

Meegroeien met zeespiegelstijging

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Deelrapport Werken met natuurlijke
oplossingen bij zeespiegelstijging

Ecologische onderbouwing en werkwijze



Werken met natuurlijke oplossingen bij zeespiegelstijging

Ecologische onderbouwing en werkwijze

Deelrapport

Auteurs: Bregje van Wesenbeeck (Deltares), Alphons van Winden (Bureau Stroming), Jim van Belzen (WMR)

Datum: 05-08-2025

Versie: Definitief

In opdracht van Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat en Staf Deltacommissaris, TKI Deltatechnologie en WNF

Financiering Ministerie van Infrastructuur & Waterstaat en Staf Deltacommissaris, TKI Deltatechnologie, WWF-NL, NL2120, Stichting EcoShape, Ministerie van Landbouw, Visserij, Voedselzekerheid en Natuur en in kind bijdragen van de partijen in het kernteam.

Kernteam Sweco, Deltares, HKV, H+N+S, WWF-NL, Ecoshape en Jong Ecoshape, Wageningen Marine Research/NIOZ, Wageningen University, Bureau Stroming, Witteveen + Bos, Royal HaskoningDHV, Boskalis, Van Oord, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat.

Colofon:

Dit rapport is gebaseerd op onderliggende rapportages. We verwijzen hier naar deze onderliggende rapportages voor nadere onderbouwing van getallen en referenties.



Verantwoording

Dit deelrapport beschrijft het resultaat van een onderdeel van de uitwerking van de denkrichting Meegroeien van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging. De verkenning is een gezamenlijk initiatief van de Staf Deltacommissaris, het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, de Topsector Water & Maritiem en NL2120. De denkrichting is een aanvulling op de denkrichtingen Beschermen (open/gesloten), Meebewegen en Zeewaarts die staan beschreven in het rapport 'Ruimte voor zeespiegelstijging, Een verkenning van denkrichtingen om Nederland ook op lange termijn veilig en leefbaar te houden bij zeespiegelstijging'.

De resultaten van deze verkenning zijn tot stand gekomen in vijf georganiseerde hackathons en door studies, berekeningen en uitwerkingen op basis van bestaande kennis en expert judgement door het kernteam. In totaal is een (ontwerp)proces van ca. negen maanden doorlopen. Er is in dit proces dankbaar gebruik gemaakt van bestaande uitwerkingen en plannen die de afgelopen jaren zijn ontwikkeld. Gedurende de hackathons hebben experts met verschillende thematische achtergronden meegedacht over oplossingsrichtingen. De resultaten van de hackathons zijn door het kernteam verder uitgewerkt en op verschillende aspecten gebundeld in deelrapporten.

Het hoofdrapport is vervolgens op basis van de deelrapporten geschreven. Resultaten in dit deelrapport kunnen afwijken van conclusies in het hoofdrapport als gevolg van gemaakte keuzes en relaties met andere onderwerpen. Het resultaat van het project kan als startpunt dienen voor vervolgonderzoek binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging.

Inhoudsopgave

1	Natuurlijke Oplossingen voor Leefbaarheid en Veiligheid bij Zeespiegelstijging in Nederland	4
1.1	Introductie.....	4
1.2	Waarom een vierde denkrichting?	4
1.3	De Essentiële Rol van Natuur voor de Economie en Biodiversiteit	5
2	Nature-based solutions en gezonde ecosystemen	7
2.1	Nature-based solutions	7
2.2	Nature-based solutions voor waterveiligheid	7
2.3	Ecosystemen en zeespiegelstijging	8
2.4	Randvoorwaarden voor veerkrachtige ecosystemen	9
	Ruimte	9
	Connectiviteit.....	10
	Dynamiek	11
2.5	Wereldwijde impact	11
3	Ontwerpen met het natuurlijk systeem als basis	12
3.1	Het natuurlijke systeem als basis.....	12
3.2	Systeemanalyse.....	13
3.3	Natuurreferentiewaarden	13
3.4	Forecasten en backcasten	14
	Referenties	15

1 Natuurlijke Oplossingen voor Leefbaarheid en Veiligheid bij Zeespiegelstijging in Nederland

1.1 Introductie

Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging wordt onderzocht hoe Nederland ook bij een versnelde zeespiegelstijging veilig en leefbaar kan blijven. Dit onderzoek richt zich op de gevolgen van uiteenlopende scenario's voor zeespiegelstijging op de Nederlandse kust, waterkeringen, infrastructuur en zoetwaterbeschikbaarheid. In 2023 zijn drie denkrichtingen voor adaptatie nader uitgewerkt (Ruimte voor Zeespiegelstijging 2024):

- **Meebewegen:** Aanpassing van landgebruik en ruimtelijke inrichting door bijvoorbeeld drijvend bouwen of investeringen te verplaatsen naar de hoger gelegen gebieden van Nederland.
- **Beschermen:** Voortzetting en versterking van het huidige waterbeheer met waterbouwkundige werken zoals dammen, dijken, stormvloedkeringen, pompen en sluizen.
- **Zeewaarts:** Aanleg van een kering in de Noordzee en groot zoetwatermeer voor de kust van Zuidwest-Nederland.

Deze denkrichtingen zijn verkend door drie consortia. De verkenningen boden waardevolle inzichten, maar lieten ook lacunes zien, zoals regio's die onderbelicht bleven, onduidelijkheid over systeemkeuzes en de gevolgen voor natuur en nevenfuncties. Om te voorkomen dat toekomstige waterveiligheidsstrategieën de natuuropgave groter maken en het potentieel voor integratie van waterveiligheid en natuur te verkennen, is in 2024 is een vierde consortium opgericht. Dit consortium had tot doel om integrale strategieën te verkennen voor de opgaven waterveiligheid, zoetwaterbeschikbaarheid en behoud en herstel van het natuurlijk kust ecosysteem. Door een ontwerpende aanpak waarin natuur als integraal onderdeel van de waterveiligheid wordt beschouwd, wordt onderzocht hoe natuurlijke processen kunnen bijdragen aan hoogwaterbescherming en zoetwaterbeschikbaarheid, in combinatie met waterbouwkundige ingrepen zoals dammen en dijken. Het doel van dit consortium is om zowel natuurwaarde als waterveiligheid en zoetwaterbeschikbaarheid te realiseren onder toekomstige extreme zeespiegelstijging door systeemingenrepen te bedenken en analyseren die de huidige waterveiligheidsnorm handhaven, maar daarnaast ook de Nederlandse deltanatuur, die van internationale waarde is, behouden en versterken.

Dit rapport introduceert de denkrichting '**Nature-based Solutions**' als fundamentele benadering voor de ontwikkeling van de Nederlandse kust onder invloed van zeespiegelstijging. Het biedt inzicht in de methodiek en laat zien hoe natuurlijke systemen kunnen worden geïntegreerd in het ontwerp van toekomstige waterveiligheidsstrategieën.

1.2 Waarom een vierde denkrichting?

De drie eerder uitgewerkte denkrichtingen besteden beperkt aandacht aan de rol van ecosystemen in de kustzone en sluiten weinig aan bij de natuurlijke werking van het kustsysteem. Echter, het Nederlandse landschap is van oorsprong gevormd door natuurlijke processen. Door de aanleg van dijken, keringen, gemalen en ontwateringskanalen is het in de loop der eeuwen ontwikkeld tot een door mensen gestuurd systeem, waarin traditionele waterbouwkundige kennis en waterbeheer centraal staan. De unieke eigenschappen van de Nederlandse deltanatuur, die nauw samenhangen met de estuariene dynamiek, zoals zoet-zoutovergangen, geleidelijke oeverzones, intergetijdengebieden en moerassen, zijn de afgelopen twee eeuwen sterk afgenomen. Dit is grotendeels het gevolg van waterbouwkundige ingrepen die het Nederlandse watersysteem hebben geoptimaliseerd vanuit het perspectief van waterveiligheid, zoetwaterbeschikbaarheid en bevaarbaarheid (Reise 2005).

Natuurlijke geleidelijke overgangen tussen zoete en zoute milieus, waar unieke soortengemeenschappen thuishoren, zijn vervangen door harde scheidingen, zoals dammen en sluizen. Grenzen tussen land en water zijn omgevormd tot steile dijken en damwanden, terwijl moerassen zijn drooggelegd en ingepolderd. De afsluiting van zeearmen door stormvloedkeringen en dammen heeft geleid tot het verdwijnen van dynamiek en connectiviteit, met verregaande gevolgen voor de waterkwaliteit en de kwantiteit en kwaliteit van ecosystemen en biodiversiteit (Troost et al. 2012, van Wesenbeeck et al. 2014). Ondanks deze ingrepen

kent Nederland ook succesvolle voorbeelden waarbij de natuur is geïntegreerd in waterveiligheidsstrategieën. De zandige kust met strand en duinen vormt een essentieel onderdeel van onze kustbescherming, waarbij zandsuppleties worden ingezet om de natuurlijke kustontwikkeling te ondersteunen. Dit principe, waarbij natuurlijke processen worden benut voor waterveiligheid, biedt aanknopingspunten voor een bredere toepassing langs andere delen van de kust. We doen dit door natuur structureel te integreren in hoogwaterbescherming en waterbeheer, vanuit het uitgangspunt 'zacht waar het kan en hard waar het moet', zoals is vastgelegd in het Deltaprogramma en in Kustgenese 2.0 door Rijkswaterstaat. Ook in rivieren en het Waddengebied worden waterbouwkundige ingrepen, zoals dijken en dammen, steeds vaker gecombineerd met ruimte voor natuurlijke processen. Een treffend voorbeeld hiervan is het programma *Ruimte voor de Rivier*, waarin niet alleen de waterveiligheid werd vergroot maar tevens de landschappelijke kwaliteit mee is genomen in de doelstellingen. Dit leidde tot een positieve impuls aan de riviernatuur door een toename van het areaal, toename van dynamiek, verbetering van de connectiviteit en een verrijking van de landschappelijke kwaliteit.

Box 1. Deltaprogramma

Het Deltaprogramma werkt aan een klimaatbestendige inrichting van Nederland, met de nadruk op waterveiligheid en zoetwaterbeschikbaarheid op de lange termijn (tot 2100 en daarna). Het programma richt zich voornamelijk op waterbeheermaatregelen en legt in 2025 veel nadruk op ruimtelijke adaptatie. Dit betekent dat ruimte voor water essentieel is om te gaan met klimaatverandering en de bijbehorende weersextremen (Deltaprogramma, 2025). Het gaat hierbij om het opvangen van onzekerheden in zowel wateroverschot als watertekort. Door klimaatverandering en toenemende onzekerheden worden we vaker geconfronteerd met onbekende situaties, zoals langdurige droogte gevolgd door hevige regenval. Daarnaast neemt de complexiteit toe doordat er steeds meer functies op het watersysteem rusten. Combinaties van waterbouwkundige en natuurlijke oplossingen bieden goede kansen om deze veelheid aan functies te ondersteunen. Dit vraagt echter wel dat we natuurlijke systemen en hun functies integreren in het beheer van onze kusten en rivieren

1.3 De Essentiële Rol van Natuur voor de Economie en Biodiversiteit

Natuur ondersteunt wereldwijd ongeveer 50% van het BNP (WEF & PWC 2020). Ook de Nederlandse natuur levert een cruciale bijdrage aan onze economie (CBS & WUR 2022) en 36% van de investeringen van financiële instellingen leunt sterk op ecosysteemdiensten, zoals grond- en oppervlaktewater, koolstof vastlegging, waterveiligheid en bestuiving (DNB & PBL 2020). Achteruitgang van natuur en biodiversiteit vormt dus een direct risico voor het investeringsklimaat. Een gezond natuurlijk systeem levert tal van essentiële ecosysteemdiensten, zoals schoon water, voedsel, en klimaatregulatie en legt daarmee de basis voor economische activiteiten in onze delta. De totale waarde van ecosysteemdiensten in Nederland werd in 2020 geschat op 10,9 miljard euro (CBS 2020). Kustsystemen zoals duinen en stranden, slechts 1% van de landoppervlakte, leveren minstens 14% van de totale ecosysteemwaarde dankzij waterzuivering, koolstofvastlegging, hogere huizenprijzen en toerisme (CBS & WUR 2022).

De Nederlandse kust- en estuariene natuur is van cruciaal belang op regionaal, nationaal en internationaal niveau. Deze dynamische overgangsgebieden behoren tot de meest productieve ecosystemen ter wereld, dankzij de constante instroom van nutriënten en sediment. Slikken en schorren, vaak de 'nieren' van kustgebieden genoemd, verbeteren waterkwaliteit door efficiënte filtering en denitrificatie. De hoge productiviteit van deze gebieden ondersteunt een rijke biomassa aan bodemdieren, die een belangrijke voedingsbron vormen voor vissen en trekvogels. Onze schorren en kwelders bieden ook broed-, schuil- en foerageerplekken voor veel vogelsoorten, vaatplanten en dagvlinders (WUR 2010). De Nederlandse delta is cruciaal voor trekvogels die gebruik maken de Noord-Atlantische trekroute en trekvissen gebruiken de overgangen om te migreren naar de bovenstroomse gebieden in het stroomgebied van Rijn en Maas (Dorenbosch et al. 2022). Het verdwijnen van onze kust- en deltanatuur heeft daarmee internationale gevolgen voor het voortbestaan van deze soorten.

Het behoud van gezonde ecosystemen is stevig verankerd in mondiaal, Europees en nationaal beleid. Volgens het VN-verdrag over Biologische Diversiteit moet biodiversiteitsverlies voor 2030 stoppen en natuurherstel in 2050 grotendeels voltooid zijn. Op Europees niveau verplicht de natuurherstelwet lidstaten om 30% van alle beschadigde ecosystemen te herstellen per 2030, 60% per 2040 en 90% per 2050. Voor Natura 2000-gebieden geldt al een verslechteringsverbod en een instandhoudingsdoelstelling voor habitats en wilde vogelpopulaties. Daarnaast hebben verschillende landen, zoals VK, Duitsland, Frankrijk en VS, al een 'no net loss' (NNL) richtlijn voor biodiversiteit. Deze richtlijn moet ervoor zorgen dat projecten niet leiden tot additioneel biodiversiteitsverlies.

Box 2. Het belang van estuariene ecosystemen voor vis, schelp- en schaaldieren

Een divers en goed verbonden kust- en estuariene ecosysteem is essentieel voor instandhouding van vispopulaties, zoals schol. De levenscyclus van schol en andere vissoorten begint met de afzetting van eieren in specifieke habitats. Vaak is hiervoor een bepaald type omgeving nodig, zoals wier- of zeegrasvelden of riffen, die bescherming bieden aan het broedsel. Nadat de eieren uitkomen, zijn de larven afhankelijk van veilige opgroeigebieden waar ze minder last hebben van predatie. Voor veel vissoorten biedt een estuariene systeem met diverse geomorfologische kenmerken, zoals zandbanken, getijdengeulen en brak waterzones, de ideale omgeving om te schuilen en op te groeien. Daarnaast kunnen sommige roofdieren, zoals grote kreeftachtigen, minder goed overleven in brakwater omstandigheden wat jonge vissen extra bescherming biedt. Een goed functionerend estuarium, rijk aan variatie in zoutgehaltes, zoet en brak water en met een complexe morfologie creëert zo een veilige buffer tegen predatoren. De zoet-zoutdynamiek kan bijvoorbeeld zeesterren op een afstand houden en zo bijdragen aan de bescherming en het herstel van mosselbanken. Een rijke schakering van habitats is dus essentieel om te zorgen dat soorten alle stadia van hun levenscyclus kunnen doorlopen. Zonder deze diversiteit en variatie zouden vispopulaties niet in stand kunnen worden gehouden, met als gevolg dat de vangst van commerciële soorten, zoals schol, onder druk komt te staan. Het ecosysteem biedt voor de visserij een cruciale dienst die meestal niet wordt meegenomen in de economische prijs van vis, maar die onmisbaar is om te zorgen dat we ook in de toekomst kunnen blijven profiteren van deze natuurlijke rijkdom.

2 Nature-based solutions en gezonde ecosystemen

2.1 Nature-based solutions

Investerders en overheden erkennen steeds vaker de risico's en onzekerheden die klimaatverandering en biodiversiteitsverlies met zich meebrengen. Hierdoor wordt integratie van natuur in infrastructuur en ruimtelijke ontwikkeling steeds vanzelfsprekender. De belangstelling voor 'Nature-based Solutions' (NBS) is de afgelopen jaren sterk toegenomen, maar grootschalige toepassing blijft een uitdaging. Hoe realiseren we natuurlijke oplossingen op een schaal die niet alleen maatschappelijke meerwaarde biedt, maar daadwerkelijk bijdraagt aan het herstel van natuurlijke systemen en het keren van biodiversiteitsverlies? Binnen het vierde consortium van het Kennisprogramma Zeespiegelstijging ontwikkelen we een natuur-inclusief analysemethodiek en ontwerpsystematiek. De benadering benut de krachten en kwaliteiten van natuur om robuuste strategieën en oplossingen te ontwikkelen die zowel de waterveiligheid als de ecologische veerkracht versterken. Door het natuurlijk systeem als uitgangspunt te nemen, werken we aan nieuwe en realistische toekomstperspectieven voor de Nederlandse kustzone en de deltawateren.

Natuurlijke oplossingen of nature-based solutions (NbS) kunnen op verschillende schalen worden toegepast, maar essentieel voor het functioneren van natuurlijke oplossingen is het begrip van het functioneren van het natuurlijk systeem op grotere schaal. De abiotische randvoorwaarden op verschillende schalen bepalen voor een groot deel de veerkracht en gezondheid van de ecosystemen die de basis van NbS concepten vormen. De oplossingen grijpen in op natuurlijke processen om bepaalde diensten of processen van dat systeem functioneel in te zetten voor bijvoorbeeld waterveiligheid of zoetwaterberging.

Box 3. Definitie van Nature-based Solutions volgens IUCN

"Nature-based solutions zijn maatregelen of bouwstenen om (semi-)natuurlijke ecosystemen te beschermen, duurzaam te beheren en te herstellen, zodat maatschappelijke problemen effectief worden opgelost ten bate van de mens en natuur" (bron IUCN).

2.2 Nature-based solutions voor waterveiligheid

Nature-based Solutions (NBS) bieden een integrale en duurzame manier om waterveiligheid te vergroten en bieden voordelen ten opzichte van harde keringen en dijken. Zo dragen ecosystemen, zoals strand, duinen en intergetijdengebieden, niet alleen bij aan het verminderen van de kans op overstromingen, waardoor dijken minder ingrijpend versterkt hoeven te worden, maar ook aan het beperken van de gevolgen van een overstroming, doordat water minder snel de achterliggende polder kan vullen (Zhu et al. 2020; van den Hoven et al. 2023). Ze vormen effectieve maatregelen voor klimaatadaptatie, doordat buitendijkse schorren en kwelders kunnen meegroeien met zeespiegelstijging door sediment vast te leggen. Natuurlijke oplossingen kunnen fungeren als een fysieke barrière tegen het water, zoals duinen langs de zandige kust.

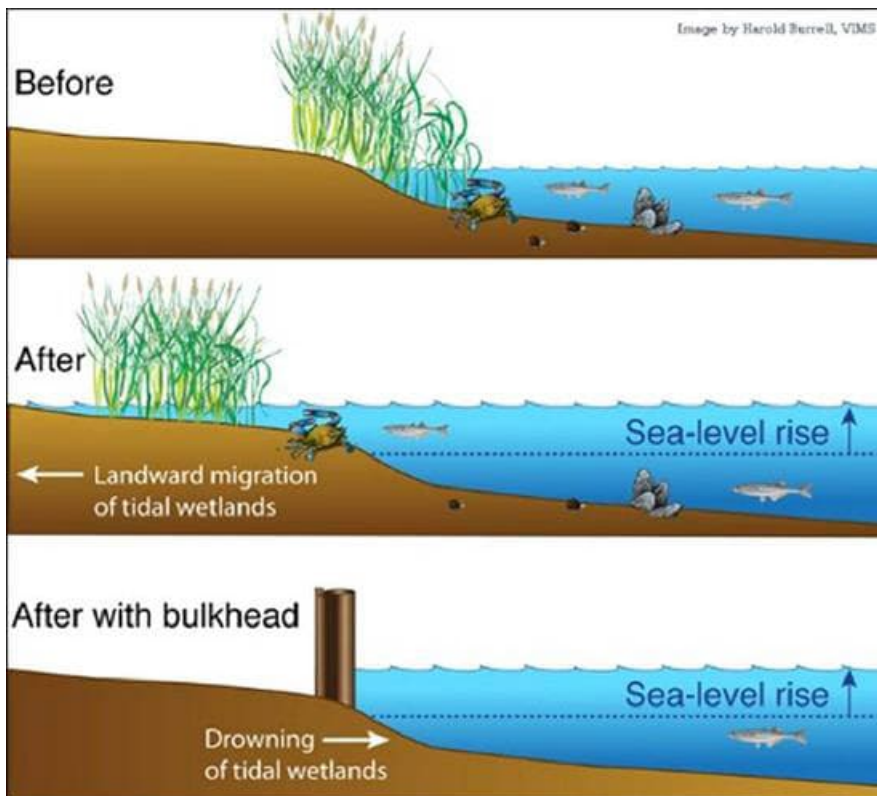
In Nederland maken we veelvuldig gebruik van deze oplossing langs onze Westelijke kustlijn waar de duinenrij onze voornaamste bron van bescherming tegen de zee is. NBS dempen daarnaast ook golven en daarmee de impact op de dijk of het achterland verkleinen, denk aan schorren en kwelders langs de kust en oobossen in rivieren. Daarnaast zorgen planten voor het consolideren van de grond en voor bodembescherming tegen erosie. Door sediment in te vangen en de bodem te verhogen zorgen, zandplaten, slikken en kwelders voor lagere waterstanden en minder strijklengte en dus golfopzet. Tot slot, kunnen NBS zichzelf, binnen bepaalde grenzen, herstellen bij schade. Bijvoorbeeld door weer aan te groeien of uit te breiden. Echter, er kleven ook nadelen aan werken met NBS. Het herstel en meegroeivermogen van NBS is bijvoorbeeld sterk afhankelijk van de gezondheid van het ecosysteem en de abiotische randvoorwaarden. Kortom, NBS vragen dat we op grotere schaal het systeem begrijpen en op orde brengen. Daarnaast zijn er nog onzekerheden over de effectiviteit en stabiliteit van NBS op de lange termijn, zoals bijvoorbeeld bij snelle zeespiegelstijging. Tot slot, zijn waterbeheerders gewend om te werken met constructieve oplossingen en brengt werken met natuurlijke oplossingen onzekerheden met zich mee. Dit maakt grootschalige toepassing van NBS nog lastig.

2.3 Ecosystemen en zeespiegelstijging

Zeespiegelstijging heeft ingrijpende gevolgen voor de natuur in de kustzone. Naarmate de zeespiegel stijgt, raken schorren, slikken, kwelders en wadplaten steeds vaker overspoeld. Hoewel intergetijdengebieden kunnen meegroeien met zeespiegelstijging, kan de aanvoer en afzetting van sediment uit balans raken of de snelheid van zeespiegelstijging te groot worden (Kirwan & Murray 2008, Huismans et al. 2022). Dit leidt tot verdrinking van wadplaten, slikken en kwelders.

Effecten van zeespiegelstijging op het natuurlijk functioneren van de kustzone worden versterkt door de aanwezigheid van dijken en bewoning. Hierdoor kunnen ecosystemen niet landwaarts migreren en raken ze ingeklemd tussen de stijgende zee en de dijken (Figuur 1.1). Dit fenomeen, bekend als “coastal squeeze”, beperkt de natuurlijke aanpassingsmogelijkheden van kustecosystemen (Doody et al. 2013). Tot slot neemt de zoutindringing landwaarts toe, zowel via de riviermonden als ondergronds via kwel. Dit leidt tot verzilting van zoetwatergebieden met bijbehorende negatieve gevolgen voor landbouw en waterkwaliteit.

Waterbouwkundige ingrepen hebben het natuurlijk systeem uit balans hebben gebracht, waardoor voortdurende investeringen en intensief beheer nodig zijn om de resterende natuurkwaliteit op peil te houden, zoals sedimentsuppleties in de Oosterschelde om intergetijdengebieden te laten meegroeien. Die investeringen zullen bij een stijgende zeespiegel alleen maar verder toenemen als intergetijdengebieden in de knel raken tussen het stijgende water en de dijk. Ingrijpende veranderingen in het kuststelsel, zoals de aanleg van de Deltawerken, hebben de sedimentaanvoer naar de slikken en kwelders drastisch verminderd. Hierdoor kunnen de intergetijdensystemen de zeespiegelstijging niet meer bijhouden (Nienhuis et al. 1994). Zonder ingrijpen zullen ecosystemen in de Zuidwestelijke Delta en de Waddenzee uiteindelijk geheel onder water verdwijnen. Dit leidt niet alleen tot verlies van unieke ecosystemen en biodiversiteit, maar vergroot ook de kosten voor dijkversterkingen door toegenomen golfoploop en erosie. Daarnaast zal de landbouwproductiviteit binnendijs als gevolg van verzilting afnemen (Velilla et al., 2025 en referenties hierin). Het ontwikkelen van een robuust natuurlijk systeem in de kustzone onder zeespiegelstijging is essentieel om zowel de ecologische en economische productiviteit van Nederland op de lange termijn te behouden. Dit sluit ook aan bij de visie achter de streefbeelden die worden ontwikkeld binnen de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) (<https://www.pagw.nl/>).



Figuur 2.1. Coastal squeeze (NOAA Fisheries, 2019)

2.4 Randvoorwaarden voor veerkrachtige ecosystemen

Gezonde, veerkrachtige ecosystemen bieden meer ecosysteemdiensten en hebben een hogere economische en ecologische waarde dan gedegradeerde ecosystemen. Bovendien kunnen gezonde systemen zich beter herstellen en aanpassen na verstoringen. Biodiversiteit speelt hierin een sleutelrol: hoe rijker een ecosysteem aan soorten, hoe veerkrachtiger, stabiel en productiever het is. Soortrijkere ecosystemen produceren meer biomassa en kunnen beter omgaan met verstoringen, omdat soorten elkaars functies, bijvoorbeeld in de voedselketen, kunnen overnemen.

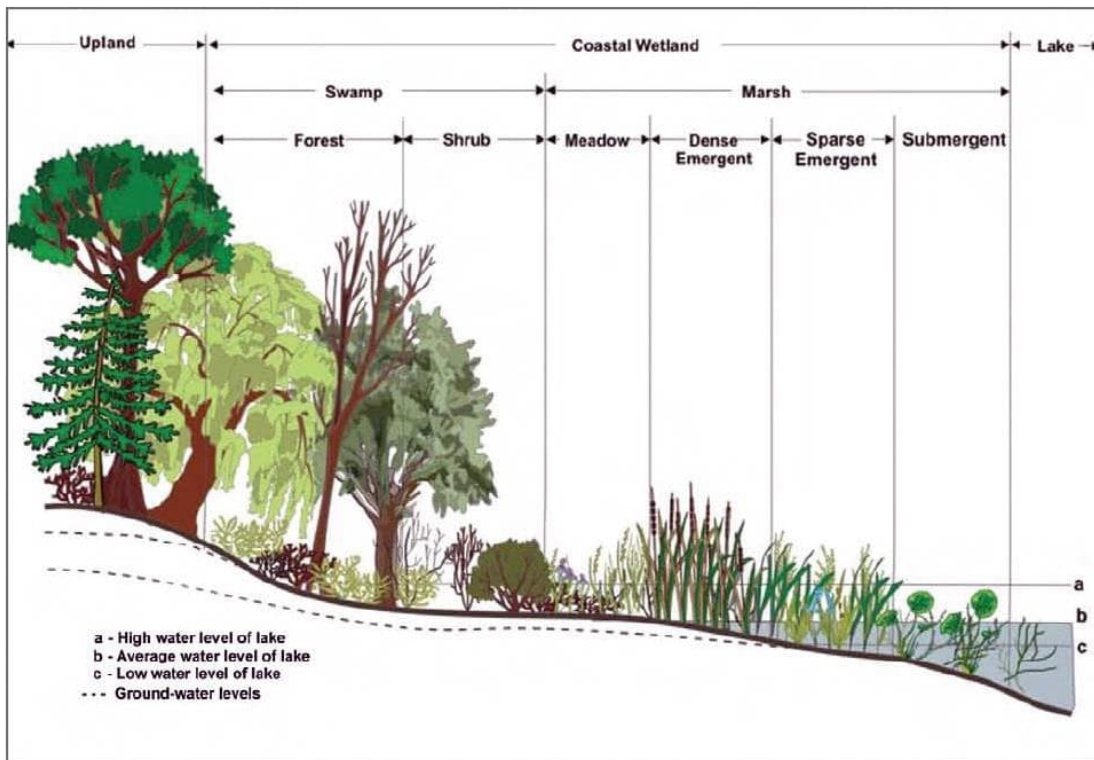
De veerkracht en stabiliteit van een ecosysteem hangen sterk af van drie randvoorwaarden: ruimte, connectiviteit en dynamiek. Deze factoren maken het mogelijk dat natuurlijke processen ongehinderd kunnen verlopen, wat essentieel is voor het biodiversiteitbehoud en -herstel. Zonder voldoende ruimte, verbindingen tussen leefgebieden en natuurlijke dynamiek lopen ecosystemen het risico verloren te gaan, met verstrekende ecologische, economische en sociale gevolgen.

Waterbouwkundige werken kunnen deze randvoorwaarden ernstig verstoren. Twee ingrijpende voorbeelden in de Nederlandse kustzone zijn de afsluiting van de Zuiderzee door de Afsluitdijk in 1932, waardoor een dynamische binnenzee veranderde in het IJsselmeer, en de aanleg van de Deltawerken in de Zuidwestelijke Delta. Beide ingrepen veranderden de natuurlijke dynamiek ingrijpend, met verstrekende gevolgen voor biodiversiteit en ecosysteemdiensten, zoals visserij en recreatie. Een andere grote impact wordt veroorzaakt door het uitbaggeren van de vaargeul, zoals bijvoorbeeld in de Nieuwe Waterweg en de Westerschelde. Dit verstoort het morfologisch evenwicht van het estuarium en leidt vaak tot verstelling en verstarring wat ten koste gaat van natuurlijke plaatdynamiek en micro-reliëf, en daarmee ook van de ecologische kwaliteit.

Ruimte

Ecosystemen hebben ruimte nodig om goed te functioneren. Zonder voldoende ruimte raken natuurlijke processen verstoord en worden populaties te klein om te overleven. Stormen en overstromingen spelen een belangrijke rol in de verjonging van systemen. Wanneer er voldoende ruimte is, bevorderen deze verstoringen de biodiversiteit door nieuwe habitats te creëren en de groei van verschillende vegetatiesoorten

te stimuleren. Een gebrek aan ruimte is duidelijk zichtbaar in de Rijnmaasmonding, waar de natuurlijke eigenschappen van het estuarium sterk zijn aangetast door de verstedelijking van het gebied. De Nieuwe Waterweg is strak ingeperkt voor scheepvaart, met harde oevers die nauwelijks natuurlijke overgangen toelaten. De natuurlijke overgangszones tussen water en land, en de bijbehorende biodiversiteit zijn grotendeels verdwenen. Hierdoor verdwijnen niet alleen kenmerkende planten van zoete en zoute intergetijdengebieden, maar verliezen ook verschillende vissoorten die origineel van zout naar zoet migreren hun essentiële rustplekken.



Figuur 2.2. Volledig ontwikkelde vegetatiezonering langs de overgang van land naar water in de kustzone (Bron: Wilcox et al. 2007)

Connectiviteit

Connectiviteit verwijst naar de verbindingen binnen een ecosysteem, noodzakelijk voor de uitwisseling van nutriënten en bouwstoffen, en voor biologische processen, zoals migratie en voortplanting. Zonder deze verbindingen raken populaties geïsoleerd, neemt genetische diversiteit af en groet het risico op uitsterven.

Een gebrek aan connectiviteit is duidelijk zichtbaar in geïsoleerde en afgesloten gebieden zoals de Grevelingen, de Haringvliet, Volkerak zoommeer en het IJsselmeer. De afsluiting van de Zuiderzee en de aanleg van dammen en sluisen in de Zuidwestelijke Delta hebben de verbindingen tussen waterlichamen sterk verminderd. Zonder voldoende verbindingen worden populaties van planten en dieren geïsoleerd, wat leidt tot een afname van genetische diversiteit en een verhoogd risico op uitsterven. Geleidelijke overgangen tussen zoet en zout water zijn vrijwel verdwenen. Dit leidde tot een sterke afname van vispopulaties die afhankelijk waren van migratie tussen zout en zoet water, waardoor populaties van trekvisen zoals zalm, paling en steur instortten. Bovendien werd de uitwisseling van nutriënten tussen de zee en het binnenland verstoord, met negatieve gevolgen voor de waterkwaliteit en ecologische gezondheid. Bovendien werd het vermogen van deze gebieden om mee te groeien met de zeespiegelstijging ondermijnd door een verminderde sedimentaanvoer. Dit resulteert in grote onderhoudskosten, bijvoorbeeld voor de zandsuppleties in de Oosterschelde om het intergetijdenareaal te onderhouden, en tot irritatie bij

ondernemers en recreanten over gebrekkige waterkwaliteit, zoals bijvoorbeeld bij Veerse meer en Grevelingen een jaarlijks terugkerend fenomeen is door zuurstofloosheid en algenbloei.

Dynamiek

Dynamiek omvat fysische processen zoals veranderingen in seizoenen en weer, fluctuaties in waterstanden en stroming (hydrodynamiek) en erosie en sedimentatie (morfodynamiek). Deze processen creëren kansen voor verjonging, maar brengen ook natuurlijke verstoringen met zich mee. Daarnaast gaat dynamiek ook over biologische successie, verstoring en herstel. In een gezond systeem bouwen schorren zich op, maar ondergaan ze ook erosie, wat essentieel is om verschillende ontwikkelingsstadia van het schor en de bijbehorende vegetatie in stand te houden. Afname van natuurlijke morfodynamiek, door minder getijbeweging, of door kunstmatige ingrepen zoals steenbestortingen, stoppen het proces van verjonging. Hierdoor gaat op schorren climaxvegetatie domineren, wat de veerkracht van het ecosysteem aantast. Zonder dynamiek verliezen deze gebieden hun aanpassingsvermogen, met als gevolg afnemende biodiversiteit en een verminderde capaciteit om verstoringen op te vangen.

De aanleg van de Deltawerken verminderde natuurlijke getijdendynamiek en de stroming in grote delen van de Zuidwestelijke Delta drastisch. Hierdoor werd de morfologie aangetast, omdat deze afhankelijk is van wisselende waterstanden voor sedimentopbouw. Zonder dynamiek zijn slikken en platen kwetsbaarder geworden voor zeespiegelstijging en andere veranderingen. Daarnaast raakten zeldzame vegetatie- en diersoorten in de knel, wat leidde tot biodiversiteitsverlies.

2.5 Wereldwijde impact

Naast het IJsselmeer en de Zuidwestelijke Delta zijn er wereldwijd talloze voorbeelden die illustreren hoe het afsluiten van waterlichamen leidt tot verlies van ruimte, dynamiek en connectiviteit, met verstrekkende gevolgen voor de biodiversiteit en ecosysteemfuncties. De bouw van de Aswandam in Egypte heeft bijvoorbeeld de sedimentaanvoer naar de Nijldelta sterk verminderd. Hierdoor nam de vruchtbaarheid van landbouwgrond af en sloeg de uitbouw van de kustlijn om in erosie. In de Verenigde Staten hebben dammen in de Columbia River de migratie van zalm ernstig verstoord, wat negatieve gevolgen voor zowel de vispopulaties als de inheemse gemeenschappen die afhankelijk zijn van de zalmvisserij. Bovendien verminderde de aanvoer van mineralen en nutriënten vanuit de oceaan naar het binnenland sterk, waar stervende zalmen bovenstrooms de belangrijkste bron van voedingsstoffen vormden.

Het vastleggen van kusten leidt tot een verlies van natuurlijke dynamiek en connectiviteit in kustecosystemen. Vanwege zeespiegelstijging wordt dit vergroot door optredende “coastal squeeze” wat kan resulteren in het volledige verlies van ecosystemen, zoals mangroves, kwelders en slikken. De verstoring van de natuurlijke uitwisseling van water, sedimenten en nutriënten tussen zee en binnenland tast bovendien de waterkwaliteit en ecologische gezondheid van kustwateren aan. Op mondiale schaal kan het rigide vastleggen van kusten leiden tot een dramatische afname van biodiversiteit en een verslechtering van ecosysteemfuncties. Dit treft niet alleen flora en fauna, maar ook voor de menselijke gemeenschappen die afhankelijk zijn van de ecosysteemdiensten, zoals visserij, kustbescherming en recreatie. Om veerkrachtig ecosystemen te behouden die zich kunnen aanpassen aan zeespiegelstijging en klimaatverandering, moeten ruimte, connectiviteit en dynamiek centraal staan in het beheer van ecosystemen en bij toekomstige waterbouwkundige ingrepen.

3 Ontwerpen met het natuurlijk systeem als basis

3.1 Het natuurlijke systeem als basis

Om verder te komen met complexe opgaven wordt in de ontwerpwereld vaak gebruik gemaakt van ontwerpend onderzoek. Ontwerpend onderzoek won begin deze eeuw aan populariteit in stedelijke planning en landschapsarchitectuur en wordt inmiddels breed toegepast in zowel praktijk als onderzoek. Het is een interdisciplinaire benadering waarbij nieuwe oplossingen, producten of systemen worden ontwikkeld via een iteratief proces van ontwerpen, testen en evalueren. Naast het zoeken van innovatieve ontwerpen, draagt deze methode ook actief bij aan het genereren van nieuwe kennis. Waar ontwerpend onderzoek zich richt op het ontwikkelen van tastbare oplossingen, helpt systeemdenken om deze oplossingen in te bedden in bredere ecologische, sociale en economische contexten. Door deze combinatie biedt ontwerpend onderzoek een krachtig kader voor het werken met natuurlijke oplossingen, waarbij niet alleen wordt gekeken naar het ontwerp zelf, maar ook naar de onderliggende dynamieken en interacties binnen het systeem.

Om natuurlijke oplossingen goed tot hun recht te laten komen en de volledige potentie van het natuurlijk systeem in beeld te krijgen, hanteren we hier een onderzoekende ontwerpmethodologie waarbij het natuurlijk systeem centraal staat (Box 3). Een goed functionerend natuurlijk systeem vereist de juiste abiotische randvoorwaarden, die we samenvatten in drie fundamentele randvoorwaarden: ruimte, connectiviteit en dynamiek. Om te begrijpen hoe het natuurlijk systeem er voorstaat en waar knelpunten zitten liggen, starten we met het uitvoeren van een systeemanalyse (**Stap 1**). Deze systeemanalyse geeft inzicht in de belangrijkste knelpunten (**Stap 2**) en de autonome ontwikkeling van het natuurlijk systeem onder invloed van klimaatverandering en menselijk handelen (**Stap 3**). Door natuurlijke en menselijke oorzaken van veranderingen te onderscheiden, wordt duidelijk waar ingrepen en beheersmaatregelen nodig zijn om het systeem gezonder en veerkrachtiger te kunnen maken (**Stap 4**).

Een cruciaal aspect binnen deze aanpak is het kwantificeren van ruimte. Dit doen we via een natuurreferentiewaarde-analyse (**Stap 5**), waarin we voor verschillende fysiotopten (of ecotopten) vaststellen welke arealen nodig zijn voor een natuurlijk functionerend systeem. Deze waarden worden afgeleid uit een historische analyse van het systeem en door vergelijking met vergelijkbare ecosystemen in een meer natuurlijke staat. Op basis van kansrijke systeemmaatregelen wordt vervolgens een toekomstbeeld geschetst (**Stap 6**). Dit toekomstbeeld laat zien of de (systeem)maatregelen samen de gewenste arealen fysiotopten (natuurreferentiewaarden) opleveren en of dynamiek en connectiviteit voldoende ondersteund. Om dit systematisch te toetsen, worden verschillende alternatieven uitgewerkt, waarmee de reikwijdte en effectiviteit van de verschillende (systeem)maatregelen wordt verkend (**Stap 7**).

Elk alternatief wordt tenslotte geëvalueerd op basis van kosten, baten en de mate waarin doelbereik en natuurwaarden zijn behaald. Deze gegevens vormen de basis voor een maatschappelijke kosten-baten analyse waarmee de verschillende alternatieven worden vergeleken en weloverwogen keuzen kunnen worden gemaakt.

Box 3. Stappen in onderzoek en ontwerpproces voor werken met Nature-based Solutions

1. Systeemanalyse (geologie, hydrodynamiek, morfologie, ecologie),
2. Beschrijving knelpunten per deelsysteem,
3. Forecasten ecosysteem status in de toekomst per deelsysteem,
4. Definiëren systeemmaatregelen voor gezond en veerkrachtig natuurlijk systeem,
5. Kwantificeren natuurreferentiewaarden,
6. Maken van toekomstbeeld met systeemmaatregelen,
7. Analyse van systeemmaatregelen middels backcasting,
8. In kaart brengen kosten, baten en ecosystemendiensten van alternatieven.

3.2 Systeemanalyse

Het natuurlijk systeem is een complex samenspel van abiotische en biotische factoren die allemaal op orde moeten zijn om het geheel goed te kunnen laten functioneren en de vitale functies te kunnen vervullen. Inzicht in het functioneren van het natuurlijke systeem is essentieel bij het ontwerpen en optimaliseren van infrastructuur, zoals waterkeringen. Om een robuust ontwerp te maken, moeten de krachten waaraan infrastructuur blootstaat goed worden begrepen. Tegelijkertijd kan het natuurlijk systeem mogelijk bijdragen aan het verminderen van deze krachten. Dit vraagt om kennis van de natuurlijke processen die de opbouw en afbraak van het systeem beïnvloeden.

De lagenbenadering ondersteunt deze manier van denken (Ministerie VROM 2001). De basislaag bestaat uit water en bodem en omvat geologie, de hydrologie of hydrodynamica en morfologie (samen de fysiotopen van een gebied). Hier bovenop ligt ecologische laag, die de biotische componenten van het systeem omvat en waarin de natuurreferentiewaarden een rol spelen. Een diepgaand begrip van al deze abiotische en biotische lagen is van groot belang voor het effectief toepassen van nature-based solutions. Om het functioneren van een natuurlijk systeem beter te begrijpen en onderbouwde ontwerpkeuzes te maken, kunnen verschillende methoden worden ingezet, zoals modellering, veldonderzoek, metingen en monitoring van het systeem.

De natuurlijke lagen vormen de basis voor de twee andere lagen binnen de ruimtelijke ordening: de netwerk laag, die gaat over infrastructuur, en de occupatie laag, die gaat over wonen. Een gedegen analyse van de natuurlijke basis lagen vermindert de kans op verkeerde ontwerpbeslissingen in de netwerk- en occupatie laag, die kunnen leiden tot falende infrastructuur of onveilige woonlocaties. Idealiter houden de netwerk en occupatie laag rekening met de natuurlijke laag. Dit komt terug in principes zoals water en bodem sturend (Deltares et al. 2021) en zien we bijvoorbeeld terug in lintdorpen die zijn gebouwd op zandige kreekruggen, of aan bruggen die de breedte van de rivier in natte tijden moeten overspannen. Ruimtelijke adaptatie benut deze kennis door te zorgen dat mensen niet in hoog-risicogebieden wonen. Daarnaast vergt infrastructuur die aansluit bij de natuurlijke laag minder beheerinspanningen om duurzaam te functioneren.

3.3 Natuurreferentiewaarden

Grote delen van de kustzone zijn ecologisch waardevol en aangemerkt als Natura 2000 gebied. Gebieden vallen dan onder de habitat- of vogelrichtlijn en zijn beschermd. Nederland heeft hiervoor de verplichting deze duurzaam in stand te houden. Voor het ontwerpproces vatten we de essentiële ecosystemen van de kustzone samen in fysiotopen per deelgebied. Fysiotopen zijn abiotische eenheden waar in de basislaag dezelfde fysische omstandigheden heersen met betrekking tot de bodem, het water en de dynamiek. Per fysiotop kunnen verschillende ecotopen worden onderscheiden. Dit zijn eenheden met een vergelijkbare ecologische toestand en soortensamenstelling. De combinatie van een fysiotop en ecotoop wordt een ecosysteem of habitat genoemd. Meestal omvat een fysiotop verschillende habitattypen. Deze basislaag bevat het natuurlijk systeem op basis van natuurreferentiewaarden en daar vallen de fysiotopen om de huidige en de gewenste toestand te kunnen beschrijven onder. De natuurreferentiewaarden in deze studie zijn gebaseerd op de in 2024 aanwezige arealen plus de wettelijk vastgestelde herstelopgave. Meer hierover staat beschreven in het rapport "Bepalen van natuurreferentiewaarden" (van der Winden et al. 2025).

We ordenen de fysiotopen als volgt:

De zandige kust, die ons hele zanddelend kustsysteem omvat van de Vlaamse grens tot aan de Duitse grens. Met de fysiotopen:

- Duinen
- Strandwallen + strandvlakten,
- Ondiepe zee en buitendelta's
- Diepe zee.

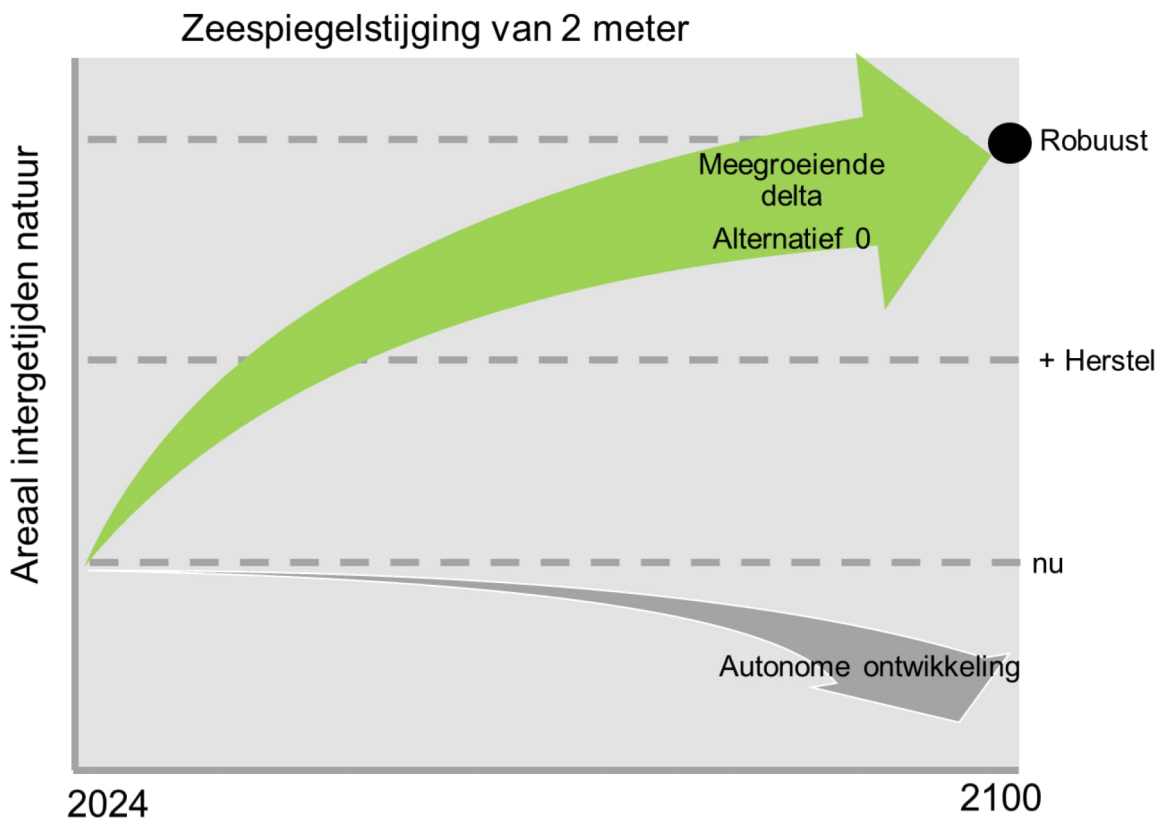
De kombergingsgebieden, zowel zoet, zout als brak, die alle estuaria, baaien en rivieren bevatten. Met de volgende fysiotopen:

- Kwelder (begroeid: grazig/moeras/griend)
- Slikken en platen (onbegroeid),
- Permanent overstroomd ondiep water
- Permanent overstroomd diep water.

3.4 Forecasten en backcasten

Om de volledige potentie van het natuurlijk systeem te verkennen wordt een aanpak gekozen die een combinatie van forecasten en backcasten gebruikt. Bij forecasten wordt gebruik gemaakt van gegevens uit het verleden om ontwikkelingen in de toekomst te voorspellen. Onder de autonome strategie verstaan we het voorkeurscenario, zoals beschreven onder het kennisprogramma zeespiegelstijging. We gebruiken de natuurreferentiewaarden per deelgebied om de effecten van zeespiegelstijging van 2 en 5,4 meter op het totale areaal aan intergetijdengebied te voorspellen op basis van verwachte meegroeisnelheden van de fysiotopen in elk deelgebied. Dit brengt de opgave voor intergetijden natuur bij zeespiegelstijging in kaart (Figuur 3.1).

Onder backcasten wordt het opstellen van een toekomst of gewenst referentiebeeld verstaan en vanuit daar terug te redeneren naar het heden. Om dit beeld te verkrijgen, maken we gebruik van systeemingenrepen die meer ruimte voor intergetijden gebieden realiseren en die de dynamiek en connectiviteit van de kustecosystemen verbeteren. Daarnaast is het uitgangspunt dat voor het land achter de dijken de huidige norm voor waterveiligheid gehandhaafd blijft. Het daaruit voortvloeiende wensbeeld wordt getoetst aan de opgestelde natuurreferentiewaarden op het gebied van arealen en vervolgens ook aan de andere elementen van het doelbereik, zoals waterveiligheid. De voorkeurstrategie en het opgestelde toekomstbeeld (alternatief 0) vormen beiden uitersten van het spectrum aan mogelijke alternatieven (Figuur 3.1). De ontwerpogave wordt verder onderzocht door middel van twee alternatieven waarin wordt gekeken wat de verschillende systeemmaatregelen onafhankelijk van elkaar opleveren. De alternatieven worden vergeleken ten opzichte van het doelbereik en andere functies middels een beoordelingskader.



Figuur 3.1. Conceptueel figuur van forecasting en backcasting voor de autonome ontwikkeling en alternatief 0 en de arealen natuurwaarden onder 2 meter zeespiegelstijging in 2100

Referenties

CBS and WUR (2022), Natural Capital Accounting in the Netherlands – Technical report. Statistics Netherlands (CBS) and Wageningen University and Research (WUR).

Deltares, BoschSlabbers, SWECO (2021). Op Waterbasis Grenzen aan de maakbaarheid van ons water- en bodemsysteem. Essay.

DNB & PBL (2020). Biodiversiteit en de financiële sector: een kruisbestuiving? Verkenning van risico's van biodiversiteits verlies voor de Nederlandse financiële sector.

Doody, P.J. (2013). Coastal squeeze and managed realignment in southeast England, does it tell us anything about the future? *Ocean & Coastal Management*, 79, P. 34-41.

Dorenbosch, M., de la Haye, M., van de Haterd, R., Huthoff, F., van Kleunen A., Liefveld, W. (2022). Klimaateffecten op riviernatuur. Rapport nummer OBN-2020-121-RI, Kennisnetwerk OBN, Driebergen.

HKV (2025). Studie naar reductie overstromingsgevolgen wisselpolder (voorlopige titel)

Huismans, Y., van der Spek, A., Lodder, Q., Zijlstra, R., Elias, E., Wang, Z.B. (2022). Development of intertidal flats in the Dutch Wadden Sea in response to a rising sea level: Spatial differentiation and sensitivity to the rate of sea level rise. *Ocean & Coastal Management* 216.

Kirwan, M.L. & Murray, A.B. (2008). Tidal marshes as disequilibrium landscapes? Lags between morphology and Holocene sea level change. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L24401, doi:[10.1029/2008GL036050](https://doi.org/10.1029/2008GL036050).

Ministerie VROM (2001) Ruimte maken, ruimte delen: Vijfde Nota over de Ruimtelijke Ordening 2000/2020: vastgesteld door de ministerraad op 15 december 2000, Den Haag

Nienhuis, P.N., Smaal, A.C. (1994). The Oosterschelde Estuary (The Netherlands): A Case-Study Of A Changing Ecosystem. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Reise, K. (2005). Coast of change: habitat loss and transformations in the Wadden Sea. *Helgoland Marine Research* 59, pages9–21

Ruimte voor zeespiegelstijging. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, staf Deltacommissaris. Een verkenning van denkrichingen om Nederland ook op lange termijn veilig en leefbaar te houden bij zeespiegelstijging. 2024

Troost, K., M. Tangelder, D. van den Ende & T.J.W. Ysebaert (2012). From past to present: biodiversity in a changing delta. Wageningen, Statutory Research Tasks Unit for Nature & the Environment (WOT Natuur & Milieu), WOt-werkdocument 317. 75 p. 38 Figs; 1 Table; 53 Refs; 2 Annexes.

van den Hoven, K., van Belzen, J., Kleinhans, M. G., Schot, D. M., Merry, J., van Loon-Steensma, J. M., & Bouma, T. J. (2023). How natural foreshores offer flood protection during dike breaches: An explorative flume study. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 294, 108560.

van Wesenbeeck, B. K., J. P. M. Mulder, M. Marchand, D. J. Reed, M. B. de Vries, H. J. de Vriend, and P. M. J. Herman. 2014. Damming deltas: A practice of the past? Towards nature-based flood defenses. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 140:1-6.

van Wesenbeeck, B.K., van Rees, F.F., Tonneijck, F., Cronin, K., Winterwerp, H. (2021). System Understanding; Building with Nature to restore eroding tropical muddy coasts. Ecoshape technical report, Dordrecht, The Netherlands.

Velilla, E., Snethlage, J., Poelman, M., van der Meer, I.M., van der Werf, A., Deolu-Ajayi, A.O., & van Belzen, J. (2025). Too salty to farm: rethinking coastal land use in response to soil salinization. *Restoration Ecology*, <https://doi.org/10.1111/rec.70006>

WEF & PWC (2020). Nature Risk Rising. 1st report in New Nature Economy project.

Wilcox, T.A., Thompson, R.K., Booth, Nicholas, J.R. (2007). USGS Document, Circular 1311, Lake-Level Variability and Water Availability in the Great Lakes

WUR (2010). Het biodiversiteitsbeleid in Nederland werkt (wur.nl). WOt document 225.

Zhu, Z., Vuik, V., Visser, P.J., Soens, T., van Wesenbeeck, B.K., van de Koppel, J., Jonkman, S.N., Temmerman, S., Bouma, T.J. (2020). Historic storms and the hidden value of coastal wetlands for nature-based flood defence. *Nature Sustainability* volume 3, pages853–862



Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

NATIONAAL DELTAPROGRAMMA



Rijkswaterstaat
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

