaakt?) direct achter het strandpaviljoen tegen de dijk aan. Vanaf 2020 zijn maatregelen genomen om verdere uitstuiving te voorkomen (lijkt op wilgenschermen / aanplanten van Helm).
Ontwerpaspecten geomorfologie	Onbekend.
 Ontwikkeling	
Morfologie	- Neeltje Jans is ontstaan vanuit twee zandplaten waarop werkeilanden zijn aangelegd t.b.v. aanleg van de Oosterscheldekering, Werkeiland Neeltje-Jans in het noorden, Werkeiland Noordland in het zuiden. Rond 1984 zijn beide eilanden verbonden is een natuurgebied aangelegd, met een duinrug van 10m hoog voor de dijk met aan de zuidkant een onvolledig afgesnoerde vallei. De vegetatie is vermoedelijk grotendeels aangeplant. - Aanvankelijk was de duinzone ongeveer 180m breed, ter hoogte van de afgesnoerde vallei iets breder, circa 210m breed. Door de stroming van water en wind is het zuidelijk deel door afslag behoorlijk versmald, tot nu zo een 140 m en het noordelijk deel juist verbreed tot zo een 250 m. De onvolledig afgesnoerde vallei is nu volledig afgesnoerd, de ingang is tot een kerf omgevormd. - Door de afslag zou het echter kunnen dat de kerf doorbreekt naar de vallei en deze opnieuw onvolledig afgesnoerd wordt. Ook in het zuidelijk, erosieve deel zijn verschillende kleine kerven ontstaan en is er sprake van een licht paraboliserende zeereep met topjes rond 15m NAP en een overstuivingsgradient vanaf de zeereep afnemende landwaarts. - Aan de noordzijde vindt vooral duinvorming tegen de zeereep plaats. - Het reliëf tussen de zeereep en de dijk is nog vrijwel gelijk aan dat van direct na de aanleg.
Ecologie	Vegetatieopnames uit 2010 laten zien dat zich een afwisselend duinlandschap ontwikkeld had vegetaties kenmerkend voor grijze duinen (Duinsterretje en Zandzegge subtypen) en duindoornstruwelen en vooral een forse oppervlakte witte duinen (en lokaal embryonale duinen) (Helm subtype). Na de opnames uit 2010 is de morfologische ontwikkeling van het gebied niet tot stilstand gekomen, dus het is zeer waarschijnlijk dat ook de ontwikkeling van het duinlandschap verder gegaan is, onder meer door de afsnoering van de (voormalige) sluffer, waar nu mogelijk een vochtige duinvallei aan het ontwikkelen is.
Hydrologie	Onbekend.
Recreatie	Recreatie-invloed lijkt beperkt, maar er worden wel lokale maatregelen genomen om te sterke verstuiving/ erosie rondom het strandpaviljoen tegen te gaan.
 Toekomstbeeld	
Ecologie	De mate van dynamiek in dit gebied is zodanig dat verwacht mag worden dat zowel witte- als grijze duinen zich optimaal kunnen (blijven) ontwikkelen, mits het duinstruweel (door bijv. begrazing door konijnen) zich niet te sterk uitbreid. Actieve kerven en geregelde nieuwvestiging van embryonale duinen zal daar aan bijdragen.
Morfologie	Toekomst beeld is sterk afhankelijk van suppletiebeleid.
 Richtlijnen	
Afgeleide richtlijnen	De ontwikkeling is zeer gecompliceerd, waardoor het de vraag is of hier algemene richtlijnen uit af te leiden zijn.

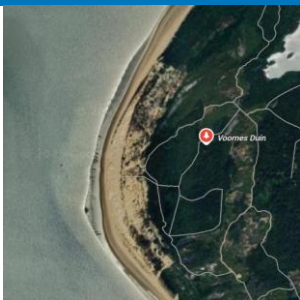
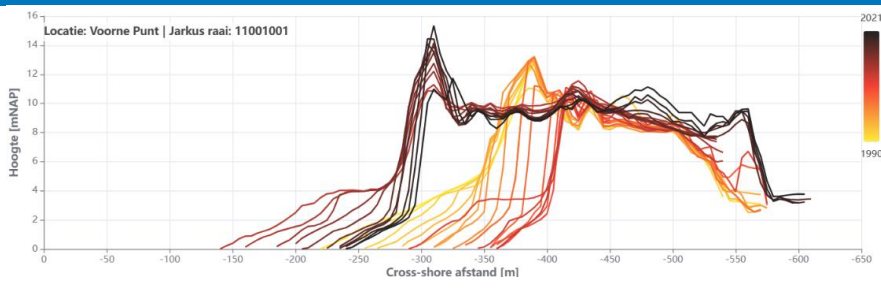
Spanjaardsduin

Spanjaardsduin	
	
 Algemene kenmerken	
Kenmerken	- Aangelegd strand, met daarop duinenrij (basisduin) en afgesnoerde strandvlakte. - Strandvlakte is nog voor een deel het oude strandoppervlak. - Voormalige zeereep actief element met veel secundaire verstuingen
Locatie en Orientatie	Zuid-Holland, NW
Natura 2000	n.v.t.
Zeewaterniveau (m+NAP)	Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Hoek van Holland Laagwater: -0,55 m +NAP Hoogwater: 1,11 m +NAP
Jaartal aanleg	2008/2009
Oppervlakte (ha)	70
Kustlengte (m)	2800
Dwarslengte (m)	50-300
Doelstellingen aanleg	6.1 ha natte duinvallei, 9.8ha kalkrijke grijze duinen en nieuwe populatie Groenknolorchis binnen 25 jaar na aanleg (compensatie aanleg 2e Maasvlakte)
 Typering ecologie	
Aantal habitat typen	6
Kenmerkende vegetatie	- Witte duinen (H2120) op de nieuwe stukken zeereep. - Vochtige duinvalleien (H2190_B) op de oevers van de plas in de binnenduinrand. - Embryonale duinen (H2110) aan de voet van de zeerepen vanaf 2018. - Op de deels afgesnoerde strandvlakte ontwikkelt vegetatie zich langzaam vanaf 2019, maar ook in 2023 zijn er nog veel kale plekken.
Ontwerpaspecten ecologie	- Aanplanting, ook in alternatieve patronen. - Duindoornstruiken worden weggehaald uit de vallei, basisduin wordt gemaaid en eventuele stuifgaten worden dichtgezet om zanddynamiek in vallei te beperken.
 Typering geomorfologie	
Aantal geomorfologische eenheden	5
Kenmerkende geomorfologie	- Sedimentatie op basisduin. - Verstuivingen in achterliggende duinen zijn grootschalig, maar gevolg van de dynamiseringsingrepen in 2014-2016.
Ontwerpaspecten geomorfologie	- Basisduin aangelegd als kaal duin, later aangeplant i.v.m. te veel erosie. - Veel dynamiek op zeereep, en ook in vallei en achterliggende oude zeereep. Maatregelen om verstuing te versterken in de vorm van vegetatie verwijderen en stuifkuilen.

	• Benodigde hoogte duinvallei voor natte duinvalleiontwikkeling is moeilijk in te schatten. Gezien het belang hiervan zou dit in veel meer detail m.b.v. modellering voorspeld moeten worden. • In 2019 is de vallei verlaagd om voldoende natte condities voor het behalve van de doelstellingen m.b.t. natte duinvalleien te realiseren. In 2020 is hooi ingebracht in de hogere delen van de vallei om de ontwikkeling van een grijze duinvegetatie te versnellen.
 Ontwikkeling	
Morfologie	• Aanvankelijk veel verstuiving vanaf het niet beplante basisduin, wat daardoor lager werd en breder door afzetting aan de lijzijde. Het wel beplante basisduin werd door aanstuiving zowel breder (maar nu aan de zeewaartse zijde) en hoger. De vallei verlaagde door uitstuiving, het grondwater lag aanvankelijk ver onder het maaiveld. • Het niet beplante basisduin is in 2013 alsnog ingeplant met twee stroken helm, de meest landwaartse recht, de meest zeewaartse met een golvend patroon. Vanaf dan neemt breedte en hoogte van dit deel van het basisduin ook toe. • Dynamiek in de vallei blijft groot, mede doordat veel wind uit zuidzuidwest precies door de vallei heen blaast. Daardoor blijft met name de oostelijke rand van de vallei erosief. • In 2019 is de vallei op verschillende plaatsen uitgediept om uiteindelijk aan de opgave voor natte duinvallei te voldoen. • Momenteel is nog steeds kleinschalige dynamiek in de oude zeereep aan de noordkant, en grootschaligere dynamiek in de oude zeereep aan de zuidkant, waar in 2014 dynamiseringsingrepen zijn uitgevoerd. Dit ligt buiten het projectgebied van het Spanjaardsduin.
Ecologie	• Als snel bleek dat de aangelegde laagte niet geschikt was voor vestiging van het habitatype vochtige duinvallei. Om de condities te verbeteren zijn in de periode 2017-2020 de openingen in de zeereep gesloten en aangeplant met helm. Tevens is een vijftal laagtes uitgegraven in de afgesnoerde strandvlakte, waarbij lokaal het maaiveld tot 1m verlaagd is. Ook door het ontbreken van een zaadbank in het gesuppleerde materiaal en langzame ontwikkeling daarvan bleef de vestiging van kenmerkende soorten voor de habitatypen minimaal. Om dit proces te versnellen is er in 2019 en 2021 maaisel opgebracht uit Meijendel (grijze duinen) en het Kennemerstrand (duinvallei) (Meulen et al., 2024). • Bovengenoemde interventies hebben nagenoeg direct effect gehad. In de afgesnoerde strandvlakte heeft zich inmiddels Parnassia, Zomerbitterling en Moeraskartelblad gevestigd en in 2022 is het eerste bloeiende exemplaar van de Groenknolorchis aangetroffen. (Meulen et al., 2024) • Ook na 2021 vindt nog (ontwikkelings)beheer plaats in het gebied. Zo is in 2023 door Zuid-Hollands landschap in grote delen van het gebied gemaaid, wilgenopslag verwijderd en zijn er aan de oostkant van de natte laagtes in de afgesnoerde strandvlakte over honderden meters lengte riet aangeplant. Het maaien van snelgroeiende en hoger opgaande vegetatie (zowel kruidachtig zoals Helm, struiken zoals Duindoorn en bomen zoals wilg) gaat verruiging tegen en zal daarom kenmerkende soorten van de doelhabitatypen een competitief voordeel geven. Ook zal het maaien en niet afvoeren (dus mulchen of chopperen) leiden tot een toename van organisch materiaal in de bodem en kan daarmee de successie van witte duinen naar grijze duinen versnellen.
Hydrologie	• Grondwaterstand steeg minder dan ontworpen (er was in het ontwerp slechts een zeer globale voorspelling voor de ontwikkeling van de grondwaterstand gemaakt), waardoor ontwikkeling tot natte duinvallei beperkt was. Daarom is in 2019 de vallei verlaagd.
Recreatie	Beperkt, waarschijnlijk voornamelijk illegale betreding, en loslopende honden die onder het hek door gaan.

	 Toekomstbeeld
Ecologie	• Er zijn recente incidentele waarnemingen (waarneming.nl, na 2021) in het gebied van Zilt torkruid, Waterpunge, Fijne kervel, Duinfakkelgras, Zanddoddegras, Echt bitterkruid, Kromhals en andere typische en kenmerkende soorten van de habitattypen grijze duinen en vochtige duinvalleien. Dit suggereert dat de ontwikkeling die voor 2021 is ingezet richting kwalificerende habitattypen doorzet. Als de beheermaatregelen op termijn afgebouwd worden (kan mogelijk worden bij afnemende stikstofdepositie) en de dynamiek verder afneemt lijkt de ontwikkeling en uitbreiding van het areaal van beide habitattypen kansrijk. • Direct landinwaarts van het Spanjaardsduin zijn de (deel)gebieden Zeereep Ter Heijde – Vlugtenburg, De Banken en Van Dixhoorndriehoek gelegen, allen zoekgebied en/of reeds vestigingsplaats van kalkrijke grijze duinen. • Het ontbreken van instuivend (kalkrijk) materiaal vanaf stand(vlakte) en zeereep wordt gezien als een belangrijke factor dat het oppervlakte en de kwaliteit (bijv. De Banken: 1,67ha in slechte toestand is (Arcadis, 2021)). • De morfologische monitoring van het Spanjaardsduin (Meulen et al., 2024) suggereert dat de beschikbaarheid van kalkrijk zand in groot is, maar directe (recente) metingen uit de achterliggende gebieden ontbreken om dit te onderbouwen. De beheermaatregelen om verstuiwing en winddynamiek in het Spanjaardsduin te beteugelen hebben mogelijk een negatief effect op de kwaliteitsverbetering van het achterliggende duingebied.
Morfologie	Korte termijn: geleidelijk aan afnemende ontwikkeling door stabilisatie, aanstuivende zeereep Lange termijn: weinig verandering door stabilisatie, als er gesuppleerd blijft worden. Zonder suppleties zal het gebied op den duur wegeroderen, waarbij eerst een situatie zal ontstaan met een doorbraak door het basisduin, en geleidelijk aan meer invloed van de zee in de vallei, totdat het basisduin geheel weggeerodeerd zal zijn.
	 Richtlijnen
Afgeleide richtlijnen	• Duinaanleg t.b.v. een bepaalde hydrologische situatie vereist grondige grondwatermodellering om tot een realistische schatting van de grondwaterstand te komen. Dit geeft dan een betere onderbouwing voor de geomorfologische ondergrond die vereist is om tot een goed resultaat te komen. Omdat het hier nu aan een goede grondwatervoorspelling ontbrak is er veel geknutseld om de bodemligging t.o.v. grondwater op orde te krijgen.

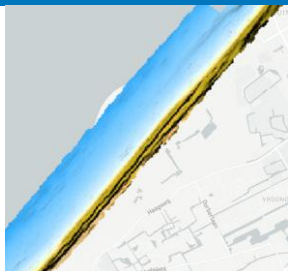
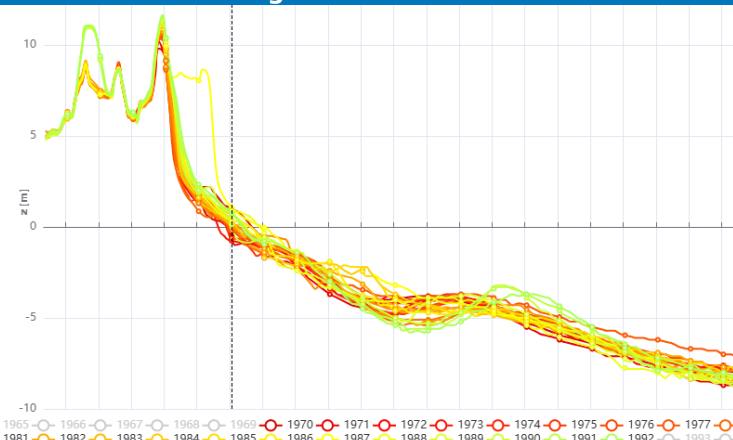
Voorne Punt

Gebied		Voorne Punt	
			
 Algemene kenmerken			
Kenmerken		- Oude duinversterking met kunstmatig reliëf is afgedekt met schoon zand, aan de zeewaartse zijde is een nieuwe duinstrook hier tegenaan gelegd, tot 125m breed, hoogte 10m NAP. - Helmstengels zijn ingeëgd in plaats van ingeplant. Het geheel is daardoor zeer dynamisch geworden. Het deel waar de oorspronkelijke duinversterking onder ligt is inmiddels grotendeels begroeid, de voorgelegde strook is nog steeds vrij kaal.	
Locatie en Oriëntatie		Zuid-Holland, Delta, West	
Natura 2000		Voornes Duin	
Zeewaterniveau (m+NAP)		Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Haringvliet10 Laagwater: -0,81 m +NAP Hoogwater: 1,18 m +NAP	
Jaartal aanleg		2009	
Oppervlakte (ha)		48	
Kustlengte (m)		1450	
Dwarslengte (m)		250	
Doelstellingen aanleg		- Versterken zwakke schakel - Kwaliteitsverbetering oude duinversterking waar slib- en grindrijk zand in zit, door bedekking met goed zand.	
 Typering ecologie			
Aantal habitat typen		7	
Kenmerkende vegetatie		- Slik- en zandplaten op het strand (H1140A) - Witte duinen (H2120), duindoorn (H2160) en grijze duinen (H2130) bij zeereep.	
Ontwerpaspecten ecologie		- Vegetatie is ingeëgd in plaats van ingeplant - De duinsuppletie is slechts gedeeltelijk vastgelegd; er is ruimte voor kleinschalige verstuuving gelaten waardoor een semi-natuurlijk kleinschalig reliëf kan ontstaan en ontwikkeling van een natuurlijke zeereepbegroeiing wordt gestimuleerd	
 Typering geomorfologie			
Aantal geomorfologische eenheden		4	
Kenmerkende geomorfologie		- Ontwikkelt zich als transgressief duin met afslag aan de zeewaartse zijde en veel overstuuving van de achterliggende vallei. - Door overstuuving van de vallei verbreedt de zeereep enigszins. Tegelijkertijd trekt de kustlijn terug, waardoor de verbreding beperkt blijft. - Er ontstaan op heel kleine schaal lopende duinen die vanaf de zeereep landinwaarts lopen, en er ontstaat een enigszins paraboliserend reliëf op de zeereep.	

	Op de overgang van nieuw aangelegde duinstrook naar de oude duinversterking is door de vegetatieontwikkeling en vervolgens invang van zand een rug ontstaan.
Ontwerpaspecten geomorfologie	- De mate van dynamiek en de beweging van het duin is groter dan bij de situatie waarbij een embryonaal duinveld door erosie wordt opgerold (Cupidopolder Terschelling, Noorderstrand Schiermonnikoog). Maar het is twijfelachtig of in dit systeem genoeg massa zit om een paraboliserend landschap te laten ontstaan. De tijdsperiode is ook nog kort, het systeem is nu 15 jaar onderweg. Het laat wel goed zien dat het niet aanplanten van helm of andere vegetatie tot een zeer dynamisch systeem leidt, dat niet zomaar uit elkaar of "weg" waait, het systeem an sich blijft intact en beweegt langzaam landwaarts (aan de achterzijde is het al zo'n 50m opgeschoven, tussen 2010 en 2018). Bijkomend probleem kan zijn dat in de oude duinversterking "'slecht", slib- en grindhoudend zand aanwezig is, wat minder makkelijk in beweging zal komen. - De strook zand die is aangebracht vóór de oude zeereep is op zijn breedst 125 m breed in het middengebied, uitwiggend naar noord en zuid, en heeft een hoogte van 10m NAP.
 Ontwikkeling	
Morfologie	- Aangroei zeereep op zuidelijkste puntje, afslag en kerfontwikkeling in de rest van het gebied. - Enigszins paraboliserend reliëf op de zeereep, een begin van zich losmakende duinen aan de landwaartse zijde (in het midden). - Tussen 2010 en 2018 landinwaartse beweging in de oude strandvlakte (50m). Het stilvallen hiervan valt samen met een toename aan vegetatie vanaf 2018. - Door verbreding zeereep trad vernatting op in oude strandvlakte met schapenwei ten oosten van zeewering, waarna na afslag van de zeereep de grondwaterstand weer daalt.
Ecologie	Gedynamiseerde oude zeereep stabiliseert snel in de laatste vier jaar, door hergroei van helmgras en duindoorn. De ingrepen hebben een positief gehad op het areaal van het habitatype witte duinen in het gebied (deelgebied Breede Water).
Hydrologie	- Stijging grondwaterspiegel door duinverzwaring. - De Schapenwei wordt alleen in stand gehouden door bemaling in de zomer. In de jaren '70 had de Schapenwei een afwatering naar zee via een opening in de zeereep. Deze is gedicht.
Recreatie	Onbekend.
 Toekomstbeeld	
Ecologie	Korte termijn: Het is de verwachting dat op termijn het areaal witte duinen weer zal afnemen door continue erosie. Eveneens zijn achterliggende duinen sterk vastgelegd (slibhoudende bodem, struweelvorming) zonder ingrepen zal er geen extra dynamiek zal ontstaan. Het is wel voorzien dat rond 2030 een nieuw strand- of vooroeversuppletie nodig is om de kustverdediging op peil te houden. Afhankelijk van de methode kan dan wederom de vorming van embryonale en witte duinen een boost krijgen. Lange termijn: Sterk afhankelijk van suppleties.
Morfologie	Korte termijn: Aan gebrachte zand op oude duinversterking zal verder dichtgroeien. Aan de zeewaartse zijde zal afslag tot een versmalling leiden. Dynamiek zal geleidelijk afnemen. Lange termijn: Duinversterking zal op een gegeven moment weg geerodeerd zijn, waarna er een nieuwe duinversterking nodig zal zijn.
 Richtlijnen	
Afgeleide richtlijnen	Waarschijnlijk is de massa van het aangebrachte duin onvoldoende groot om grootschalige, secundaire duinontwikkeling op gang te brengen.

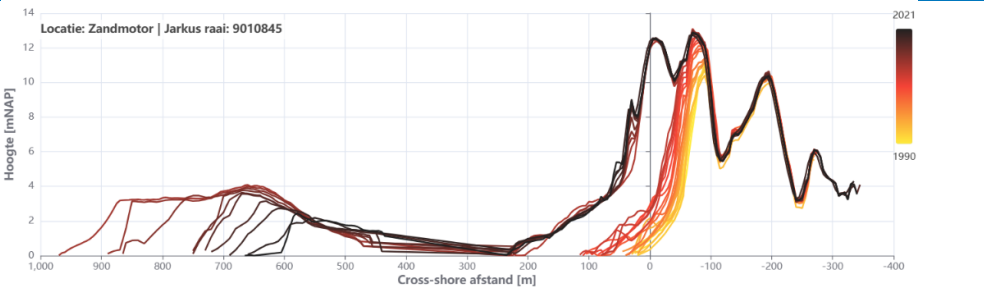
	• Mogelijk beperkt de aanwezigheid van slib- en grindhoudend zand in de onderliggende duinversterking de verstuiving en daarmee de potentie voor parabolisering
--	---

Oude Duinversterking Delfland

Gebied		Oude Duinversterking Delfland	
			
 Algemene kenmerken			
Kenmerken		- Kunstmatige duinversterking met kunstmatig "duin"relief, bestaande uit twee duinenrijen, waarvan de meest landwaartse bedekt is met puntmutsjes om een natuurlijk reliëf na te bootsen - Ligt afgesloten van het strand door aanleg nieuwe duinversterking aan zeewaartse zijde - Hier en daar secundaire verstuiving aan de lijzijde van de meest landwaartse duinenrij	
Locatie en Oriëntatie		Zuid-Holland, tussen Kijkduin en Monster (bij de Zandmotor en nieuwe duinversterking), NW	
Natura 2000		Solleveld en Kapittelduinen	
Zeewaterniveau (m+NAP)		Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Hoek van Holland en Scheveningen Laagwater: -0,59 m +NAP Hoogwater: 1,06 m +NAP	
Jaartal aanleg		1986	
Oppervlakte (ha)		80	
Kustlengte (m)		3800	
Dwarslengte (m)		circa 150	
Doelstellingen aanleg		Veiligheid	
 Typering ecologie			
Aantal habitat typen		4	
Kenmerkende vegetatie		NB. Gebaseerd op t0 (2007), aangevuld met informatie uit NDA (2021) - in die laatste specifiek deelgebied 'Zeereep Solleveld' Witte duinen (goede kwaliteit), kalkrijke grijze duinen (matige kwaliteit), kalkarme grijze duinen (vooral zeer groot areaal achter de oude zeereep – goede kwaliteit), Duindoornstruweel (goede kwaliteit)	
Ontwerpaspecten ecologie		Onbekend	
 Typering geomorfologie			
Aantal geomorfologische eenheden		3	
Kenmerkende geomorfologie		Eerste duinenrij met strak zanddijk relief, tweede duinenrij met puntmutstopjes, tussenliggend een laagte	

	Oorspronkelijk grensde de oude duinversterking aan het strand, maar door aanleg van de nieuwe duinversterking is de verbinding met het strand er niet meer.
Ontwerpaspecten geomorfologie	- kunstmatig reliëf dat door beperkte overstuiving niet natuurlijker wordt - met huidige beschikbaarheid van digitale terreinmodellen is een veel natuurlijker reliëf na te bootsen
 Ontwikkeling	
Morfologie	Vermoedelijk na aanleg weinig veranderd
Ecologie	Onbekend
Hydrologie	Onbekend
Recreatie	Onbekend
 Toekomstbeeld	
Ecologie	N.v.t. i.v.m. nieuwe duinversterking
Morfologie	Korte termijn: door verruiging aan voorzijde en op nieuwe duinversterking zal hier geen overstuiving plaatsvinden, morfologie blijft onveranderd Lange termijn: aangezien de nieuwe duinversterking na erosie opnieuw aangelegd zal moeten worden i.v.m. veiligheidseisen is de verwachting dat er in de oude duinversterking zonder ingrijpen niets zal veranderen
 Richtlijnen	
Afgeleide richtlijnen	- Alleen als dit ecologisch iets oplevert kan het enige waarde hebben als schakel tussen de aangrenzende gebieden. - Tijd is noodzakelijk voor de ontwikkeling van de ecologie, ook voor de jonger successiestadia zoals (aangelegde) witte duinen.

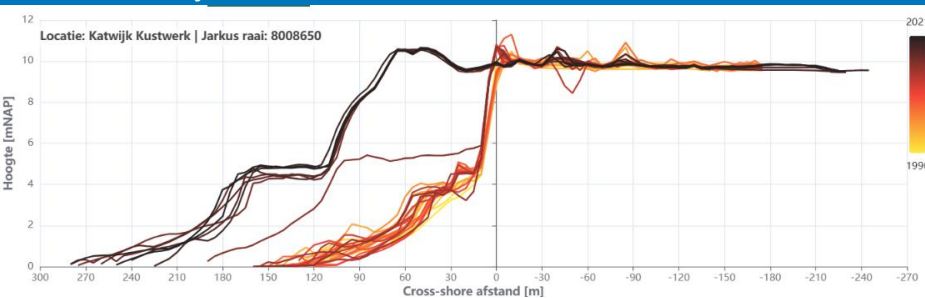
Duinversterking Delfland

Gebied	Duinversterking Delfland
	 Locatie: Zandmotor Jarkus raai: 9010845
 Algemene kenmerken	
Kenmerken	• Kunstmatige duinversterking voor Zwakke Schakel Delfland, aangelegd 2010-2011. De duinversterking ligt in feite ingeklemd tussen de oude duinversterking Delfland en de Zandmotor. De ontwikkeling van de duinversterking kan niet los gezien worden van die van de Zandmotor. • Aanstuiving, waardoor zeereep snel natuurlijker en hoger is geworden • Minder aanstuiving achter lagune en strandmeer, ook geringere zoutspray, waardoor in dit deel verruiging (vestiging van duindoorn) sneller op gang kwam dan ten noorden en ten zuiden. • Vanaf RSP108.07 naar het zuiden mogelijkheden voor embryonale duinontwikkeling. Ten noorden daarvan geen mogelijkheden door intensieve strandreiniging. • Dichte aanplant waardoor doorstuiving gelijk na aanleg stilviel
Locatie en Oriëntatie	Zuid-Holland (bij de Zandmotor), NW Tussen Kijkduin en Spanjaardsduin
Natura 2000	Solleveld en Kapittelduinen
Zeewaterniveau (m+NAP)	Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Hoek van Holland en Scheveningen Laagwater: -0,59 m +NAP Hoogwater: 1,06 m +NAP
Jaartal aanleg	2010/2011
Oppervlakte (ha)	62
Kustlengte (m)	8300
Dwarslengte (m)	100
Doelstellingen aanleg	• Veiligheid • Zwakke Schakel Delfland
 Typering ecologie	
Aantal habitat typen	4
Kenmerkende vegetatie	• Veel kaal zand, met geleidelijk meer helm • Vanaf 2020 sterke uitbreiding van duindoorn
Ontwerpaspecten ecologie	• Aanplanting van helm was voldoende om doorstuiving te voorkomen.

 Typering geomorfologie	
Aantal geomorfologische eenheden	3
Kenmerkende geomorfologie	• Embryonale duinen tegen, maar ook voor de zeereep. • Kleinschalige erosievormen zoals kerfachtige vorm of stuifkuil • Aanstuiving zonder of met beperkte doorstuiving
Ontwerpaspecten geomorfologie	• Aanleghoogte duin 10-11 m
 Ontwikkeling	
Morfologie	• Door aanstuiving oogt het duin natuurlijk. • Zand blijft in duinversterking hangen en bevordert zo de duingroei. • Geen verbinding tussen zandmotor en achterland, waardoor er aanstuiving in plaats van doorstuiving is. Daardoor is de grootste hoogtetoename in de voorzijde van de zeereep (voor de duinversterking, >5m), en dus niet op het hoogste deel (2-3m). • Diverse pogingen tot kerfaanleg, op steeds grotere schaal. Succes vooralsnog beperkt, omdat de ruimte beperkt is en er een fietspad in de weg ligt.
Ecologie	• De nieuwe zeereep heeft een begroeiing die gedomineerd wordt door Helm, kenmerkend voor habitat witte duinen (H2120). Lokaal vestigt zich hier ook duindoorn onder invloed van de afgenomen dynamiek als gevolg van de aanwezigheid van de zandmotor en strand-bebouwing. (Arcadis, 2021)
Hydrologie	N.v.t.
Recreatie	Door fietspad is er geen vrije ontwikkeling mogelijk en beperkte mogelijkheid voor vererving
 Toekomstbeeld	
Ecologie	In de natuurdoelanalyse (Arcadis, 2021) wordt voorgesteld delen van de nieuwe zeereep te herprofilen (vergroten dynamiek door verwijderen helm) waardoor ter plekke en de achterliggende oorspronkelijke zeereep van Solleveld en Ter Heijde (en het Solleveld zelf) kalkrijk grijze duinen van goede kwaliteit kunnen ontwikkelen. Dit zal echter wel leiden tot onderstuiven (en op termijn mogelijk ook ondermijnen) van het fietspad.
Morfologie	Korte termijn: • Verdere ophoging en uitbouw van duin in zeewaartse richting. Lange termijn: • Afhankelijk van suppletierégime (en ontwikkeling zandmotor). Zonder suppleties afslag en mogelijk intensivering van dynamiek door erosie van de zeereep. Zonder suppleties zal er op den duur weer een nieuwe versterking nodig zijn.
 Richtlijnen	
Afgeleide richtlijnen	• Mate van aanplant heeft grote invloed op de mate van doorstuiving. De hier gehanteerde dichtheid was voldoende om de doorstuiving naar de achter liggende oude duinversterking volledig te blokkeren. Hierdoor is de vegetatieontwikkeling op de oude duinversterking versterkt, waardoor de doorstuiving nog verder beperkt werd.

	• Fietspad direct achter zeereep is erg beperkend voor mogelijkheden dynamiek • Patroon van aanplant blijft lang herkenbaar, ook bij forse overstuiving. • Morfologie kan snel natuurlijker worden bij forse overstuiving.
--	--

Kustwerk Katwijk

Gebied		Kustwerk Katwijk	
			
 Algemene kenmerken			
Kenmerken		- Nieuwe duinenrij, met daarin een parkeergarage - Te veel overstuiving wordt voorkomen om dakbelasting tegen te gaan - Nauwelijks dynamiek - Veel voorzieningen en recreatie tegen duinvoet	
Locatie en Oriëntatie		Katwijk, WNW	
Natura 2000		N.v.t.	
Zeewaterniveau (m+NAP)		Op basis van astronomisch getij (jaar 2025) station Scheveningen Laagwater: -0,63 m +NAP Hoogwater: 1,00 m +NAP	
Jaartal aanleg		2013/2014	
Oppervlakte (ha)		45	
Kustlengte (m)		1750	
Dwarslengte (m)		135 (275 m inclusief strand)	
Doelstellingen aanleg		- Kustverdediging, Zwakke Schakel Katwijk - Ondergrondse parkeergarage	
 Typering ecologie			
Aantal habitat typen		2	
Kenmerkende vegetatie		- Met helm ingeplant duin (H2120) - Ontwikkeling van duindoornstruweel (H2160) - Gebied raakt langzaam begroeid met helm en duindoorn	
Ontwerpaspecten ecologie		Niet aanwezig	
 Typering geomorfologie			
Aantal geomorfologische eenheden		2	
Kenmerkende geomorfologie		- Lichte aanstuiving tegen duinvoet - Veel suppleties - Banketvorming recreatief strand	
Ontwerpaspecten geomorfologie		Het duin is kunstmatig aangelegd. Er mag vrijwel geen overstuiving plaatsvinden i.v.m. belasting van het dak van de ondergrondse parkeergarage. De vormen blijven daarom onnatuurlijk.	

	• Qua geomorfologie en geomorfologische processen biedt dit ontwerp weinig perspectief.
 Ontwikkeling	
Morfologie	• Er is geen ontwikkeling mogelijk, anders dan erosie van het strand door natuurlijke erosie, gevolgd door suppleties om zandtekorten weer aan te vullen. • Overstuiving van het duin wordt niet toegelaten. • Het duin is doorsneden door paden.
Ecologie	Aangezien met ingreep geen specifieke natuurdoelen werden nagestreefd, is de ecologische ontwikkeling ook niet gemonitord en geëvalueerd. Recente gegevens (waarneming.nl, >2020) laten zien dat (pionier)soorten als Blauwe zeedistel, Echt bitterkruid en Duinaveruit in het gebied wijdverspreid zijn, maar ook Duindoorn heeft zich inmiddels gevestigd.
Hydrologie	Onbekend
Recreatie	• De hoeveelheid infrastructuur is groot. Betreding lijkt beperkt te blijven tot de paden. • Het nieuwe duingebied ligt in een gebied met een zeer hoge recreatiedichtheid: er zijn 14 strandpaviljoens ter plekke met elk een eigen strandopgang en ook twee wandel / fietspaden die parallel met de kustlijn lopen.
 Toekomstbeeld	
Ecologie	Er zijn in het gebied sterke beperkingen aan mogelijkheden voor natuurlijke ontwikkeling (door beperkte duinbreedte, vastlegging en verstoring). De aangelegde witte duinen lijken zich te ontwikkelen tot een (verarmd) duindoornstruweel en het is waarschijnlijk dat deze ontwikkeling zich de komende jaren doorzet.
Morfologie	Korte termijn: geen ontwikkeling, geen perspectief voor natuurlijke geomorfologische ontwikkeling Lange termijn: geen ontwikkeling, geen perspectief voor natuurlijke geomorfologische ontwikkeling
 Richtlijnen	
Afgeleide richtlijnen	• Alleen als dit ecologisch iets oplevert kan het enige waarde hebben als stapsteen tussen de aangrenzende gebieden. Als de ecologische waarde verwaarloosbaar is, dan levert dit soort oplossingen niets op voor natuur.

Appendix D: Klimaatverandering, zeespiegelstijging en zoetwaterzekerheid van de duinkust

Door: D.G. Cirkel (KWR Water Research Institute)

De Nederlandse kustduinen zijn belangrijk voor de zoetwaterzekerheid in West-Nederland. Zowel voor de drinkwatervoorziening die de duinen gebruiken om van rivierwater drinkwater te maken en beperkt duinwater onttrekken als voor de kust- en duinnatuur en landbouw in de binnenduinstrand. Klimaatverandering resulteert in een stijgende zeespiegel maar heeft ook effect op de grondwateraanvulling in het duin. Tenslotte zijn er een aantal terugkoppelingen die medebepalend zijn voor de ontwikkeling van zoetwaterlenzen onder de kustduinen

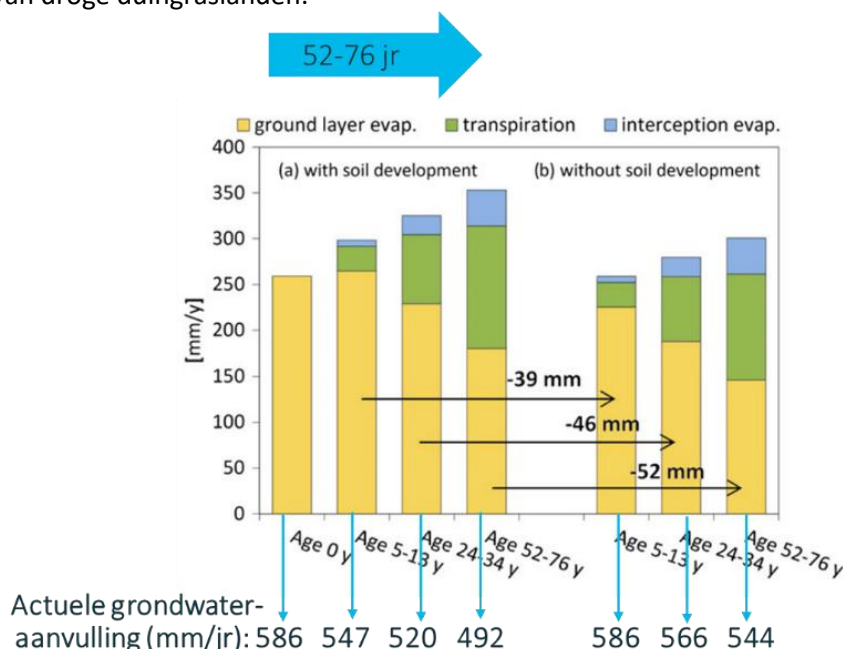
Ontwikkeling van neerslag en verdamping langs de kust

Sterk bepalend voor het ontstaan van zoetwaterlenzen in het kustgebied is de grondwateraanvulling. Deze aanvulling is weer afhankelijk van neerslag, verdamping en de ontwikkeling van bodem en vegetatie. De neerslag neemt gemiddeld over heel Nederland al enkele decennia toe. Een recente studie (Sluijter et al., 2018) bevestigt dit beeld en rapporteert een toename van 15-30%, met vooral een toename in de kuststrook. De klimaatnormaal voor de neerslag is voor de stations Vlissingen en Den Helder gestegen van ca. 700 mm/jr in de periode 1930-1960 naar meer dan 830 mm/jr in de periode 1991-2020. Op het door PWN beheerde neerslagstation bij Castricum steeg de klimaatnormaal over dezelfde periode van 781 naar 941 mm/jr. Een toename van maar liefst 161 mm. Deze toename is vooral opgetreden in de winterneerslag, maar ook de zomerneerslag is licht toegenomen (Lenderink et al., 2009; Cirkel & Aggenbach, 2024). In de kuststrook is tevens de kans op extreme buien sterker toegenomen dan in het binnenland; de dagelijkse neerslagextremen met herhalingstijd van eens per 5 jaar zijn langs de kust toegenomen met ca. 20% ten opzichte van ca. 10 % in het binnenland (KNMI, 2021). De trend hierin varieert echter langs de kust met vooral een sterkere toename langs de Zuid-Hollandse kust (Sluijter et al., 2018).

De verdamping is sterk afhankelijk van temperatuur en inkomende zonnestraling. In de afgelopen eeuw is de Nederlandse temperatuur in voorjaar en zomer met respectievelijk $1,9 \pm 0,9$ °C en $2,9 \pm 0,8$ °C toegenomen (CBS et al., 2024). Tevens is de zonnestraling in lente en zomer toegenomen (Van Oldenburg et al., 2009). Deze ontwikkelingen resulteren in een hogere referentieverdamping. Gemiddeld over Nederland compenseert de neerslagtoename de toegenomen referentieverdamping waardoor geen trend zichtbaar is in het potentieel neerslagtekort. In de KNMI '23 scenario's neemt de referentieverdamping voor het zichtjaar 2100 afhankelijk van het uitstootscenario toe met 6 tot 17 % ten opzichte van de normaal (1991-2020) van 603 mm/jr. Opvallend is dat in deze scenario's slechts een beperkte toename van de neerslag wordt geprojecteerd. Dit wijkt af van de trends in de gemeten neerslag langs de kust (Philip et al., 2020; Cirkel & Aggenbach, 2024). Doortrekken van deze trends zou bijvoorbeeld voor Castricum een toename van de jaarlijkse neerslag met 29% betekenen tot 2100. Uiteraard is het de vraag of een dergelijke extrapolatie te verantwoorden is.

In bovenstaande is gesproken over de referentieverdamping, die is gedefinieerd als de verdamping van een goed van water voorziene korte grasmat die nooit droogtestress heeft. De daadwerkelijke verdamping is, zeker op droge standplaatsen, aanzienlijk lager. Dit geldt zeker voor korte vegetaties (droge pionier vegetatie en duingraslanden) omdat de vaatplanten hoofdzakelijk in de bodemtoplaag wortelen. Een deel van de neerslag zijgt dieper weg en is dan grotendeels onbereikbaar voor planten. Bovendien sterven veel vaatplanten af bij lang droge droogte en waardoor de actuele verdamping van de vegetatie een opeenvolgende natte periode gering is (Witte et al., 2008; Aggenbach et al.

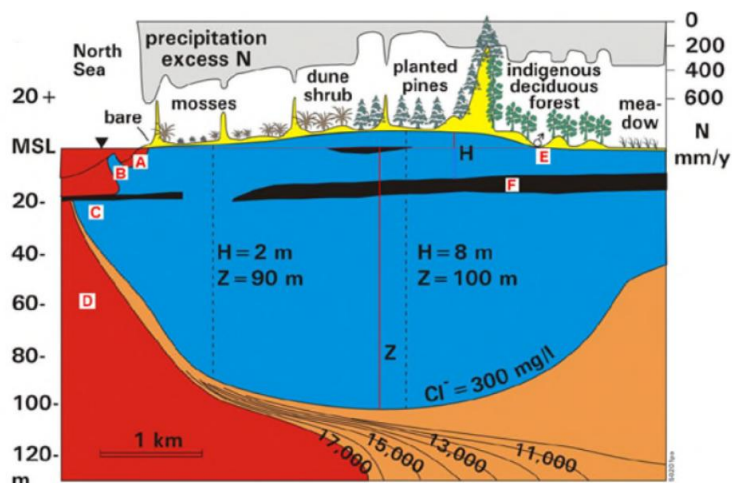
2020). Regelmatige droogte stress zorgt en daarom voor dat veel korte vegetatie een geringe bovengrondse biomassa heeft en daardoor ook gering verdampingspotentieel. Kaal zand verdampt zelfs maar 200-300 mm/jr zoals is gebleken uit o.a. de lysimeters bij Castricum (Penã, 2003). Ook korte vegetaties op droge standplaatsen verdampen aanzienlijk minder dan de referentieverdamping. Bij een meer gesloten vegetatie in een vochtige duinvallei zal de werkelijke verdamping wel de referentieverdamping benaderen. Door Voortman et al. (2017) is het effect van successie van korte droge duinvegetaties op de verdamping en grondwateraanvulling onderzocht. In Figuur D4-1 is hier een samenvatting van gegeven. Door bodemvorming en successie neemt de grondwateraanvulling gedurende enkele decennia af. Als dieper wortelend struikgewas (zoals duindoorn) of bomen de vegetatie gaan domineren zal de grondwateraanvulling aanzienlijk verder afnemen omdat deze soorten water kunnen onttrekken uit de vadose en verzadigde zone. Tijdens recente extreem droge jaren vertoonden veel bomen en struiken geen verschijnselen van droogtestress. Door van de geringe verdamping van korte vegetatie gedurende zomer in combinatie met toename van zowel de jaarlijkse als de zomerneerslag in het kustgebied is de langjarige trend van grondwaterstanden in veel duingebieden vernattend. In de extreem natte periode 2023-2024 heeft dit zelfs geleid tot langdurige inundatie van natte duinvalleien en zelfs extreem lange inundatie van droge duingraslanden.



Figuur D4-1. Effect van successie en bodemvorming op werkelijke verdamping en grondwateraanvulling (aangepast naar Voortman et al. (2017)), zie tekst voor uitleg figuur.

Verkennde analytische berekeningen aan omvang en verandering van zoetwaterlenzen in het Nederlandse kustgebied

De omvang en verandering van zich op het zoute en/of brakke grondwater vormende zoetwaterlenzen wordt bepaald door een groot aantal factoren. Het gaat hierbij om veranderingen in duinbreedte, grondwateraanvulling, de lokale en regionale drainagebasis, het zoutgehalte van de Noordzee en de hydrogeologische eigenschappen van de ondergrond (Stuyfzand, 1993). Een groot aantal van deze factoren is door Stuyfzand conceptueel uitgewerkt in FiguurD4-2.



Figuur D4-2. Conceptueel model van een van het ideale symmetrische geval afwijkende zoetwaterlens (Stuyfzand & Bruggeman, 1994; Stuyfzand et al., 2010). Afwijkingen ontstaan door variaties in grondwateraanvulling, een heterogene anisotrope ondergrond, geen scherpe zoet-zout overgang en heterogeen stromend zout grondwater. A = ondiep Noordzee systeem onder invloed van getij; B = zoetwater exfiltratie bij laagwaterlijn; C = zoetwatertong onder de zee door een slecht doorlatende laag; D = diepe Noordzee systeem aangedreven door dichtheidsverschillen en stroming naar polders achter de duinen; E = uitstroom van zoetwater aan maaiveld via duinrellen of gegraven ontwatering; F = slecht doorlatende laag.

De ordegrrootte van de invloed op de zoetwaterlens van een aantal van bovenstaande factoren is in te schatten met een aantal analytische oplossingen (o.a. Fetter, 1972; Beukeboom, 1976; Oude Essink, 1996; Chesneaux, 2008; 2016; 2021) voor een langgerekt homogeen, isotroop watervoerend pakket, uniforme constante grondwateraanvulling, een scherpe zoet-zout overgang en homogeen stilstaand zout grondwater. Dit zijn uiteraard forse vereenvoudigingen van de werkelijkheid. Daar komt nog bij dat het hierbij gaat om stationaire oplossingen terwijl de verandering van een zoetwaterlens zeker bij grote duinsystemen een traag proces is wat jaren tot tientallen jaren kan duren op een verandering. De vormingstijd in Tabel D4-1 geeft een indruk van deze traagheid in relatie tot de omvang van het systeem.

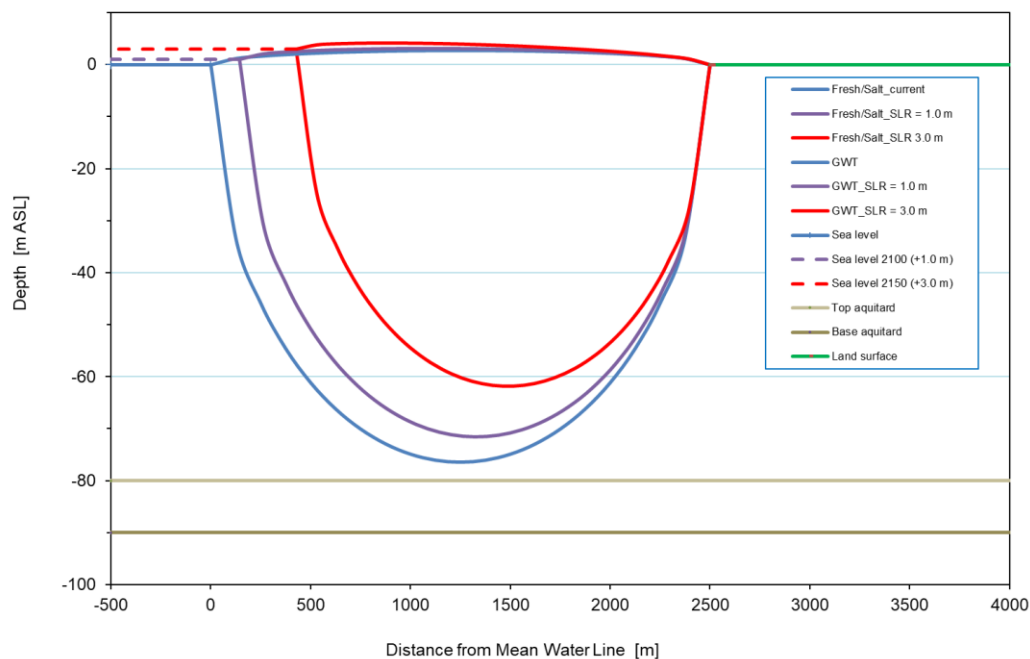
Effecten van zeespiegelstijging en zandsuppletie

Door Stuyfzand (2016;2017) zijn een aantal van bovengenoemde vergelijkingen opgenomen en gecombineerd in het spread-sheet model HYDROLENS 3A. Ondanks de vereenvoudigingen gaf toepassing van dit model op de noordkop van de Veermansplaat in het Grevelingenmeer heel bevredigende resultaten (Stuyfzand et al., 2014). We gebruiken dit spreadsheetmodel om een aantal processen te illustreren. Het gaat hierbij om een hypothetisch profiel met voor de Nederlandse kust representatieve eigenschappen. Hierbij is gekozen voor een situatie met een langgerekte 2500 m brede duinenrij die begrensd wordt door de zee aan de ene zijde en een polder aan de andere zijde. Verder is voor de basisvariant, analoog aan Stuyfzand (2016), gekozen voor een kusthelling van 7 m/km, een porositeit van 0.38, een doorlatendheid van 6 m/d een dichtheidsverschil van 0.021 en een gemiddelde grondwateraanvulling van 299 mm/jr en een polderpeil op 0 m NAP.

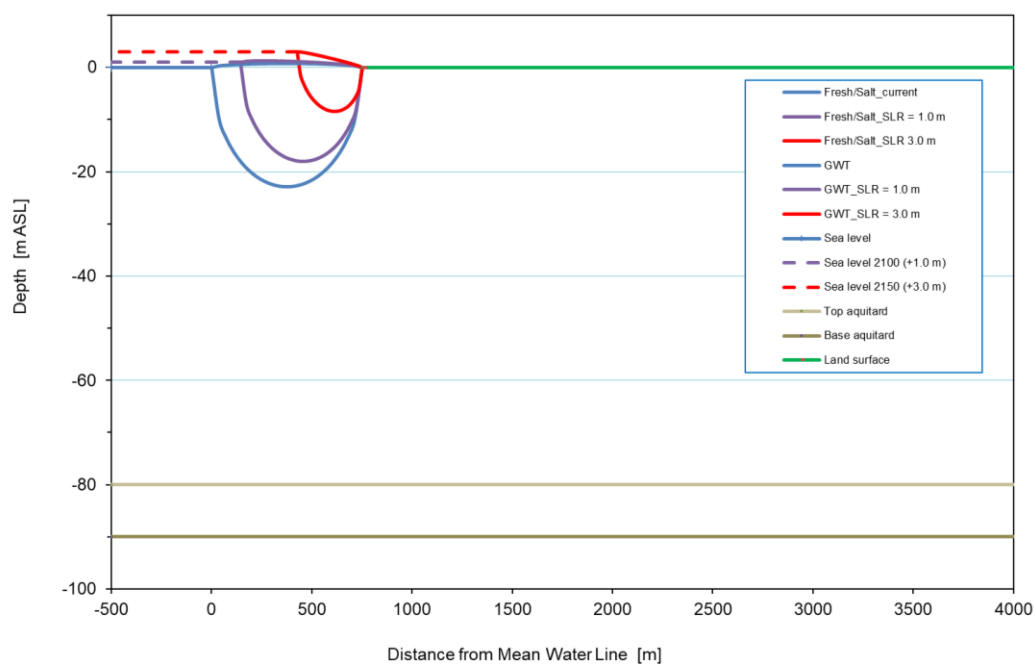
In Figuur D4-3 is het effect van 1 en 3 meter zeespiegelstijging op de zoetwaterlens weergegeven ten opzichte van de huidige situatie. Het scenario met 3 meter stijging is een worst case situatie waarbij versnelde afsmelting van gletsjers op Antarctica optreedt. Zichtbaar is de krimp van de lens, maar ook de stijging van de grondwaterstand in het duingebied. De krimp van de lens wordt vooral veroorzaakt door het als gevolg van zeespiegelstijging landinwaarts schuivende evenwichtsprofiel en daarmee verminderde (zoete) grondwateraanvulling. Ter illustratie van de gevoeligheid van de zoetwaterlens voor de breedte van het duin zijn dezelfde scenario's doorgerekend voor een slechts 750 m brede duinenrij (Figuur D4-4). De zoetwaterlens is hier in de huidige situatie al veel kleiner en neemt bij

zeespiegelstijging sterk af door de nog verder landinwaarts schuivende positie van het evenwichtsprofiel. Uiteraard is een zeespiegelstijging met 3 meter voor een dergelijke smalle duinenrij waarschijnlijk niet houdbaar zonder suppletie.

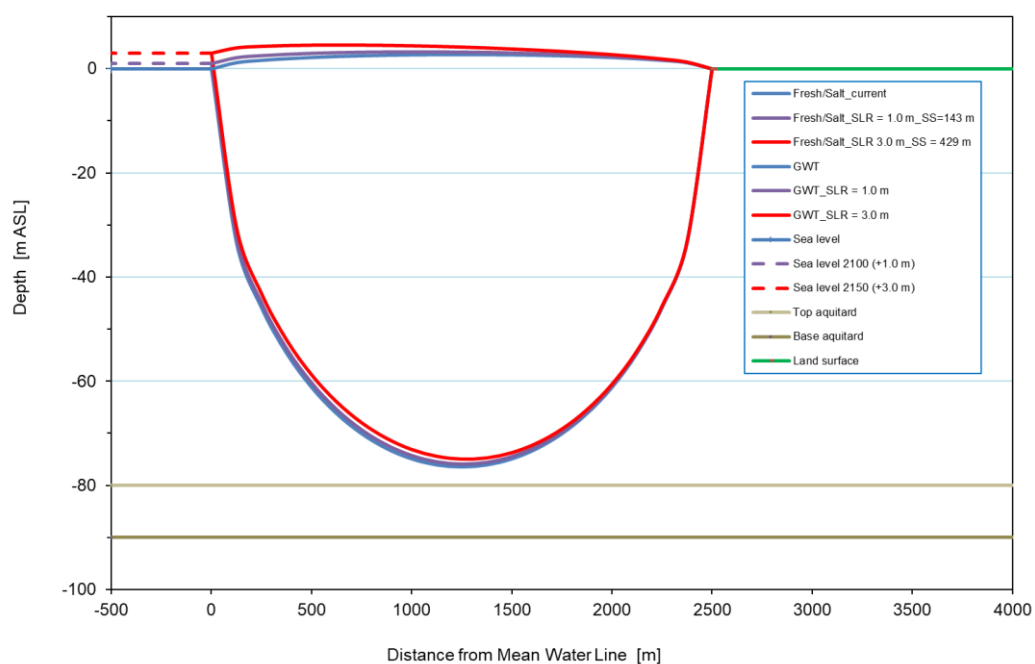
Het beleid van Rijkswaterstaat is er dan ook op gericht om met behulp van suppletie de kustlijn op de huidige positie te houden en het kustprofiel mee te laten stijgen met de zeespiegel (Rijkswaterstaat, 2020; Taal et al., 2023). Van IJzendoorn et al. (2021) laten zien dat de duinvoet langs de Nederlandse kust momenteel door suppletie zelfs sneller stijgt dan de zeespiegelstijging en er zelfs zeewaartse uitbreiding plaatsvindt. Als de berekeningen voor dit beleidsuitgangspunt worden gecorrigeerd ontstaat een ander beeld met een min of meer gelijkblijvende zoetwaterlens, maar een verder stijgende opbolling van de grondwaterstand in het duin (Figuur D4-5). Bij megasuppletie en kustuitbreiding met bijvoorbeeld 200 meter ten opzichte van de huidige kustlijn neemt zelf bij een extreme zeespiegelstijging van 3 meter de zoetwaterbel zelfs toe ten opzichte van de huidige situatie (Figuur D4-6).



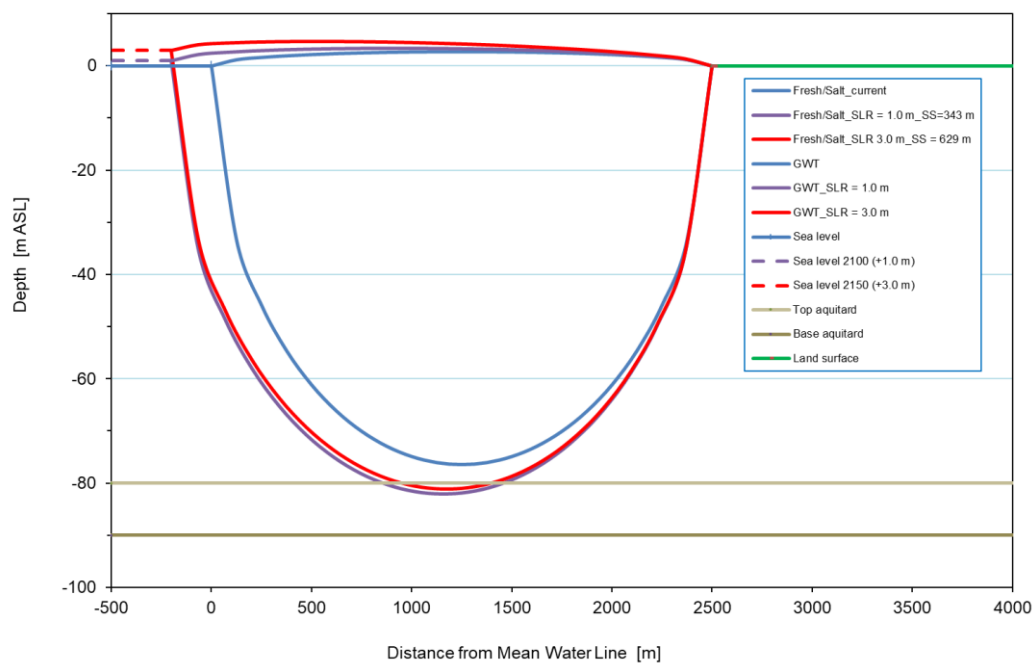
Figuur D4-3. Effect van zeespiegelstijging op de ontwikkeling van de neerslaglens bij gelijkblijvende grondwateraanvulling voor een 2500 meter brede duinenrij



Figuur D4-4. Effect van zeespiegelstijging op de ontwikkeling van de neerslaglens bij gelijkblijvende grondwateraanvulling voor een 750 meter brede duinenrij



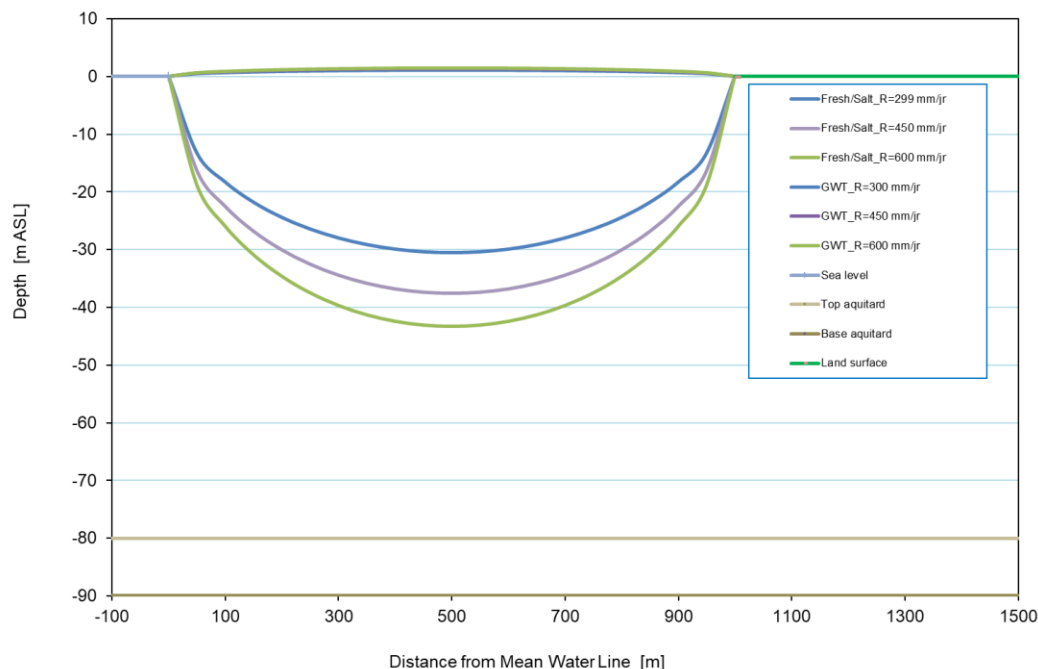
Figuur D4-5. Effect van zeespiegelstijging op de ontwikkeling van de neerslaglens bij gelijkblijvende grondwateraanvulling en door zandsuppletie gelijkblijvende positie van de kustlijn



Figuur D4-6. Effect van zeespiegelstijging op de ontwikkeling van de neerslaglens bij gelijkblijvende grondwateraanvulling en door zandsuppletie 200 meter zeewaarts verschuivende positie van de kustlijn

Effect van grondwateraanvulling, systeemgrootte en dichtheidscontrast op de lensdikte

In bovenstaande berekeningen is uitgegaan van een homogeen verdeelde jaargemiddelde grondwateraanvulling. Het gaat hierbij om een gemiddelde waarin ook de grondwateraanvulling onder struwelen en bossen aan de binnenzijde van het duin zijn meegenomen. In strandvlaktes of jongere duingebieden is begroeiing afwezig of bestaat deze uit korte open vegetatie. Dit zal in ook het geval zijn na grootschalige suppletie. Om het effect van verschillen in begroeiing te illustreren zijn aanvullende lensberekeningen uitgevoerd met een grondwateraanvulling van 450 mm/jr en 600 mm/jr (Figuur D4-7). Er is voor de zichtbaarheid in deze figuur gekozen voor een breedte van het duin van 1000 m. De waarde van 600 mm/jr komt ongeveer overeen met de door Voortman et al (2017) berekende grondwateraanvulling onder kaal zand. De waarde van 600 mm/jr is voor kaal zand en korte vegetaties, zeker gezien de toenemende neerslag in het kustgebied, niet onrealistisch. Stuyfzand et al. (2014) hanteren deze aanvulling ook voor embryoduintjes met een spaarzame vegetatie. Bij een verdubbeling van de aanvulling ontstaat een 13 meter dikkere lens en stijgt ook de freatische grondwaterstand met enkele decimeters. Veranderingen in neerslag, verdamping en vegetatieterugkoppelingen (zie eerder) hebben dus een fors effect op de omvang van de zoetwaterlens. Voor een uitgebreide analyse van trends in neerslagoverschot en grondwateraanvulling wordt verwezen naar Cirkel & Aggenbach (2024).



Figuur D4-7. Effect van verschillen in grondwateraanvulling op de omvang van de zoetwaterlens bij een 1000 meter brede duinenrij.

De lensdiepte en maximale opbolling (t.o.v. zeeniveau) is te schalen vanaf een bepaalde grondwateraanvulling volgens $\sqrt{R_2/R_1}$, met R_1 = de eerder gebruikte grondwateraanvulling en R_2 een andere grondwateraanvulling (Stuyfzand et al., 2014). De vormingstijd van de lens schaaft hierbij met $1/\sqrt{R_2/R_1}$. Door Stuyfzand et al. (2014) zijn met een eerdere versie van HYDROLENS voor verschillende representatieve condities lensdieptes, maximale opbolling en vormingstijd berekend (Tabel D4-1). Uit dit overzicht blijkt dat onder kleine systemen zoals embryoduin en de lens uiteindelijk enkele decimeters tot meters dik zal zijn. Deze dikte is mede afhankelijk van het dichtheidscontrast met het onderliggende grondwater. Zoetwaterlenzen in grondwater met een met zeewater vergelijkbare zoutconcentratie zijn bij een gelijke systeemgrootte dunner dan lenzen in minder zout grondwater. In de tabel is daarom ook een zoutconcentratie (2250 mg/l) vergelijkbaar met het groene strand van Schiermonnikoog opgenomen. De vormingstijd van deze kleine lenzen is

verhoudingsgewijs snel (zie Tabel D4-1), maar dat maakt de systemen ook minder stabiel bij erosie of overstroming. Als individuele embryoduintjes aaneengroeien ontstaan grotere lenzen, hetzelfde geldt voor stuifdijken. In en rond het duin zullen echter een aantal hydrologische terugkoppelingen optreden die de situatie complexer maken dan de hier gepresenteerde schematisaties. In de volgende paragraaf gaan we in meer detail in op deze terugkoppelingen.

Tabel D4-1. Output van HYDROLENS berekeningen voor zoetwaterlenzen na bereiken van evenwicht als functie van omvang, zoutgehalte en verticale weerstand. Met H de maximale opbolling, Z de diepte van het zoet/zout grensvlak en t99 de vormingstijd voor 99% van de lens (bron: Stuyfzand et al., 2014)

c = 0 days					c = 1500 days				
2R or B	Z	H	t99	L	Z	H	t99	L	
m	m+MSL	m+MSL	years	m	m+MSL	m+MSL	years	m	
<i>Circular, R = 0.45 m/y, Cl-S = 16500 mg/L</i>									
5	-0.18	0.004	0.3	0.1	-0.1	0.01	0.5	0.4	
20	-0.71	0.014	1.1	0.5	-0.4	0.02	1.8	1.8	
50	-1.78	0.036	2.8	1.3	-1.1	0.06	4.6	4.4	
100	-3.56	0.07	5.6	2.6	-2.2	0.12	9.2	8.8	
1000	-35.6	0.72	56.1	25.3	-21.7	1.18	92.2	86.2	
2000	-71.3	1.44	112.3	48.2	-43.4	2.36	184.3	164.0	
<i>Elongated, R = 0.45 m/y, Cl-S = 16500 mg/L</i>									
50	-2.5	0.049	4.1	1.8	-1.5	0.08	6.7	6.2	
100	-4.9	0.10	8.2	4	-3.0	0.16	13.4	12	
1000	-49.5	0.99	81.6	36	-30.1	1.62	133.9	122	
2000	-98.9	1.98	163.1	68	-60.3	3.25	267.8	232	
<i>Circular, R = 0.45 m/y, Cl-S = 2250 mg/L</i>									
5	-0.45	0.001	0.7	0.1	-0.3	0.00	1.1	0.4	
20	-1.80	0.006	2.8	0.5	-1.1	0.01	4.6	1.8	
50	-4.50	0.014	7.0	1.3	-2.7	0.02	11.4	4.4	
100	-9.00	0.029	13.9	2.6	-5.5	0.05	22.9	8.8	
1000	-90.0	0.289	139.3	25.3	-54.8	0.47	228.8	86.2	
2000	-179.9	0.578	278.7	48.2	-109.6	0.95	457.5	164.0	
<i>Elongated, R = 0.45 m/y, Cl-S = 2250 mg/L</i>									
50	-6.4	0.02	10.3	2	-3.9	0.03	16.9	6	
100	-12.7	0.04	20.6	4	-7.7	0.06	33.8	12	
1000	-127.1	0.39	206.1	36	-77.4	0.64	338.3	122	
2000	-254.1	0.78	412.1	68	-154.8	1.29	676.6	232	

Hydrologische terugkoppelingen op suppletie, toenemende aanvulling en zeespiegelstijging

Uit de analytische berekeningen komt een autonoom stijgende grondwaterstand naar voren voor de duingebieden. Deze stijging wordt veroorzaakt door de stijgende zeespiegel en door de toenemende grondwateraanvulling. Bij zeewaartse uitbreiding door megasuppletie wordt deze stijging verder versterkt. Belangrijk hierbij is de vraag of zand verder het duin in kan stuiven of niet. Als dit niet het geval is zal het maaiveld van het bestaande duingebied niet meestijgen en zullen grondwaterstanden steeds dichter onder maaiveld komen of zelfs boven maaiveld uitkomen. Uit de Jarkus-raaien blijkt zonder specifieke verkervingsprojecten bij suppletie maar weinig zand voorbij het eerste duin/de zeereep stuift. Voorbeelden hiervan zijn de kust ten zuiden van Julianadorp, het Kennemerstrand, het Spanjaardsduin en Voorne. Afgelopen jaren zijn zowel spontane kerven ontstaan als kunstmatige verkervingen uitgevoerd. Daarbij treedt er wel aanzienlijke zandaanvoer op in het voorduin achter de zeewering (Nijenhuis, 2022). Tot nu toe heeft dat nog niet geleid tot parabolisering van de zeereep, terwijl parabolisering juist kan gaan zorgen voor sterke zandaanvoer landinwaarts door bewegende paraboolduinen.

Door de vernatting van het duin treden een aantal terugkoppelingen in werking (Cirkel & Aggenbach, 2024). Allereerst zal in een vernattend duin de werkelijke verdamping toenemen doordat op meer plekken water aan of op maaiveld staat of de capillaire zoom bereikbaar is voor planten. Deze planten hebben hierdoor minder droogtestress (en hiermee gepaarde verdampingsreductie), ook kan zich een vegetatie ontwikkelen die een hogere bedekkingsgraad en verdamping heeft. Daarnaast kan

nu nog geïsoleerd oppervlaktewater verbonden raken waardoor zoetwater het systeem uit kan stromen naar de binnenduinrand of de zee. Toestroming naar zee kan alleen optreden wanneer er een open verbinding is (bv een Slufter). Dit speelt ook bij nu al aanwezige duinrellen (kwelwater afvoerende watergangen in het duin) en sloten, die door de toenemende hydraulische gradiënt harder zullen gaan stromen. Tenslotte zal ook de uitstroom van zoet grondwater aan de duinvoet / het strand toenemen. Masterson & Garabedian (2007) hebben het effect van drainage in een duinsysteem bij zeespiegelstijging onderzocht. Uit deze modelstudie blijkt dat de grondwaterstanden in absolute zin stijgen, maar dat de opbolling van het freatisch vlak ten opzichte van het zeeniveau afnam door de extra drainage via duinbeekjes. Als gevolg hiervan nam ook de dikte van de zoetwaterlens af. Upconing van zout water trad hierbij op in de nabijheid van grondwater gevoede stroompjes. Vergelijkbare conclusies komen naar voren uit een modelstudie voor een aantal hypothetische duinsituaties van Oude Essink & Waterman (in prep). Als de grondwaterstand stijgt, als reactie op zeespiegelstijging of verbreding van het duinmassief, zal dit in de nabijheid van ontwateringsmiddelen vooral resulteren in verhoogde grondwaterafvoer wat kan leiden tot remming van de lensgroei of zelfs krimp van de zoetwaterlens. In een aantal duingebieden is naast ontwatering ook infrastructuur voor de drinkwaterproductie aanwezig. Het gaat hierbij om infiltratieplassen en kanalen en winputten. Bij gelijkblijvende niveaus van infiltratie en winning zal deze infrastructuur dempend werken op de hydrologische effecten van zandsuppleties. Infiltratieplassen gaan door een afnemend stijghoogteverhang minder infiltreren terwijl (rand)winningen juist meer gaan onttrekken/draineren.

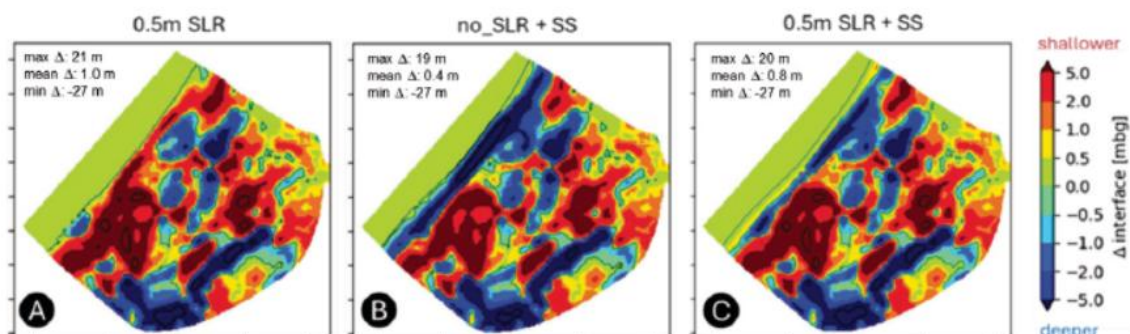
Numerieke modellering zoetwaterbeschikbaarheid

Recent is in het kader het Kennisprogramma Zeespiegelstijging een modelstudie uitgevoerd naar de effecten van zeespiegelstijging op zoetwater in de Nederlandse duinen (Oude Essink & Emidio Horta Nogueira, 2024). Voor deze studie is gebruik gemaakt van het fijnmazige 3D zoet-zout model van het duingebied van Dunea (Huizer, 2024) en van 9 conceptuele 2D profielen voor representatieve locaties tussen Hoek van Holland en Den Helder en twee Waddeneilanden.

Met het 3D model zijn 3 zeespiegelstijgingsscenario's (0.5 m, 1.0 m en 3.0 m stijging), zandsuppletie (kustlijn blijft op z'n plek), 0.4 m bodemdaling in de achterliggende polders en verandering van de grondwateraanvulling (-3%, +3% en 8%) gesimuleerd. De scenario's hebben als zichtjaar 2100 m.u.v het extreme 3 meter zeespiegelstijgingsscenario. De 2D profielmodellen zijn doorgerekend met een vrij extreem scenario met een zeespiegelstijging van 1.35 m in 2100 en 3.0 m in 2150.

Voor het duingebied van Dunea treedt ook zonder zeespiegelstijging een krimp van het zoetwatervolume met 2.5% op tot 2100. Deze krimp wordt veroorzaakt door autonome veranderingen in het zoetwatervolume doordat het (trage) systeem nog niet in evenwicht is met eerdere opgetreden veranderingen in de waterhuishouding zoals inpolderingen en peilverlagingen in het achterland. Bij een zeespiegelstijging van 0.5 en 1.0 m tot 2100 neemt de krimp van het zoetwatervolume toe tot respectievelijk 4 en 5.7%. Het extreme 3.0 meter zeespiegelstijging scenario resulteert in een krimp met 33.6% tot 2150. In het model is vervolgens zandsuppletie gesimuleerd door in het model in 10 stappen het kustprofiel mee te laten stijgen met de zeespiegelstijging. Uit deze modelruns met zandsuppletie blijkt de afname van de zoetwatervoorraad te worden geremd en is de krimp in het autonome scenario 2.2% en voor 0.5 en 1.0 meter zeespiegelstijging respectievelijk 3.7 en 5.2%. Let wel het gaat hierbij dus om beperkte suppletie om de kustlijn op z'n plek te houden en niet om zeewaartse uitbreiding. In combinatie met het gegeven dat het hier gaat om een breed duingebied is het effect van de suppletie toch significant. In Figuur D4-8 is het effect van zeespiegelstijging en zandsuppletie op de diepte van het zoet-zoutgrensvlak goed zichtbaar. Zonder zeespiegelstijging neemt de diepte van het grensvlak onder de eerste duinenrij met meters toe bij

autonome ontwikkeling met zandsuppletie. Bij een halve meter zeespiegelstijging zonder komt het grensvlak juist meters ondieper te liggen dan in de huidige situatie. Als gesuppleerd wordt om mee te stijgen met de zeespiegelstijging dan blijft de diepte onder het strand min of meer gelijk en neemt de diepte onder de eerste duinen zelfs nog toe.



Figuur D4-8 Verandering van de diepte van het zoet-zout grensvlak tot 2100 ten opzichte van de referentiesituatie. Met (A) een halve meter zeespiegelstijging, (B) autonome ontwikkeling met suppletie maar zonder zeespiegelstijging en (C) een halve meter zeespiegelstijging en zandsuppletie (bron: Oude Essink & Emidio Horta Nogueira, 2024)

Opvallend is dat het model weinig reactie (tienden van procenten) vertoont op veranderingen in de natuurlijke grondwateraanvulling. Op basis van een 2D analytische benadering zou een verandering van de aanvulling met 8% voor het duingebied echter tot enkele procenten verandering van het lensvolume moeten leiden. Dat dit niet gebeurt kan worden verklaard door de grootschalige aanwezigheid van de drinkwaterinfrastructuur met vaste peilen van de infiltratieplassen en min of meer vaste onttrekkingsniveaus binnen het modeldomein. In dit sterk peilgestuurd systeem is de aanvoer van rivierwater afhankelijk van het verhang vanaf de infiltratieplassen naar de winputten. Bij meer natuurlijke aanvulling neemt dit verhang af en wordt minder rivierwater aangevoerd. De toename in natuurlijke grondwateraanvulling wordt dus deels gecompenseerd door een afname van geïnfiltreerd rivierwater.

Uit de 2D profielberekeningen blijkt dat bij een zeespiegelstijging tot 1.35 m in 2100 de zoetwaterlenzen redelijk intact blijven (overgebleven volume 63-97% afhankelijk van het duinprofiel). Bij verdere versnelde zeespiegelstijging tot 3.0 m in 2150 neemt de zoetwatervoorraad onder smalle duinenrijen sterk af. Hierbij komt dat het effect sterk afhankelijk wordt van de maaiveldhoogte. In lage gebieden met ondiepe grondwaterstanden zullen zoetwaterlenzen sterk aangetast worden door drainage van zoetwater.

Literatuur (alleen Appendix 4)

Aggenbach, C.J.S., S. Clevers, J. De Wit & H. Krajenbrink (2020). Evaluatie van effecten begrazing van damherten op duingraslanden in de Luchterduinen. KWR 2020.042, KWR Water Research Institute, Nieuwegein.

Beukeboom, T. J., (1976). The hydrology of the Frisian islands (Vol. 2). Rodopi.

CBS, PBL, RIVM, WUR (2024). Temperatuur in Nederland en mondiaal, 1907 - 2022 (indicator 0226, versie 15, 15 augustus 2023) www.clo.nl. Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen

Chesnaux, R., Marion, D., Boumaiza, L., Richard, S., & Walter, J. (2021). An analytical methodology to estimate the changes in fresh groundwater resources with sea-level rise and coastal erosion in strip-island unconfined aquifers: illustration with Savary Island, Canada. *Hydrogeology Journal*.

- Chesnaux, R. (2016). Closed-form analytical solutions for assessing the consequences of sea-level rise on unconfined sloping island aquifers. *Global and Planetary Change*, 139, 109-115.
- Chesnaux, R., & Allen, D. M. (2008). Groundwater travel times for unconfined island aquifers bounded by freshwater or seawater. *Hydrogeology Journal*, 16, 437-445.
- Cirkel, D.G. & Aggenbach, C.J.S., 2024. Gevolgen zeespiegelstijging en klimaatverandering op zoetwaterbel en duinvalleien - Literatuurstudie, KWR rapport - KWR 2024.073.
- Fetter Jr, C. W. (1972). Position of the saline water interface beneath oceanic islands. *Water Resources Research*, 8(5), 1307-1315.
- Huizer, S., 2024. Overbrugging en brakwaterwinning - Volhoudbare strategische watervoorraad. Arcadis Rapp. 3W54MDYSSJCE-222884776-441.4 86.
- Lenderink, G., Van Meijgaard, E., & Selten, F. (2009). Intense coastal rainfall in the Netherlands in response to high sea surface temperatures: analysis of the event of August 2006 from the perspective of a changing climate. *Climate dynamics*, 32, 19-33.
- Masterson, J.P. & Garabedian, S.P. (2007) Effects of Sea-Level Rise on Ground Water Flow in a Coastal Aquifer System. *Groundwater* vol 45-no2 p209-217
- Nijenhuis, M. (2022) Evolutie van de kerf. Een onderzoek naar succes- en faalfactoren van kerven in de zeereep. Afstudeerscriptie Van Hall Larenstein
- Oude Essink, G.H.P., Waterman, R.E., (in prep). Impacts of offshore land reclamation on fresh groundwater volumes under coastal dunes and surface water in the hinterland
- Oude Essink, G.H.P. (1996). Impact of sea level rise on groundwater flow regimes: a sensitivity analysis for the Netherlands (Vol. 7). Delft University Press.
- Oude Essink, G.H.P. & Emidio Horta Nogueira, G. (2024) Effecten zeespiegelstijging op zoetwater in de Nederlandse duinen. Kennisprogramma Zeespiegelstijging Rapportnummer: 11210315-005-BGS-0001
- Peña, A.G. (2003) Castricum 30 years of lysimeterdata: sensitivity analysis and calibration with the SWAP model. Alterra Wageningen
- Philip, S. Y., Kew, S. F., Van Der Wiel, K., Wanders, N., & Van Oldenborgh, G. J. (2020). Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094081
- Rijkswaterstaat, 2020. Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust. Rapport ter onderbouwing van het beleidsadvies 'Kustgenese 2.0'.
- Sluijter, R., Plieger, M., Van Oldenborgh, G.J., Beersma, J.J., De Vries, H., 2018. Een analyse op basis van het potentiële neerslagtekort, KNMI publicatie 117162
- Stuyfzand, P. J., & Bruggeman, G. A. (1994, June). Analytical approximations for fresh water lenses in coastal dunes. In *Proc. 13th Salt Water Intrusion Meeting* (pp. 15-33).
- Stuyfzand, P. J. & Moberts, E M. L. (1987) De bijzondere hydrologie van kwelplassen in duinen met kunstmatige infiltratie. *H2O* (20)3:52-57 and 62.
- Stuyfzand, P.J. (2016). HYDROLENS 3.0, a package of closed-form analytical solutions for fresh groundwater lenses, set in Excel spreadsheet, for calculating the shape, salinity distribution, formation time and effects of climate change.
- Stuyfzand, P.J., Haan, M. de, Hofs, B. (2010) Gevolgen van kustverbreding en klimaatverandering voor duingrondwater, kunstmatig infiltraat, drinkwater en het duinecosysteem. KWR 09.092 KWR Nieuwegein

- Stuyfzand, P. J. (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands (PhD thesis). Faculty of Earth Sciences, VU University Amsterdam.
- Stuyfzand, P.J. (2017) Observations and analytical modeling of freshwater and rainwater lenses in coastal dune systems. *J. Coastal Conservation*, 2017 Vol. 21(5), 577-593, doi:10.1007/s11852-016-0456-6
- Stuyfzand P.J.; Estrada de Wagt, I.; Amatiarsat, D.; Bland, C. ; Oskam, B.; Van Loon, D.; Everts, H.; Grootjans, A. Zoet-zout gradiënten op 4 eilanden, in hydrologisch en hydrogeochemisch perspectief. BTO 2014.221(s) KWR Water Research Institute Nieuwegein
- Taal, M., Quataert, E., Spek, A. van der, Huisman, B., Elias, E., Wang, Z., Vermeer, N. (2023) Sedimentbehoefte Nederlands kustsysteem bij toegenomen zeespiegelstijging. Rapportnr. 11207897-002-ZKS-0004, Deltares
- Van der Wal, D., 2004, Beach-Dune interactions in Nourishment areas along the Dutch coast, *Journal of Coastal Research*, vol 20, pp 317-325.
- Van IJzendoorn, C. O., de Vries, S., Hallin, C., & Hesp, P. A. (2021). Sea level rise outpaced by vertical dune toe translation on prograding coasts. *Scientific reports*, 11(1), 12792.
- Van Oldenborgh, G. J., Drijfhout, S., Van Ulden, A., Haarsma, R., Sterl, A., Severijns, C., ... & Dijkstra, H. (2009). Western Europe is warming much faster than expected. *Climate of the Past*, 5(1), 1-12.
- Voortman, B. R., Fujita, Y., Bartholomeus, R. P., Aggenbach, C. J. S., & Witte, J. P. M. (2017). How the evaporation of dry dune grasslands evolves during the concerted succession of soil and vegetation. *Ecohydrology*, 10(4), e1848.
- Witte, J.P.M., R.P. Bartholomeus, D.G. Cirkel & P.W.T.J. Kamps, 2008. Ecohydrologische gevolgen van klimaatverandering voor de kustduinen van Nederland. Nieuwegein. Kiwa Water Research



Ministerie van Landbouw,
Natuur en Voedselkwaliteit



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



Alle publicaties en producten van OBN Natuurkennis zijn te vinden op
www.natuurkennis.nl

