

Duurzaam kustonderhoud in de nabije en verre toekomst

Synthesedocument onderzoek Dutch Coastline Challenge



Duurzaam kustonderhoud in de nabije en verre toekomst

Synthesedocument onderzoek Dutch Coastline Challenge

Auteur(s)

Marcel Taal
Stéphanie IJff
Wiebe de Boer

Met bijdragen van:

Guido Akster (Vereniging van Waterbouwers)
Govert-Jan de Bruin (Vereniging van Waterbouwers)
Jelmer Cleveringa (Arcadis)
Thomas Hamer (Vereniging van Waterbouwers)
Chris Harrewijn (Vereniging van Waterbouwers)
Henriëtte Holzhauer-Meijer (Deltares)
Leon Hombergen (Rijkswaterstaat)
Jaap de Koning (Witteveen+Bos)
Quirijn Lodder (Rijkswaterstaat)
Arjen Luijendijk (Technische Universiteit Delft/Deltares)
Björn Röbbke (Deltares)
Giorgio Santinelli (Deltares)
Matthieu de Schipper (Technische Universiteit Delft)
Ad van der Spek (Deltares)
Helène Spiering (Vereniging van Waterbouwers)
Jeroen Terlingen (Vereniging van Waterbouwers)
Carlo Tonnaer (Vereniging van Waterbouwers)
Lodewijk de Vet (Deltares)
Thomas Vijverberg (Vereniging van Waterbouwers)
Bart van Westen (Technische Universiteit Delft/Deltares)

Illustraties:

Joost Fluitsma
Stéphanie IJff (Deltares)



Duurzaam kustonderhoud in de nabije en verre toekomst
Synthesedocument onderzoek Dutch Coastline Challenge

Opdrachtgever	Kennis- en Innovatieagenda Landbouw, Water en Voedsel Ministerie van Verkeer en Waterstaat Dutch Coastline Challenge
Contactpersoon	Frank Hallie
Referenties	WJZ/12045145 DEL 134
Trefwoorden	kustonderhoud, kustlijnzorg, suppleties, samenwerking, innovatie, morfologie, ecologie, klimaatneutraal, natuurinclusief, opschaling, zeespiegelstijging

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	27-03-2023
Projectnummer	11207047-005
Document ID	11207047-005-HYE-0002
Pagina's	59
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Marcel Taal Stéphanie IJff Wiebe de Boer	

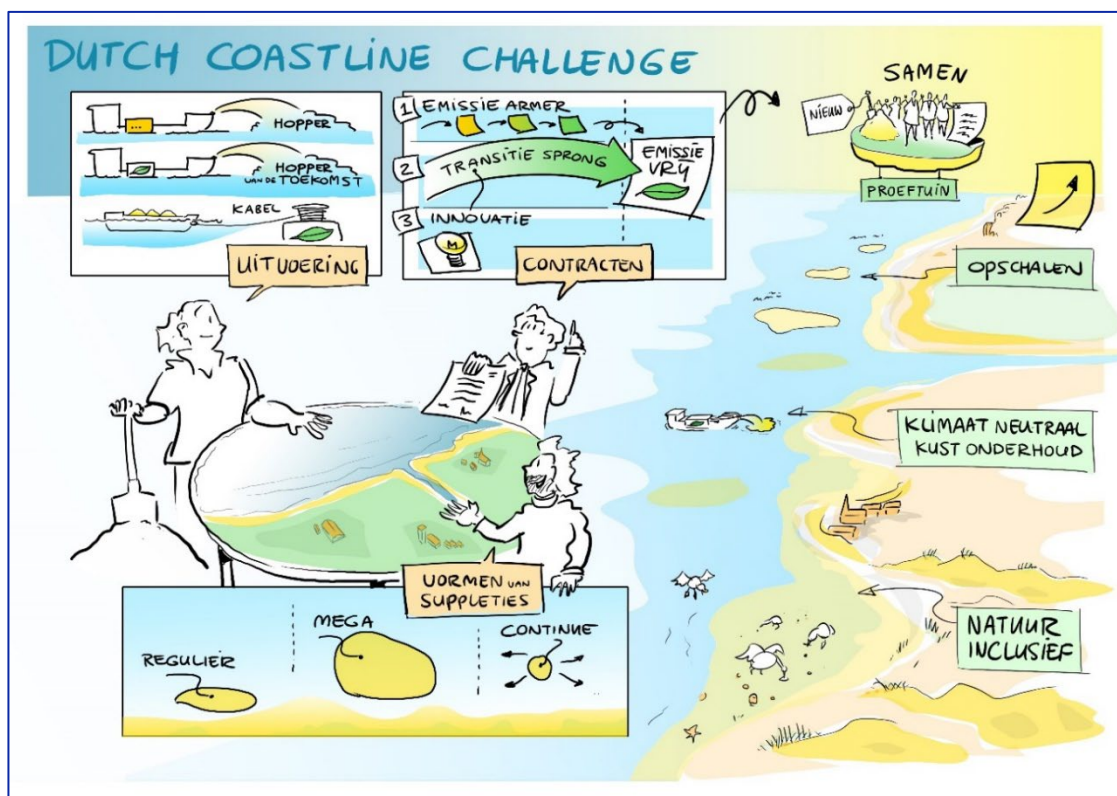
Onderstaande tabel is niet voor publicatie

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord
1.0	Marcel Taal Stéphanie IJff Wiebe de Boer	Arno Nolte	Dirk-Jan Walstra

Samenvatting

Dit rapport presenteert de resultaten van twee jaar onderzoek naar bouwstenen voor klimaatneutraal, natuurinclusief en opschaalbaar kustonderhoud. Het is uitgevoerd in een kennisalliantie van Rijkswaterstaat, de Vereniging van Waterbouwers, Ecoshape, Deltares en de TU Delft. Deze samenwerking is op zichzelf al een innovatie. Door samen te kijken vanuit verschillende vakgebieden (morfologie, ecologie, baggertechniek en aanbestedingswijzen) komen nieuwe oplossingen sneller in beeld. In het project is gewerkt met drie 'bouwstenen' voor kustonderhoud: suppletieconcepten; uitvoeringsmethoden; en samenwerkings- en contractvormen. Om de resultaten concreet en realistisch te laten zijn, is specifiek gekeken naar de toepassing langs de kust tussen IJmuiden en Texel.

Er zijn verschillende vormen van suppleties onderzocht: varianten van reguliere suppleties, megasuppleties en continue suppleties. Van de vele mogelijke uitvoeringsmethoden om emissies te beperken, bleken de emissiearme hopper (met LNG, biobrandstof en/of filters), de emissievrije 'hopper van de toekomst' met duurzame brandstof en de 'Cablehopper' het meest ver in de ontwikkeling. Voor kansrijke combinaties van deze suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden zijn de morfologische ontwikkeling, ecologische effecten, milieu-impact en kosten bepaald. Hieruit blijkt onder andere dat de beste kansen voor een robuuste stap naar emissievrij kustonderhoud liggen in een traditioneel concept (de hopper) doorontwikkeld met een emissiearme of een emissievrije aandrijving.



Om de transitie naar klimaatneutraal, natuurinclusief en opschaalbaar kustonderhoud te stimuleren, zijn drie sporen uitgewerkt voor de samenwerking tussen de markt en de overheid: emissiearme uitvoering, emissievrije uitvoering en een ontwikkelspoor. Het werken langs deze drie sporen is nodig om gelijktijdig te zorgen voor de leverzekerheid van het kustlijnonderhoud op korte termijn en te werken aan de transitie naar een duurzame uitvoering voor de langere termijn. Het beeld is dat de komende 15 jaar het grootste deel van de uitvoering van kustlijnonderhoud in spoor 1 en 2 zal plaatsvinden. De ambitie is dat spoor 1 rond 2030 samenvloeit

met de emissievrije uitvoering van spoor 2. De spelers in de markt zullen zich hierop aan moeten passen.

De synthese uit dit rapport geeft het inzicht dat het kustonderhoud momenteel met de reguliere typen suppleties prima op orde is en dat de inzet van andere, in het bijzonder grotere, suppleties in beeld komt als er aanvullende doelen mee gediend worden. Dat kan de behoefte aan een ruimtelijke ontwikkeling zijn in een kustvak, behoefte aan nieuw of ander natuurgebied, de wens om kennis te ontwikkelen met het oog op opschaling in de toekomst en/of innovatie in de markt een extra zet te geven. Daarbij kan gekeken worden naar de ervaringen bij de Zandmotor en de Hondsbossche duinen.

Er is een kans om grotere (clusters van) suppleties te koppelen aan de transitie naar klimaatneutraal kustonderhoud. Grotere suppleties of clusters van reguliere onderhoudssuppleties bieden schaal om de transitieprong naar emissievrij materieel mogelijk te maken. De beleidsmatige inpassing hiervan zou een combinatie kunnen zijn van het naar voren halen van kustonderhoud en van de maatschappelijke en ecologische meerwaarde die ontstaat. Aanbevolen wordt dit te ontwikkelen in combinatie met stakeholderparticipatie en kennisontwikkeling in een kennisalliantie. Een dergelijk *Living Lab* ligt logischerwijs in een kustvak met een terugkerende (grote) onderhoudsopgave en/of ruimtebehoefte voor gebruiksfuncties. Zo ontwikkelt Nederland tijdig kennis voor klimaatneutraal en opschaalbaar kustonderhoud.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding en context	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Doelstelling	8
1.3	Aanpak	9
1.4	Impact	10
1.5	Leeswijzer	11
2	Samenwerking	12
2.1	Probleemstelling en ambitie	12
2.2	Werkwijze	12
2.3	Resultaten	13
3	Resultaten werkpakketten	15
3.1	Systeemkennis kustvak IJmuiden-Texel en suppletieopgave tot 2035	15
3.2	Morfologische respons van suppletieconcepten	19
3.3	Ecologische respons van suppletieconcepten	23
3.4	Milieu-impact en kosten van uitvoeringsmethoden	27
3.5	Vergunbaarheid van suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden	31
3.6	Marktbenadering en contractstrategieën	34
3.7	Toepasbaarheid alternatieven in Nederland	36
4	Synthese	38
4.1	Criteria voor het vergelijken van de bouwstenen	38
4.2	Resultaten suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden	39
4.2.1	Resultaten reguliere suppleties	40
4.2.2	Resultaten megasuppleties	41
4.2.3	Resultaten continue suppleties	41
4.3	Redeneerlijnen projectdoelstellingen	42
4.3.1	Klimaatneutraal kustonderhoud	42
4.3.2	Natuurinclusief kustonderhoud	43
4.3.3	Opschaalbaar kustonderhoud	44
5	Aanbevelingen voor vervolg	46
5.1	Is er urgentie?	46
5.2	Gezamenlijke kennisontwikkeling in combinatie met uitvoering	47
6	Referenties	49
A	Afkortingenlijst	51
B	Overzicht kennisleemten	52

B.1	Kennisleemten die specifiek passen bij een vervolgproject	52
B.2	Innovatiebehoefte om tot verder opschalen emissievrije kustlijn­zorg te komen	53
C	Simuleren van suppletieconcepten met numeriek model	55

1 Inleiding en context

1.1 Aanleiding

Kennis- en Innovatie Agenda (KIA)

Dit rapport doet verslag van een onderzoek dat is uitgevoerd in het kader van de Kennis- en Innovatieagenda Landbouw, Water en Voedsel (KIA LWV). Het projectvoorstel is ontwikkeld onder de coalitietafel Dutch Coastline Challenge (DCC, zie het kader in 2.1) en beoogt nieuwe kennis en ervaring op te leveren om het zandige kustonderhoud in Nederland te verbeteren, met het oog op de toekomst. De KIA vroeg expliciet om voorstellen voor Publiek Private Samenwerking (PPS). De DCC was de omgeving waarin dit mogelijk was. Het projectvoorstel omvatte investeringen in kennis en in de samenwerking tussen overheid (Rijkswaterstaat), bedrijfsleven (Vereniging van Waterbouwers en EcoShape) en kennisinstellingen (Technische Universiteit Delft en Deltares). Het project is uitgevoerd in het kader van de Topconsortia Kennis- en Innovatie (TKI). Daarom wordt naar het project verwezen als 'TKI-DCC'.

Zandig kustonderhoud in Nederland

Zandsuppleties spelen een cruciale rol in het onderhoud en de versterking van de Nederlandse kust. Het is bij uitstek een voorbeeld van Building with Nature (werken met de natuur) en heeft zich bewezen als doelmatige methode om kustachteruitgang tegen te gaan. Baggerschepen winnen zand op de diepe Noordzee (meer dan 20 meter) en brengen dit aan in de kustzone. Golven, stromingen en wind verspreiden het zand verder. Zeer groot voordeel van deze wijze van kustonderhoud is de adaptieve en flexibele werkwijze. Als er in de toekomst of op specifieke locaties meer zand nodig is, kan dit vrijwel altijd worden opgeschaald.

Probleemstelling

Het voortzetten van het Nederlandse kustonderhoud kent uitdagingen, zoals ten eerste de waarschijnlijk versnelde zeespiegelstijging en toenemende weersextremen, leidend tot een toename van het suppletievolume. Ten tweede is er de opgave de uitstoot van broeikasgassen en andere milieubelastende stoffen zoals stikstofoxiden te verminderen. Ten derde ligt er een opdracht rekening te houden met effecten van het kustonderhoud op het ecologisch functioneren. Impact is er in alle delen van het kustprofiel, maar het grootst op de vooroever en in de duinen. Die effecten op natuurlijkheid zijn steeds beter gekend. Door anders te suppleren zou de negatieve impact kunnen verminderen en de natuur zelfs versterkt kunnen worden.

Deze problematiek is te complex om door één actor te worden opgepakt. Mede daarom is er al geruime tijd strategisch overleg over het zandige kustonderhoud tussen overheid, marktpartijen en kennisinstellingen binnen de coalitietafel Dutch Coastline Challenge. De noodzaak tot gezamenlijk uitvoeren van onderzoek om de problemen beter te lijf te gaan was een belangrijke uitkomst van dit overleg en leidde begin 2021 tot de start van dit project.

1.2 Doelstelling

Het doel van dit project is tweeledig:

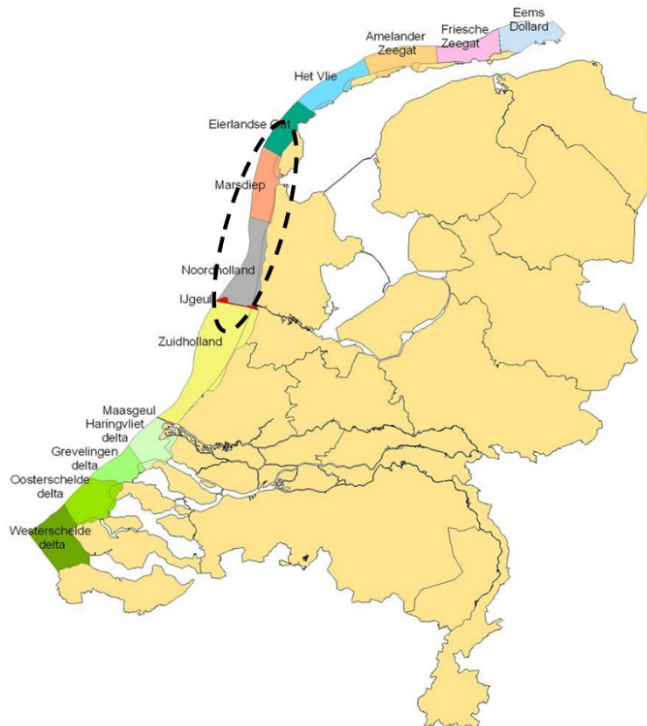
1. kennis ontwikkelen voor **'bouwstenen voor klimaatneutraal, natuurinclusief & opschaalbaar kustonderhoud'**; en
2. ervaring opdoen met en een doorbraak bewerkstelligen **in de samenwerking binnen de driehoek (overheid, markt, kennisinstellingen)** voor het kustonderhoud in de nabije en verre toekomst.

Er zijn drie typen bouwstenen:

- 1) **suppletieconcepten**: strand-, vooroever-, mega- en continue suppleties en varianten erop;
- 2) **uitvoeringsmethoden**, bijvoorbeeld conventionele baggerschepen versus alternatieve brandstoffen, pijpleidingen en transportmethoden; en

- 3) **samenwerkings- en contractvormen** zoals verdeling van verantwoordelijkheden en risico's tussen overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen, duur van een contract en aanbestedingssystematiek.

Dit project richt zich op nieuwe combinaties van suppletieconcepten, uitvoeringsmethoden en passende contract- en samenwerkingsvormen. Het beoogt daarmee verbeteringen c.q. innovaties in het kustonderhoud in kaart te brengen en te beoordelen op haalbaarheid en opschaalbaarheid. Dit gebeurt in een samenwerkingsverband tussen alle partijen in de 'keten' (overheid, marktpartijen en kennisinstellingen) en met een concreet stuk Nederlandse kust (IJmuiden-Texel, zie Figuur 1-1) als casus. Het kustvak is gekozen omdat het veel fysieke kenmerken bevat die representatief zijn voor de Nederlandse kust. Daarnaast is in dit kustvak al een andere vorm van kustonderhoud aanwezig, waarbij de marktpartijen verantwoordelijk zijn voor onderhoud op langere termijn: de Hondsbosche Duinen. Er is ook een concreet tijdvak gekozen: tot 2035. Dit tijdvak past bij de termijn waarop de duurzaamheidsambities verwezenlijkt moeten worden.

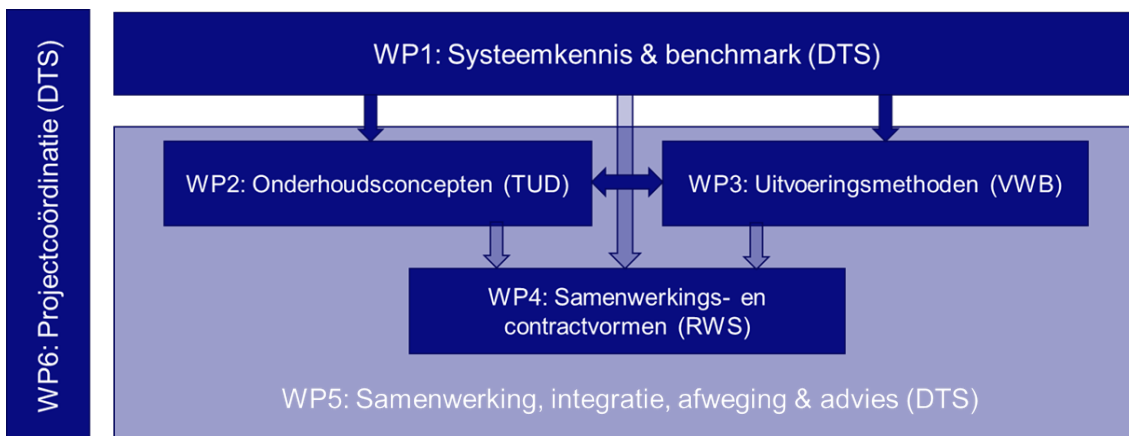


Figuur 1-1: Deelgebieden Nederlandse kust (morfologische eenheden, cf. Rijkswaterstaat, 2019) en daarin aangeduid de vakken die casus zijn in dit project

1.3 Aanpak

Werkpakketten

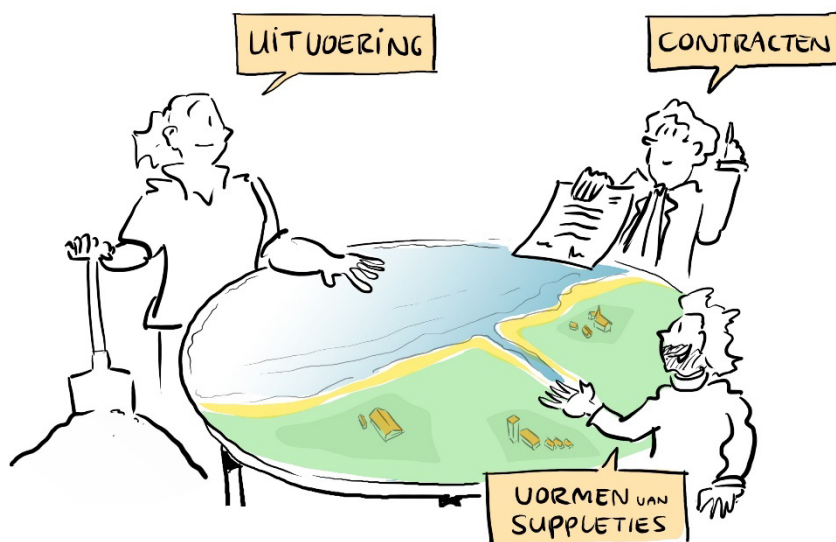
Het project is uitgevoerd in de periode maart 2021 t/m maart 2023. Het onderzoek is opgedeeld in vijf werkpakketten, waarbij de consortiumpartners – behalve EcoShape – ieder minstens één werkpakket leidden (Figuur 1-2). Dit volgde uit de doelstelling van het project om een stap te maken in de samenwerking in de driehoek (overheid-markt-kennisinstellingen). De bijdrage van EcoShape (via Arcadis en Witteveen+Bos) bedroeg het organiseren van 2 workshops voor interactie met en disseminatie naar de Nederlandse waterbouwsector. Daarnaast heeft EcoShape kennis toegeleverd aan de werkpakketten.



Figuur 1-2 Overzicht van de samenhang tussen de werkpakketten (WP's) en de Werkpakketleiders Deltares (DTS) TU Delft (TUD), Vereniging van Waterbouwers (VWB) en Rijkswaterstaat (RWS).

Producten

Behalve een integraal eindrapport (dit document) zijn er aparte rapportages van alle andere werkpakketten. In de aanpak zit ook een terugkoppeling: van de werkpakketten 2, 3 en 4 naar werkpakket 1. In het eerste halfjaar van het project is de systeemkennis en de suppletiebehoefte van de Noord-Hollandse kustvakken omschreven (zie 3.1). Vervolgens zijn de andere werkpakketten aan de slag gegaan. Met de (combinaties van) bouwstenen die uit die werkpakketten volgden is in de laatste fase van het project gekeken naar toepasbaarheid langs (andere delen van) de Nederlandse kust (zie 3.7).



1.4 Impact

De belangrijkste beoogde impacts van dit project zijn (i) een doorbraak in de samenwerking binnen de driehoek (overheid, bedrijfsleven, kennis), leidend tot (ii) het versnellen van verduurzaming van het kustonderhoud en (iii) het uitvoerbaar houden op het kustonderhoud op lange termijn. Economische impact wordt beoogd via (iv) kostenreducties en schaalvoordelen voor het Nederlandse kustonderhoud en (v) vergroting van de innovatiekracht van de Nederlandse watersector, ook in het buitenland.

Om deze impact te bereiken zijn de regionale en lokale stakeholders (zoals provincies, waterschappen en regionale diensten van Rijkswaterstaat) betrokken, zowel direct als via brede workshops. Een toets of deze impact daadwerkelijk bereikt is, kan echter niet tijdens de looptijd van het project worden gedaan. De impacts doen zich pas op langere termijn voor.

1.5 Leeswijzer

In dit rapport worden allereerst de resultaten van de samenwerking gedeeld (hoofdstuk 2), gevolgd door de belangrijkste bevindingen uit de verschillende werkpakketten (hoofdstuk 3). In de synthese (hoofdstuk 4) worden de bouwstenen in samenhang geëvalueerd en beschrijven we wat nodig is voor het realiseren van klimaatneutraal, natuurinclusief en opschaalbaar kustonderhoud. Het rapport sluit af met aanbevelingen voor het vervolg (hoofdstuk 5) en de referenties (hoofdstuk 6).

De TKI-Dutch Coastline Challenge heeft veel resultaten opgeleverd die niet allemaal passen in dit syntheserapport. Daarom zijn per werkpakket rapportages beschikbaar gesteld met toelichting over de methode, de resultaten en interpretatie daarvan. Deze rapportages zijn te raadplegen op <https://publicwiki.deltares.nl/display/TKIP/DEL134+-+TKI+Dutch+Coastline+Challenge%3A+samen+naar+duurzaam+en+opschaalbaar+kustonderhoud>.

2 Samenwerking

2.1 Probleemstelling en ambitie

Dit project heeft een dubbele doelstelling: (i) kennis ontwikkelen en (ii) een doorbraak in de samenwerking binnen de driehoek (overheid, markt, instituten) bewerkstelligen. De noodzaak hiertoe is vastgesteld tijdens de overleggen van de coalitietafel van de Dutch Coastline Challenge (zie kader). Het ontbrak echter aan “hands-on” ervaringen in mogelijke stappen vooruit in de vorm van concrete projecten. Dit project had als een van de doelen ervaring op te doen met samenwerking, in het bijzonder gezamenlijk kennis ontwikkelen, binnen een relatief ‘veilige’ omgeving (zonder de kans op directe impact op bestaande suppletieprogramma’s en contracten). Het is opgezet als een ‘living lab’, om door lerend werken (‘learning by doing’) de beste werkwijze te vinden.

Dutch Coastline Challenge

In de overtuiging dat voor de opgaven voor toekomstig kustonderhoud meer samenwerking nodig is tussen overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen is begonnen met de Dutch Coastline Challenge (DCC). De rolverdeling in het kustonderhoud is duidelijk en werkbaar¹. Het is niet de ambitie deze te veranderen, maar de nood werd gevoeld de samenwerking op een andere manier vorm te geven dan we gewend zijn. Hiermee werd onder meer gedoeld op de huidige wijze van aanbesteden van het kustonderhoud die een klimaatneutrale wijze van uitvoeren onvoldoende ondersteunde, omdat vooral op prijs werd geselecteerd. Ook werd verwezen naar de praktijk waarin het delen van data en informatie niet vanzelfsprekend was, met overwegingen t.a.v. concurrentie als motivatie.

De DCC noemt zich een beweging, om mensen bij elkaar te brengen die de noodzaak op een andere wijze te werken ook voelen en die in samenwerking stappen vooruit willen zetten. Meer informatie is te vinden via:

https://debouwcampus.nl/bestanden/transitietrajecten/Dutch_Coastline_Challenge/documenten/DCC_5_sporen_en_het_verhaal.pdf

Het meest in het oog springende onderdeel van de DCC is de ‘coalitietafel’. Dat is een open overleg op directieniveau met vertegenwoordigers van het ministerie (beleidskern Infrastructuur en Waterstaat), Rijkswaterstaat, Deltares, Technische Universiteit Delft, Vereniging van Waterbouwers en EcoShape. Via dit overleg is het voorstel tot verder samenwerken in dit TKI-project mogelijk geworden. Bij de uitvoering van dit project heeft de coalitietafel gediend als klankbord voor de gebruikers van de resultaten en als mogelijkheid om belemmeringen in de samenwerking uit de weg te ruimen. Voor dit laatste is nauwelijks nood geweest (zie de resultaten in 2.2).

2.2 Werkwijze

Om de samenwerking te bevorderen is bij het voorbereiden en opzetten een aantal keuzes gemaakt. De basis daarvoor werd al gelegd in samen doen van de aanvraag, vanuit de samenwerking in de DCC. Uit de doelstelling van het project om een stap te maken in de samenwerking in de driehoek (overheid-markt-kennisinstuten) volgde onder meer dat elk van de partijen minstens één werkpakket leidde, zie Figuur 1-2. De taakverdeling volgde logisch ieders expertise. Deltares werd verantwoordelijk voor werkpakket 1, systeemkennis, de Technische Universiteit voor het ontwikkelen en evalueren van suppletieconcepten (WP2), de Vereniging van Waterbouwers nam het voortouw in de studie naar de uitvoering (WP3) en de

¹ Dat is kortweg de volgende: De verantwoordelijkheid voor beleid en beheer ligt bij de overheid (de uitwerking: hoeveel kustonderhoud is waar nodig en op welke wijze). De kennisinfrastructuur om dit beleid en beheer te ondersteunen wordt gevormd door de kennisinstuten in samenwerking met ingenieurs/adviesbureaus. De daadwerkelijke uitvoering gebeurt door bedrijven (voor zandsuppleties zijn dit de zogenaamde baggerbedrijven).

overheid (c.q. Rijkswaterstaat) in de samenwerking en contracten in WP4. Voor de synthese was Deltares als eerste verantwoordelijk, cf. het projectleiderschap.

Tijdens de uitvoering is op basis van gelijkwaardigheid samengewerkt. De projectleiding van Deltares richtte zich in eerste instantie op het organiseren en bewaken van de samenwerking. Voor de reguliere afstemming was er een kernteam met alle trekkers van de werkpakketten. Voor een verbinding met de 'achterban', in het bijzonder op het strategisch niveau, werd de coalitietafel van de DCC gebruikt. Twee tot drie maal per jaar werd de voortgang van het project besproken, met veel aandacht voor de samenwerking. Door personele unies van projectmedewerkers en adviseurs met ander onderzoek naar de Nederlandse kust kon goed afgetapt en samengewerkt worden met andere projecten. Hieronder waren 'Beheer en Onderhoud Kust', 'Innovaties in de Kustlijnzorg (IKZ)', 'Kennissprogramma Zeespiegelstijging' en het 'Transitiepad Kustlijnzorg en Vaargeulonderhoud'.

De samenwerking is verder bevorderd door samenwerkingsdagen waarin vanuit alle werkpakketten resultaten zijn besproken. Enkele bredere workshops zijn gebruikt voor het selecteren van kansrijke alternatieven en kennisdisseminatie naar de Building with Nature "community"(organisaties verbonden met EcoShape).

Om ervoor te zorgen dat de projectresultaten goed bekend zijn en er geen marktverstoring kan optreden is open gecommuniceerd. Kennis en lessen zijn breed en openbaar gedeeld, tijdens het onderzoek tussen de partners en naar de omgeving via presentaties/webinars bij congressen en kennisnetwerken. Dit uiteraard naast rapporten en publicaties, die open beschikbaar zijn gesteld. Dit heeft gezorgd voor het handhaven van het 'level playing field' bij eventuele uitvragen in de toekomst die gebruik maken van de kennis.

2.3 Resultaten

Uitgevoerde evaluaties

Tijdens de uitvoering van het project is steeds de vraag gesteld of de deelnemers tevreden waren met de samenwerking. Dat gebeurde meestal informeel, via de overleggen van het kernteam of tijdens workshops waar een bredere vertegenwoordiging van markt, overheid en instituten aanwezig was. Tijdens één van de eerste workshops (10 juni 2021) is er ruimer aandacht aan besteed. De conclusies zijn in het verslag beschreven als Tops en Tips. De samenvatting van de Tops is dat het team goed samenwerkt en dat er ruimte is om samen de invulling van het onderzoek te bepalen. De belangrijkste Tip was te streven naar een nog bredere betrokkenheid van de sector.

Na de zomer van 2022 is, bij het bespreken van de concept-resultaten, vastgesteld dat de wijze van samenwerking, in een kennisalliantie, zeer geslaagd is. Het kan een voorbeeld zijn voor toekomstig onderzoek, in het bijzonder als het op het raakvlak van planning en uitvoering van kustlijnzorg ligt. Dit is ook besproken bij de coalitietafel en het is de belangrijkste pijler van het nadenken over het vervolg (zie paragraaf 5.2).

Op 15 december 2022, dus richting de afsluiting van het project, is onder de leiding van een onafhankelijk facilitator (youfacilitate.nl) een volledige evaluatie van de samenwerking uitgevoerd. Een representatieve uitsnede van de conclusies en aanbevelingen is²:

- De samenwerking en de openheid is erg gewaardeerd. Er waren geen verborgen agenda's en er was loyaliteit in het team. Het is verheugend te zien dat er weinig personele wisselingen nodig waren.
- De tijd die is geïnvesteerd in het samenwerken heeft zich uitbetaald. Ook basale inzichten van het ene werkpakket zijn erg waardevol voor het andere. Er had wel nog meer op synergie tussen de werkpakketten gestuurd kunnen worden.
- De focus op een concreet gebied heeft geholpen.
- Maak de samenwerkingsdoelen de volgende keer explicieter en hoe van de samenwerking geleerd zal worden.

² Verslagen van evaluatiesessies kunnen opgevraagd worden bij tkidcc@deltares.nl.

- Hou bij een vervolg dezelfde aandacht voor de diversiteit aan deelnemers, vergroot deze liefst.

Impact

De samenwerking en het wederzijdse vertrouwen tijdens het onderzoek heeft bijgedragen aan een constructief strategisch gesprek in de coalitietafel DCC. Een goed voorbeeld is dat andere vormen van contracteren van kustonderhoud, met als doel meerdere strategische doelen tegelijk te bedienen, nu goed bespreekbaar zijn. Verkenningen over de mogelijkheden tot vervolg op dit project zijn deel van de impact, zie verder hoofdstuk 5.

3 Resultaten werkpakketten

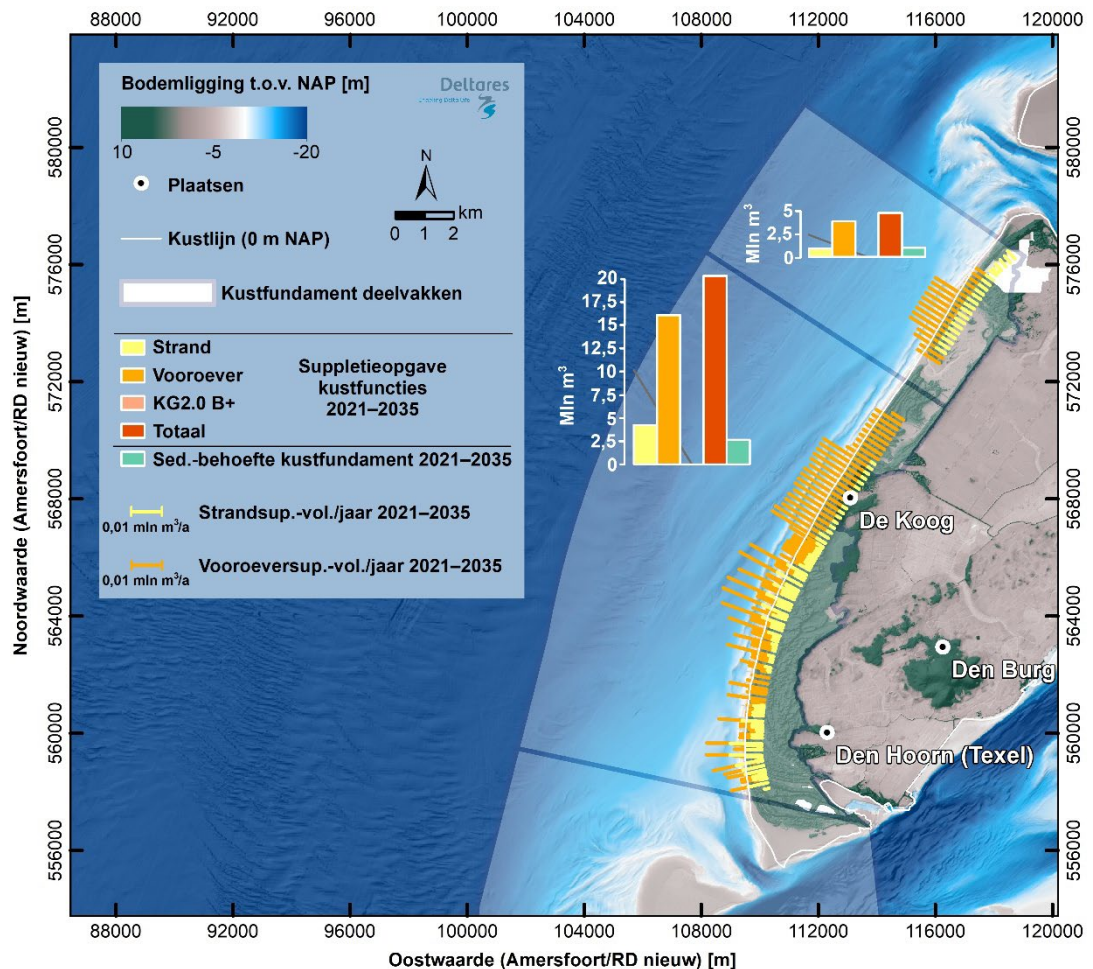
Dit hoofdstuk vat de resultaten samen van het onderzoek van de werkpakketten 1 t/m 4. De resultaten van werkpakket 5 zijn onderdeel van de synthese (Hoofdstuk 4). Toelichting op de methode en de resultaten is gerapporteerd in onderliggende rapportages.

Het hoofdstuk is als volgt opgebouwd:

1. De systeemkennis van het kustvak IJmuiden-Texel	WP 1
2. De morfologische respons van suppletievarianten 3. Ecologische respons van suppletievarianten	WP 2
4. Impact van uitvoeringsmethoden op milieu en kosten 5. De vergunbaarheid van alternatieven	WP 3
6. Marktbenadering en contractstrategieën	WP 4
7. De toepasbaarheid van de bouwstenen in Nederland	WP 1

3.1 Systeemkennis kustvak IJmuiden-Texel en suppletieopgave tot 2035

De kustvakken tussen IJmuiden en Texel (zie Figuur 1-1) zijn geselecteerd om in een concrete casestudie alternatieve wijzen van kustonderhoud tot 2035 te onderzoeken. Hiervoor is de kennis van het gedrag van deze kustvakken nodig. Ook is inzicht nodig in de suppletieopgave in dit gebied voor de komende ca. 15 jaar. Hierover is gerapporteerd in Röbbke et al. (2021). Figuur 3-1, afkomstig uit die rapportage, toont het onderzoeksgebied. De projectie van de suppletieopgave tot 2035 is berekend als totaal volume en in aandeel strand- en vooroeversuppleties (zie hieronder voor de samengevatte resultaten). Ze zijn voorzien van een inschatting van de kosten, emissies en milieukosten. Dit is de referentie (of benchmark) voor de beoordeling van alternatieven (“de bouwstenen voor duurzaam en opschaalbaar kustonderhoud”) die in andere werkpakketten zijn uitgewerkt.



Figuur 3-1: Overzichtskaarten van het projectgebied. Boven het kustvak Noord-Holland, onder het kustvak Texel. Opgenomen zijn grenzen van deelvakken die bij de analyses zijn gehanteerd en de toekomstprojectie van de gemiddelde strand- (geel) en vooroeversuppletievolumes (oranje) per JarKus-raai per jaar voor de periode 2021–2035. KG2.0 B+ (roze) staat voor het scenario waarin extra suppletiebehoefte is langs de Noordzeekust van het Waddengebied (zie Rijkswaterstaat 2020). Figuur komt uit rapportage werkpakket 1 (Röbke et al., 2021).

Systeembeschrijving

De kust tussen IJmuiden en Texel (het projectgebied) loopt vanaf de noordelijke havendam bij IJmuiden via een relatief rechte kustlijn langs Noord-Holland tot Den Helder en omvat ook het Zeegat van Texel en de kust van Texel tot aan de Eierlandse dam. Dit gebied bevat diverse morfologische kenmerken die ook elders langs de Nederlandse kust terug te vinden zijn. De kust van Noord-Holland tussen IJmuiden en Den Helder is ca. 55 km lang. Er liggen bredere duingebieden in de zuidelijke delen. In het noorden zijn de duingebieden smaller of ontbreken ze. Er zijn zeeweringen aangelegd bij Den Helder. De Hondsbossche en Pettemer Zeewering is in 2015 versterkt met 30 miljoen kubieke meter zand en daarna hernoemd tot Hondsbossche Duinen (de kuststrook ten zuiden van Petten in Figuur 3-1). Als onderdeel van de opdracht voor versterking is ook meerjarig onderhoud uitbesteed aan de aannemende partij. Voor de andere kustvakken is, net als in de rest van Nederland, Rijkswaterstaat verantwoordelijk voor het handhaven van de kustlijn.

De kust van Texel is ca. 27 km lang en kent overwegend brede duingebieden. De kustlijn wordt onderbroken bij 'de Slufter'. Hier ligt een opening in de zeereep dat een achterliggend intergetijdengebied met de zee verbindt. Het huidige beleid is voorkomen van afsluiting van de Slufter door menselijk toedoen. De Noordzeekust van Texel kent structurele erosie en er wordt gesuppleerd. Het zuidelijk deel van de eilandkust wordt sterk beïnvloed door de buitendelta van het Zeegat van Texel. In recente jaren zorgt de geul 'het Molengat' voor extra erosie.

Texel en Noord-Holland worden gescheiden door het Zeegat van Texel. In de bijbehorende buitendelta liggen grote hoeveelheden sediment opgeslagen. De rol van deze buffer en het eventuele onderhoud hiervan was geen onderdeel van dit project.

Projectie suppletieopgave tot 2035

Bij toekomstprojecties is onderscheid te maken tussen sedimentbehoefte en suppletiebehoefte (opgave), zie Rijkswaterstaat (2020). De sedimentbehoefte wordt berekend via een rekenregel gebaseerd op aannamen van lange termijn morfologisch evenwicht. De berekening daarvan in Rijkswaterstaat (2020) is recent aangescherpt met het oog op het bepalen van sedimentbehoefte onder snellere zeespiegelstijging (Taal et al., in prep.). Voor de periode tot en met 2035 geven de oorspronkelijke en de aangepaste rekenregel vergelijkbare resultaten.

De suppletiebehoefte (opgave) is het zandvolume dat nodig is om de kustlijn te handhaven (met als referentie de BasisKusLijn, verder BKL genoemd). Deze is in Rijkswaterstaat (2020) bepaald door de suppleties in de afgelopen 12 jaar te analyseren en aan te nemen dat dit de beste voorspelling is voor wat (gemiddeld per jaar) in de komende 10-15 jaar nodig is. Uit die berekening volgde dat voor de Hollandse kust de suppletiebehoefte groter is dan de sedimentbehoefte. Voor andere delen van de Nederlandse kust (Wadden, Zuidwestelijke delta) lag dit juist andersom. De verwachting is dat deze situatie niet verandert tot 2035.

De suppletieopgave voor het projectgebied is, net als in Rijkswaterstaat (2020), geschat via extrapolatie van historische trends. Het resultaat is een suppletieopgave voor de periode 2021–2035 van 45±3 mln. m³ voor het kustvak Noord-Holland en van 25±3 mln. m³ voor Texel, zie Tabel 3-1. De suppletieopgave is voor beide gebieden grotendeels in de vorm van vooroeversuppleties: 76 % voor Noord-Holland en 80% voor Texel. De grootste suppletieopgave is er bij Egmond, Bergen, Callantsoog, Julianadorp – Den Helder en het grootste deel van de Noordzeekust van Texel (afgezien van de omgeving van De Slufter en net ten zuiden van de Eierlandse Dam). De projecties op deelvak- en kustlijnniveau zijn terug te vinden in het rapport van werkpakket 1 (Röbke et al., 2021)³.

Tabel 3-1: Geschatte suppletieopgave en (milieu)kosten voor het voortzetten van de huidige wijze voor het kustonderhoud van 2021-2035 (volgens Röbke et al., 2021). KG2-B staat voor variant B uit Kustgenese 2.0⁴ (Rijkswaterstaat, 2020)

Suppletiebehoefte 2021-2035	Kustvak Noord-Holland		Kustvak Texel			Totaal
	Strand	Vooroever	Strand	Vooroever	extra (KG2.0-B ⁴)	
Volumes (mln. m³)	10,7±1,3	34,4±2,9	5,1±1,4	20,2±2,7	(2,7)	70 (73)
Kosten (mln. €)	59	120	28	71	(9)	278 (287)
CO₂-uitstoot (kTon)	51	103	25	61	(8)	240 (248)
Milieukostenindicator (mln. S€)	9	25	4	15	(2)	54 (56)

Schatting kosten, CO₂-emissies en milieukosten bij huidige werkwijze

De huidige werkwijze is de inzet van (overwegend) sleepopperzuigers die zijn aangedreven door diesel voor het winnen, transporteren en aanbrenge van suppletiezand. Voor de schattingen die in Tabel 3-1 staan is uitgegaan van kentallen cf. Rijkswaterstaat (2020). Strandsuppleties zijn duurder dan vooroeversuppleties: €5,50 om €3,50 per m³ incl. BTW. De prijzen zijn afhankelijk van brandstofprijzen, inflatie en de omvang van een opdracht. Gegeven de stijging van de energieprijzen in 2022 zijn de uitkomsten in Tabel 3-1 waarschijnlijk te laag.

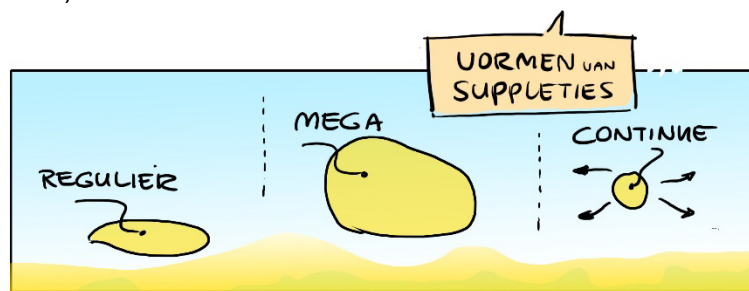
³ Het rapport berekende ook sedimentbehoefte volgens de methodiek van Rijkswaterstaat (2020). Voor de periode 2021–2035 was dit ongeveer 39 mln. m³ voor het kustvak Noord-Holland en 8 mln. m³ voor het kustvak Texel. Het grootste deel (60 %) daarvan hangt samen met zandtransport naar het bekken van het Zeegat van Texel.

⁴ In Kustgenese 2.0 is geopperd dat, naast het voortzetten van de huidige praktijk, het waarschijnlijk nodig is langs de Noordzeekust van het Waddengebied aanvullend te suppleren om in de sedimentbehoefte van de regio te blijven voorzien. Dit is uitgewerkt als 'Variant B' in (Rijkswaterstaat 2020).

Voor de CO₂-emissies is uitgegaan van 4,8 kg CO₂ per m³ voor strandsuppleties en 3,0 kg CO₂ per m³ voor vooroeversuppleties. Om een waarde voor milieubelasting te hebben die meer aspecten omvat, is de MilieuKostenIndicator (MKI) ontwikkeld die de belasting uitdrukt in schaduwkosten. Kentallen voor de MKI zijn overgenomen uit werkpakket 3 (Vereniging van Waterbouwers, 2023). Dit komt neer op 0,84 MKI/m³ voor strandsuppleties en 0,74 MKI/m³ voor vooroeversuppleties, uitgaande van 100 % MDO (Marine Diesel Oil) en een CO₂-equivalent waarde van 103 €/ton.

3.2 Morfologische respons van suppletieconcepten

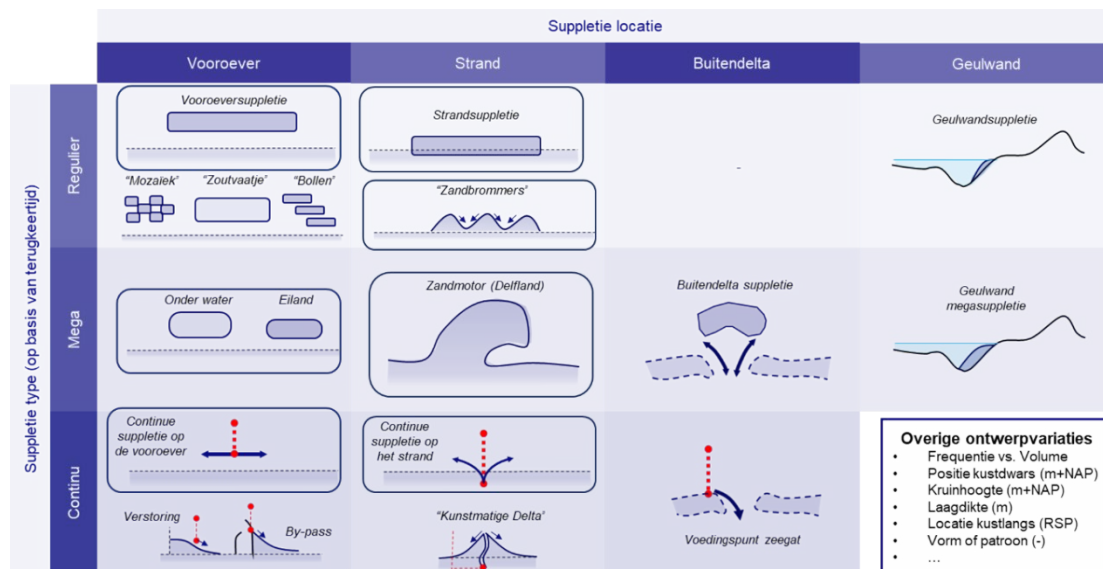
Werkpakket 2 onderzocht de bouwsteen “suppletieconcepten”. Het gebruik van suppleties om de kust te onderhouden komt voort uit de Nederlandse voorkeursstrategie “zacht waar het kan, hard waar het moet” (voor meer uitleg zie b.v. Rijkswaterstaat, 2020). In dit project bedoelen we met suppletieconcepten het ontwerp van de suppletie, ofwel het volume, de plek op de vooroever of het strand en de vorm. Het ontwikkelen van een model waarin de morfologische effecten van suppletieconcepten kunnen worden geanalyseerd, was een belangrijk onderdeel van het werkpakket. Hiervoor is een numeriek model opgezet met de nieuwste simulatiesoftware (Delft3D Flexible Mesh). Meer informatie over de stappen die zijn gezet in de modelontwikkeling zijn toegelicht in Bijlage C. Daarnaast zijn de methode en resultaten van werkpakket 2 gepubliceerd in een vijftal memo's (Technische Universiteit Delft, 2023a t/m 2023e).



Typen suppletieconcepten

In het onderzoek zijn diverse suppletieconcepten onderzocht die horen bij drie groepen: reguliere suppleties, megasuppleties en continue suppleties die op de vooroever en/of op het strand kunnen worden aangelegd (Figuur 3-2). Deze concepten zijn geïdentificeerd en geclassificeerd op basis van literatuurstudie, praktijkervaringen uit het verleden en brainstormsessies. In de tweede fase is voor verdiepend modelmatig onderzoek een selectie gemaakt uit de groep suppletieconcepten: twee typen reguliere suppleties (vooroever- en strandsuppleties), drie typen megasuppleties (onderwater megasuppletie, eiland en schiereiland) en één type continue suppletie (onderwater), weergegeven als de omrande concepten in Figuur 3-2.

Er is sprake van ‘*reguliere onderhoudssuppleties*’ als ze passen binnen de huidige wijze van handhaving van de kustlijn gegeven de BKL. Ze hebben een volume van 0,1-5 mln. m³ en een terugkeertijd van 1-10 jaar. Met ‘*megasuppleties*’ wordt bedoeld op ingrepen met een groter volume, gericht op meer dan alleen handhaving van de kustlijn in de komende jaren. Ze hebben een terugkeertijd van orde 20-30 jaar. Nieuw is het concept van de ‘*continue suppletie*’. Die vindt plaats op één punt, met een (semi)continue voeding van de kust. De suppletie is beperkt in volume per tijdseenheid, maar de hoeveelheid suppletiezand heeft over een langere periode ongeveer dezelfde omvang als reguliere suppleties of megasuppleties (afhankelijk van het ontwerp). Dit concept heeft gelijkenis met zogenaamde bypass systemen die in het buitenland worden toegepast.



Figuur 3-2: Schematische bovenaanzichten van verschillende suppletieconcepten uit het onderzoek. De concepten die zijn geselecteerd met een blauwe omlijn zijn modelmatig onderzocht. De stippellijn representeert de waterlijn. De indeling van de concepten is gebaseerd op de drie suppletietypen (regulier, mega en continu) en de locatie in het dwarsprofiel (vooroever, strand, buitendelta of geulwand). NB: Buitendelta en geulwand zijn niet van toepassing in dit rapport. (Technische Universiteit Delft, 2023a).

Resultaten voorspelkracht numeriek model

Om de morfologische en ecologische respons van verschillende suppletieconcepten in beeld te brengen is onder andere een numeriek model (Delft3D Flexible Mesh) gebruikt. De voorspelkracht van dit model is geanalyseerd met behulp van meetgegevens van de Zandmotor. Het is bekend dat de numerieke voorspelkracht van kleinschalige suppleties met de huidige numerieke modellen beperkt is. De voorspelkracht is daarom geëvalueerd aan de hand van een extreem geval, een megasuppletie. Er is gefocust op de kustlangse herverdeling van zand. Kleinschalige suppleties of autonome ontwikkeling zijn niet meegenomen. De resultaten laten zien dat de gekozen modelopzet goed in staat is om de herverdeling van het sediment in langsricting na te bootsen. Voor de geteste grootschalige suppletie is ook de achteruitgang van de kustlijn goed te reproduceren. De kustdwarse (her)verdeling van zand is echter wel een gevoelig punt in deze modellen. Dat maakt dat voor sommige situaties (bijvoorbeeld kleinschalige vooroeversuppleties in een kustvak met veel zandbanken) de voorspelkracht nog niet voldoende is voor een goede afweging. Verdere toelichting over de voorspelkracht wordt gegeven in Bijlage C en Technische Universiteit Delft (2023c).

Resultaten berekening morfologische respons

Voor de verdiepende fase zijn verschillende modelsimulaties uitgevoerd, variërend van kleinschalige strandsuppleties tot grootschalige megasuppleties (zie Technische Universiteit Delft, 2023e). De belangrijkste bevindingen volgen uit twee sets simulaties (Tabel 3-2). De eerste set is gemaakt binnen een strategie conform de huidige onderhoudsbehoefte (0,5 mln. m³ in 4 jaar). Die wordt ofwel door een reguliere strategie in één jaar aangebracht (op het strand of onder water, in twee varianten), via een zandbrommer-strandsuppletie⁵ ofwel door een continue suppletie. De volumes zijn gebaseerd op de suppletiebehoefte van het deelvak waar Bergen en Egmond in liggen (Deelvak 2, zie paragraaf 3.1). De tweede set is gemaakt voor een strategie waarbij méér dan de suppletiebehoefte wordt aangebracht, hetzij door een megasuppletie (in drie varianten), hetzij door een continue suppletie geïnspireerd door het Cablehopper concept. Het gaat om veel meer zand dan in set 1: 7,5 mln. m³ in 10 jaar. Er zijn uiteraard talloze andere varianten denkbaar op basis van de exacte locatie in het dwarsprofiel, de aanleghoogte, de laagdikte en het aangebrachte patroon.

⁵ Zandbrommers zijn een concept waarbij meerdere geconcentreerde strandsuppleties lokaal naast elkaar op het strand worden uitgevoerd. Zo worden kleine zandige "strandhoofden" aangelegd op een vooraf bepaalde afstand van elkaar.

Het hoofddoel van de modelstudie was ‘verkrijgen van inzicht in de impact van verschillende type suppleties’ (en niet ontwerpen of optimaliseren van een oplossing). Met dit doel zijn de onderzochte sets uitgewerkt.

Alle varianten zijn op dezelfde locatie rondom Egmond-Bergen gemodelleerd, zodat een goede onderlinge vergelijking mogelijk is. Het doel was niet te bepalen welke variant zinvoller is gegeven de actuele of toekomstige opgave op deze locatie. De aanname is dat, door de lokale suppletiebehoefte als uitgangspunt te nemen, er voldoende aan de beleidsdoelstelling ‘handhaving kustfundament’ zal worden tegemoet gekomen. Dit betekent niet automatisch dat ze even goed bijdragen aan de handhaving van de kustlijn. De resultaten geven een indruk hoe de werkwijze invloed heeft op het onderhoud van de kustlijn. De uitgebreide analyse staat in Technische Universiteit Delft (2023e). De analyse richt zich op de vergelijking tussen de varianten *binnen* de sets.⁶

Tabel 3-2 Suppletieconcepten waarvan de morfologische respons is onderzocht met het model. Per concept is het suppletievolume weergegeven. De reguliere suppleties zijn gesimuleerd voor 4 jaar, de megasuppleties voor 10 jaar. Aan beide simulatiesets zijn ook continue suppletieconcepten toegevoegd.

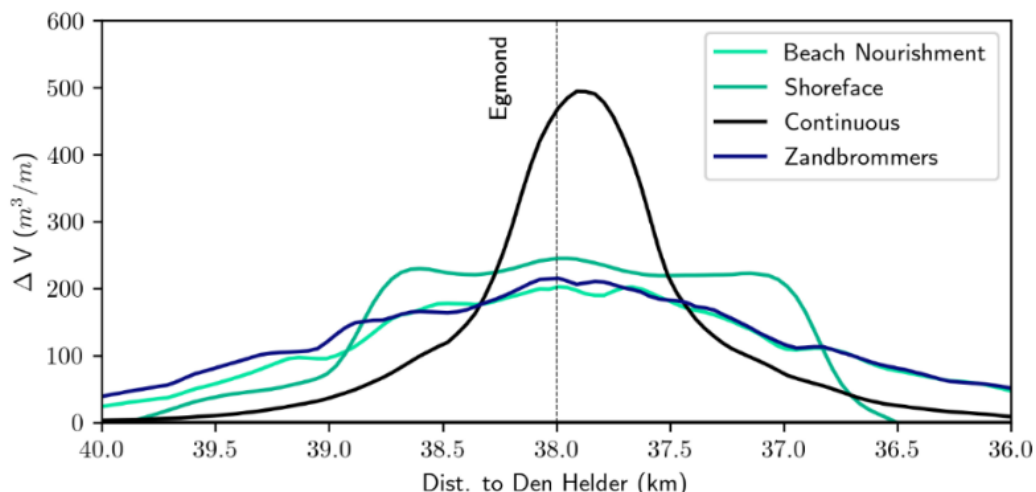
Reguliere suppleties (4 jaar simulatie)	Megasuppleties (10 jaar simulatie)
Strandsuppletie van 0,5 mln. m ³	Schiereiland aan de kust van 7,5 mln. m ³
Vooroever-suppletie 0,5 mln. m ³	Eiland voor de kust van 7,5 mln. m ³
Zandbrommers 0,5 mln. m ³	Onderwater megasuppletie van 7,5 mln. m ³
Continue strandsuppletie van 0,125 mln. m ³ /jaar	Continue vooroever-suppletie van 0,75 mln. m ³ /jaar

Reguliere suppleties en een continue suppletie op het strand

Reguliere suppleties maken lokaal maatwerk mogelijk, omdat suppletievolume, locatie (kustlangs en kustdwars) en tijdstip van aanbrengen vrij precies afgestemd kunnen worden op de lokale behoefte. Hiermee is veel ervaring in de planning van de Nederlandse kustlijn zorg en er zijn veel morfologische evaluaties uitgevoerd⁷. De berekeningen bevestigen dat suppleties op het strand direct bijdragen aan kustlijnonderhoud (gedefinieerd als voldoen aan de BKL), want al het zand wordt direct in de BKL-zone aangebracht. Het zand dat bij vooroever-suppleties wordt aangebracht heeft tijd nodig om in die zone terecht te komen. Een problematische BKL-overschrijding kan ze niet direct voorkomen. De huidige werkwijze van kustlijn zorg is op deze vertraagde reactie ingespeeld en maakt het mogelijk zo veel als mogelijk onder water te suppleren. Die vragen immers minder brandstof, wat minder kosten en minder milieu-impact per gesuppleerde m³ inhoudt. Het zand van deze suppleties verspreidt zich sterk kustlangs, met uitzondering van de continue suppletie (Figuur 3-3). Een continue suppletie met een lozingspunt op het strand, zoals hier getest, creëert een sterke kustlijn kromming, maar reikt in de simulatie na 4 jaar niet veel verder dan 4 km van het lozingspunt. Dit onderstreept dat er lokaal versterking kan worden uitgevoerd met deze methode, maar dat voor grotere kustlangse gebieden met een sedimentvraag wellicht naar andere alternatieven gekeken moet worden of naar meerdere, kleine continue suppleties op korte afstand van elkaar).

⁶ De varianten *tussen* de sets zijn op de getoetste indicatoren (kustlangs verspreiding, ecotopen, bedelving en brede welvaart) **niet** vergelijkbaar vanwege verschillen in de aangebrachte suppletievolumes, de simulatietijd en de modelinstellingen (zie Technische Universiteit Delft, 2023e). De bespreking gebeurt per type suppletie, is geïllustreerd met Figuur 3-3 en Figuur 3-4 en gebaseerd op Technische Universiteit Delft (2023e).

⁷ Deze kennis wordt ontwikkeld en ontsloten via het programma Beheer en Onderhoud Kust (BenO Kust). De rapporten hierover zijn te vinden op <https://publicwiki.deltares.nl/display/BOK/III.+Producten+-+Morfologie+kust>



Figuur 3-3: Kustlangse verspreiding suppletievolume (in m^3/m) voor 4 kleinschalige suppletievarianten in set 1 na 4 jaar. De zwarte lijn toont het resultaat van een continue suppletie met een uitmonding op het strand.

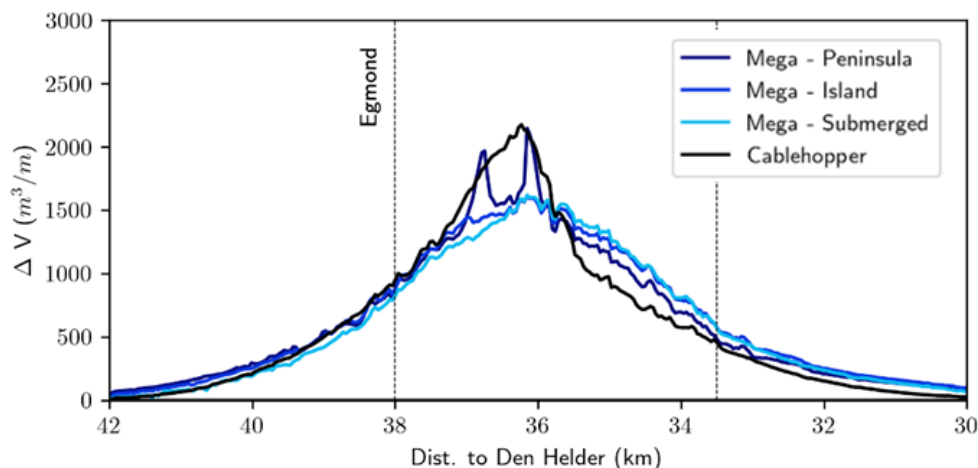
Megasuppleties en een continue suppletie op de vooroever

Met megasuppleties is beperkte ervaring langs de Nederlandse kust. De Zandmotor in Delfland (aangelegd als strandsuppletie/schiereiland) is het meest bekend. Uit de modelsimulaties blijkt dat, bij een ontwerplevensduur van 10 jaar, de voeding van de omliggende kust op lange termijn vergelijkbaar is voor alle drie de varianten van een megasuppletie op de ondiepe vooroever of strand (Figuur 3-4). Voorwaarde is dat de suppletie in de actieve zone (niet dieper dan ca. 8 à 10 meter) is aangebracht. De drie varianten onderscheiden zich daarnaast in 'hoe de kustlijnontwikkeling verloopt' (bijv. hoe de breedte van het strand zich over de tijd ontwikkelt). Ook bij megasuppleties geldt dat suppleren op het strand sneller bijdraagt aan handhaving van de kustlijn. Dit zal in de praktijk geen belangrijk argument zijn, omdat megasuppleties worden aangelegd vanwege hun langetermijneffect, al dan niet in combinatie (zoals bij de zandmotor bij Delfland) het doel om een concreet nieuw (maar wel tijdelijk) landschap te maken.

Aangezien de kustlangsverspreiding van megasuppleties langzaam is, zal er ter plekke gedurende lange tijd sprake zijn van (tijdelijke) uitbouw van de kust. Zowel in de simulaties als in de praktijk van de Zandmotor is te zien dat de suppletie in de eerste tien jaar na aanleg nog niet volledig is verspreid. Om een groter deel van de kust te voeden met zandmotoren zullen deze megasuppleties dus op meerdere verspreidingslocaties en met een bepaalde frequentie en bijbehorend volume in de tijd moeten worden uitgevoerd. Dit zal ongetwijfeld gepaard blijven gaan met lokale uitbouw⁸. Deze uitbouw is zinvol als er tegelijkertijd een bijdrage aan kustfuncties plaatsvindt waaraan ter plekke een duidelijke behoefte is.

De modelsimulaties laten zien dat de uiteindelijke kustlangse verdeling van de continue Cablehopper suppletie vergelijkbaar is met dat van de andere drie megasuppleties (Figuur 3-4, zwarte lijn). Het grootste deel van het materiaal 'hoopt zich echter op' bij de locatie van verspreiden als dit lozingspunt op dieper water is geplaatst. Zonder aanvullende maatregelen zal dit op termijn een knelpunt vormen voor de aanvoer van zand, zowel via een Cablehopper (beperkte diepgang) als een pijplijn (opstopping).

⁸ Het huidige kustonderhoud langs de Hollandse kust is ook gepaard gegaan met uitbouw. Dit is gerelateerd aan de ligging van de BKL bij de kustplaatsen, waar vrijwel al het onderhoud plaatsvindt. Vanaf die plekken verspreidt het zand zich naar het noorden en zuiden en er is goed te zien dat de duingebieden daar zeewaarts zijn uitgebreid (b.v. van IJzendoorn et al, 2021).



Figuur 3-4: Kustlangse verspreiding suppletievolume (in m^3/m) voor 4 grootschalige varianten na 10 jaar. De zwarte lijn toont de resultaten van een continue suppletie op de vooroever, vergelijkbaar met het Cablehopper concept.

Opschaalbaarheid

Met zowel de reguliere vooroever-suppleties als de verschillende vormen van megasuppleties is het mogelijk om grotere volumes zand aan te brengen. Echter, de natuurlijke verspreidingsnelheid van het zand is een beperkende factor voor deze concepten die afhankelijk zijn van natuurlijke processen om het zand op locatie te brengen. Ter illustratie, de gesimuleerde megasuppleties (eiland, schiereiland en onderwater megasuppletie) en continue suppleties laten een significante aanzanding zien in ca. 5 km rondom het aanleg gebied in 10 jaar. Daarmee kan het onvoldoende zijn om aan de suppletiebehoefte te voldoen van een langere kuststrook. Door de beperkte invloedzone en transportcapaciteit zijn individuele continue suppleties niet goed opschaalbaar. Bij grotere volumes zal de Cablehopper bovendien beperkingen hebben in de uitvoering van continue suppleties, vanwege de diepgang die nodig is.

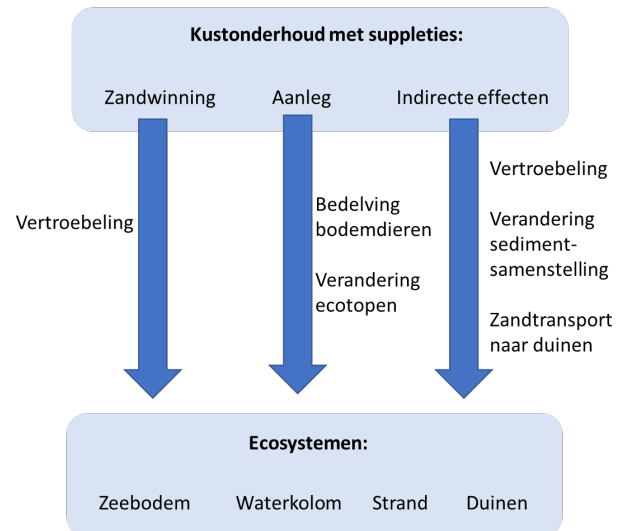
3.3 Ecologische respons van suppletieconcepten

De ecologische waarde van de Nederlandse kust is afhankelijk van de toestand en ontwikkeling van de zeebodem, de waterkolom, het strand en de duinen. Hieronder volgt een verslag van onderzoek naar de ecologische effecten van suppleties daarop. Hierbij zijn inzichten meegenomen uit het onderzoeksprogramma Natuurlijk Veilig (Herman et al., 2022, IJff et al., 2019, Groen et al., 2019), van de Zandmotor (Huisman et al., 2021) en uit een innovatieve kustlijn-zorg (IKZ) memo over de omgevingswaarde (Taal, 2018). De nadruk ligt op instrumenten om een evaluatie te kunnen doen van bedelving van bodemdiergemeenschappen. In deze paragraaf worden verschillen tussen suppletieconcepten onderzocht. De ecologische effecten van uitvoeringsmethoden komen aan de orde in paragraaf 3.4 (uitstoot stikstof als onderdeel van milieu-impact) en 3.5 (ecologische verstoring als onderdeel van vergunbaarheid).

Een belangrijk hulpmiddel is de indeling van het gebied in ecotopen. Die onderscheiden zich van elkaar door sedimentsamenstelling, diepte en stroomsnelheid. Suppleties beïnvloeden de omvang en kwaliteit van ecotopen, tijdens de zandwinning en de aanleg, maar ook daarna (Figuur 3-5). Deze directe en indirecte effecten zijn beoordeeld op omvang, ernst en het belang van de natuurwaarde die wordt aangetast. Er is gezocht naar een indicator die de verandering in ecotopen als gevolg van suppleties goed representeert. De omvang van bedelving, de dikte van de laag en de frequentie zijn de sturende factoren. De ecotopen in het studiegebied zijn gekarteerd en daarna zijn inschattingen gedaan aangaande de effecten door bedelving.

Bepalen van ecologische effecten:

- Directe effecten vs indirecte effecten
- Omvang gebied vs heftigheid effect
- Natuurwaarde van het gebied



Figuur 3-5: Overzicht van elementen die bijdragen aan ecologische effecten van suppleties.

Naast bedelving zijn er significante indirecte effecten van suppleties. De eerste, vanwege de uitstraling op de omgeving, is vertroebeling. Dit is vooral belangrijk in het gebied van de zandwinning. Op de vooroever, waar onderwatersuppleties worden geplaatst, is dit veel minder belangrijk. Deze zone is al troebel vanwege de krachtige golven en stromingen. Een tweede significant indirect effect is de invloed op het transport van zand naar de duinen. Dit transport wordt mede bepaald door de strandbreedte en stuurt mede de veranderingen in volume en dynamiek van de duinen.

Effecten tijdens de zandwinning

Het onderzoek in dit project vergelijkt suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden en vergelijkt geen locaties en/of methoden van zandwinning. Meer algemeen geldt dat oppervlakte en kwetsbaarheid van het gebied waar gewonnen wordt de impact van een zandwinning bepalen (Taal, 2018). Ecologische effecten van zandwinning spelen een rol bij alle vormen van suppleties. Hiervoor zijn diverse milieueffectrapportages (MER) opgesteld (Arcadis, 2017). Kwetsbaarheid speelt al een rol bij aanwijzing van zandwingebieden. Het profiel na de zandwinning stuurt mede welke natuurwaarden kunnen ontstaan en/of terugkeren. Tijdens de zandwinning zijn er ook ecologische effecten door uitstralende werking, door vertroebeling en/of geluid. vertroebeling is een sturend onderwerp bij de MER zandwinning. Aan onderwatergeluid wordt wel veel aandacht besteed bij de bouw van windmolenparken, maar beperkt tot niet bij het winnen van zand. De aanname is dat onderwatergeluid door activiteiten voor kustlijn zorg klein is in vergelijking met (meer continue) activiteiten zoals windmolens, scheepvaart als geheel en offshore-parken.

Effecten op de vooroever

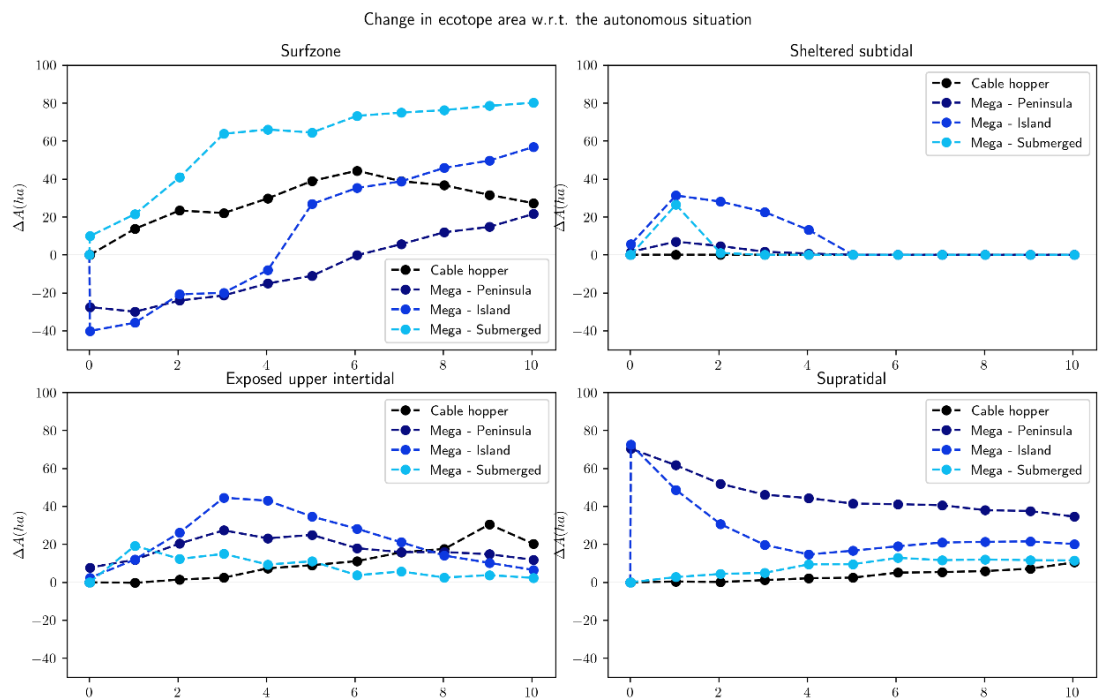
De effecten op de vooroever zijn bedelving door vooroeversuppleties (sterfte van bodemdieren en tijdelijke afname foerageergebied) en de kans op langjarige veranderingen in ecotopen. Het effect van bedelving is beperkt in de tijd omdat de hersteltijd van het leven op de vooroever in de meeste gevallen korter is dan de periode tussen suppleties. Uit het onderzoek Natuurlijk Veilig blijkt dat een half jaar na de suppletie de fauna weer terugkomt (Herman et al., 2022). Dit geldt niet voor diepere locaties. De soorten die daar leven komen langzamer terug. Een grootschalige trendmatige verandering in de sedimentsamenstelling van de vooroever sinds 1990 is niet waargenomen (Herman et al., 2022). Het kan zijn dat bij langere perioden dit effect wel optreedt / zichtbaar wordt als er stelselmatig en langdurig wordt gesuppleerd met grover zand. Een verandering in soortensamenstelling van het bodemleven is dan mogelijk.

Om de effecten door verandering in ecotopen kwantificeren wordt in dit project gebruik gemaakt van negen ecotopen, ingedeeld op diepte en bodemschuifspanning (Tabel 3-3). Met de methode van Van Zanten (2016) is berekend hoe het oppervlak van de ecotopen verandert bij de aanleg van verschillende suppletieconcepten.

Megasuppleties hebben de grootste impact op het oppervlak van de ecotopen (Figuur 3-6). Al bij de aanleg is er een grote verandering, en gedurende de ontwikkeling van de suppletie veranderen de oppervlakten van ecotopen mee. Vooral het oppervlak aan hoger gelegen ecotopen neemt toe. Uit de resultaten blijkt dat beschutte subtidale ecotopen (zoals de lagune op de Zandmotor) alleen voorkomen bij megasuppleties met een beschutte zone, en ze bestaan ook dan alleen tijdelijk. Oppervlaktes van ecotopen in de brandingszone variëren sterk met het suppletieconcept. Reguliere suppleties (niet getoond hier) hebben weinig impact op de oppervlakten van ecotopen. Er zijn weinig veranderingen in diepte en bodemschuifspanning. Na 4 jaar is de diepte en bodemschuifspanning vergelijkbaar met de situatie vóór de suppletie.

Tabel 3-3: Overzicht van ecotopen en de daarbij horende grenzen van diepte en maximale bodemschuifspanning (door stroming en golven).

	Ecotopen	Diepte (h) (m NAP)	Bodemschuifspanning (T) (N/m ²)
1	Hoog energetische brandingszone	$h \leq -0.95$	$\tau > 4$
2	Laag energetische brandingszone	$h \leq -0.95$	$2 < \tau \leq 4$
3	Vooroever	$h \leq -0.95$	$1.2 < \tau \leq 2$
4	Diepe vooroever	$h \leq -0.95$	$0.3 < \tau \leq 1.2$
5	Luwtezone subtidaal (onder het laagwaterpeil)	$h \leq -0.95$	$\tau < 0.3$
6	Laag intergetijdegebied	$-0.95 < h \leq 0$	$\tau > 0.1$
7	Hoog intergetijde gebied	$0 < h \leq 1.2$	$\tau > 0.1$
8	Luwtezone intergetijde	$-0.95 < h \leq 1.2$	$\tau \leq 0.1$
9	Supratidaal (strand deel boven de hoogwaterlijn)	$h > 1.2$	-

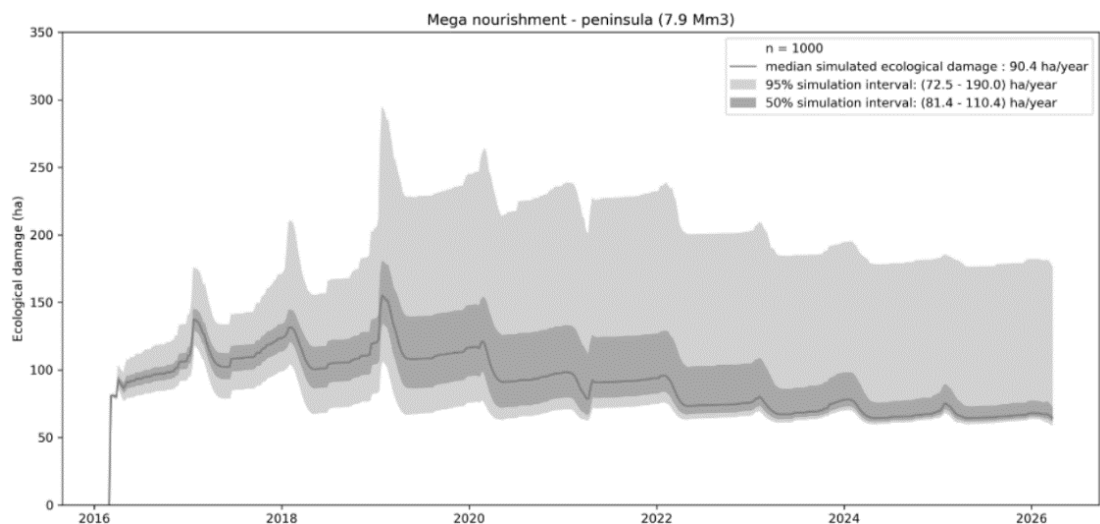


Figuur 3-6: Verandering in oppervlak van vier ecotopen (brandingszone (surfzone), luwtezone subtidaal (sheltered subtidal), hoog intergetijdegebied (exposed upper intertidal) en supratidaal (supratidal)) bij de aanleg van een megasuppletie (kabelhopper, schiereiland, eiland en onderwater megasuppletie). De horizontale as toont de jaren na aanleg.

Naast verandering in ecotopen, is ook de bedelving van bodemdiergemeenschappen door suppleties onderzocht in TKI-DCC. Hiervoor is een bedelvingsequivalent, de 'Bentimeter',

ontwikkeld. Dit is uitgevoerd als MSc afstudeeronderzoek (Gielen, 2023). Zoals hierboven beschreven, leidt bedelving van benthos onderwater of op het strand tot sterfte van deze gemeenschappen. Naast de bedelving door het aanbrengen van de suppletie, worden ook bedelving door de verspreiding van zand gedurende de ontwikkeling van de suppletie en het herstel van de bodemdiergemeenschap meegenomen. Met de Bentimeter wordt het oppervlak met ecologische schade door bedelving (ha) over de tijd berekend (Figuur 3-7). De resultaten van de Bentimeter geven dus alleen informatie over de schade aan van de oorspronkelijke ecotopen door bedelving. Ecologische waarde van nieuwe ecotopen wordt niet gegeven.

Dieper in het kustprofiel is een hogere dichtheid aan benthos en zijn de soorten minder goed aangepast aan verstoring. Daardoor hebben dieper gelegen suppleties een grotere negatieve impact dan suppleties die dicht bij de kust worden aangebracht. De schaal en terugkeertijd van suppleties speelt een rol in de waarde voor schade door bedelving. Voor kleine suppleties is de benthos bijna hersteld na een suppletiecyclus. Op lange termijn kunnen er mogelijk wel negatieve effecten zijn, door verandering van sedimentsamenstelling. Als dit effect er is, is dit pas detecteerbaar op termijn van meerdere decennia (Herman et al. 2022). Megasuppleties hebben een lage frequentie, maar wel een grootschalige bedelving met langere hersteltijd. De ecotopen veranderen dusdanig dat een herstel naar het systeem zoals het er was voor de aanleg van de suppletie niet wordt verwacht (en niet wordt beoogd). Continue suppleties zijn een interessant alternatief vanuit het perspectief van bedelving, dat maar op een klein oppervlak plaatsvindt. Continue suppleties hebben daardoor de laagste waarde voor ecologische schade gedurende de levensduur van de suppletie. De belangrijkste negatieve impact is de indirecte bedelving door zandtransport door golven nabij de suppletielocatie. Veranderingen in diepte zijn meer gradueel, met de verwachting dat soorten daar beter tegen bestand zijn.



Figuur 3-7: Illustratie van het oppervlak met ecologische schade door bedelving (ha) en de verandering over de tijd (jaren). De grijze banden geven de onzekerheidsmarges aan, gerelateerd aan variaties in model input parameters.

Ecologische effecten op het strand en in de duinen

Een strandsuppletie heeft directe effecten. Naast de bedekking van het bodemleven (hoewel minder rijk dan op de vooroever) is er verstoring tijdens het aanbrengen van de suppletie. Er zijn ook indirecte effecten van suppleties op het strand en duin. Op langere termijn zorgen suppleties voor (tijdelijk) bredere stranden en aanbod van zand richting de duinen, in ieder geval voor de zeereep. Of er ook effecten achter de zeereep zijn is grotendeels afhankelijk van het duinbeheer (IJff et al., 2019, Groen et al., 2019). Op plaatsen waar regelmatig strandsuppleties zijn, wordt het bestaande profiel geforceerd in stand gehouden. Dit is goed te zien bij locaties in de Zuidwestelijke Delta, waar afname van de dynamiek is. Waarschijnlijk komt dit doordat vers suppletiezand zorgt voor dichtgroeiën met helmgras.

Er is een proef gedaan met uitstel van suppleties en toestaan van enige afslag om tot meer duindynamiek te komen bij de Kop van Schouwen.

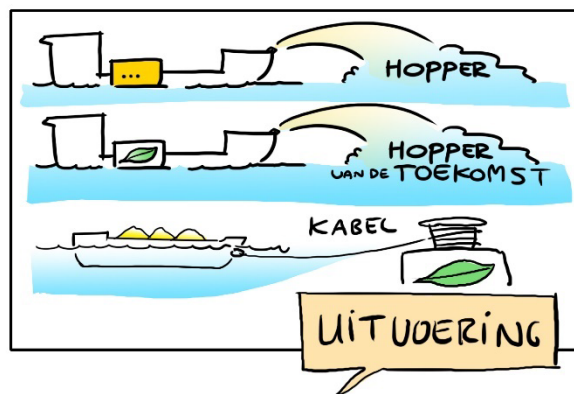
Bij de Zandmotor en de Hondsbossche Duinen zijn mega suppleties gedaan die nieuw droog areaal opleverden. In die gevallen worden nieuwe habitats gecreëerd ten koste van de bedelving van de bestaande ecotopen. De omvang van de ingreep betekent automatisch een groter effect op bestaande ecotopen en recreatie. De waardering hiervan is afhankelijk van de lokale doelstellingen voor natuur en recreatie, maar er zal altijd maatwerk in het ontwerp van de ingreep zijn om dit te optimaliseren. Onderzoek naar de Zandmotor gaf veel inzicht in de richting en snelheid van de ontwikkeling na een dergelijke grote suppletie (Huisman et al., 2021). In dit geval bleek de groei van de vegetatie (en embryonale duintjes) vertraagd te zijn door berijding met auto's en schoonmaken van het strand. De Zandmotor zorgde voor meer variatie in omgevingscondities, wat leidde tot meer diversiteit in bodemdieren.

Verschillen tussen suppletieconcepten

In het algemeen is bodemleven in ondiep water beter aangepast aan dynamische condities dan soorten op dieper water en herstelt daarom sneller na een suppletie. Hierdoor leiden suppleties op de ondiepe vooroever en op het strand tot minder negatieve impact op de ecologie dan suppleties op de diepe vooroever. Megasuppleties hebben door hun omvang een groter effect dan reguliere suppleties of continue suppleties, in het bijzonder omdat ze ook tot (tijdelijke) ecotopen kunnen leiden. De waardering hiervan is afhankelijk van de lokale doelstellingen voor natuur en recreatie. Maatwerk hiervoor in het ontwerp van de suppletie is goed mogelijk.

3.4 Milieu-impact en kosten van uitvoeringsmethoden

Werkpakket 3 onderzocht de bouwsteen “uitvoeringsmethoden”, oftewel het materieel voor winning, transport en aanbrengen van het suppletiezand. Momenteel zijn sleephopperzuigers die worden aangedreven door diesel (Marine Diesel Oil of MDO) het voornaamste materieel. De onderzochte vragen zijn: (i) Welke duurzamere alternatieven zijn denkbaar voor het huidige materieel? en (ii) Wat zijn de consequenties van deze alternatieven in combinatie met verschillende suppletieconcepten voor de kosten, milieukosten en vergunbaarheid? Paragraaf 3.5 gaat in op de vergunbaarheid van alternatieven. Deze paragraaf geeft de resultaten voor kosten en milieukosten (gebaseerd op Vereniging van Waterbouwers, 2023).



Identificatie en selectie van duurzamere uitvoeringsmethoden gebeurde in twee stappen. Eerst is gekeken naar welke ontwikkelingen er zijn m.b.t. mogelijke uitvoeringsmethoden van suppleties. Deze alternatieven zijn onderling vergeleken op toepasbaarheid c.q. haalbaarheid gezien de kansrijke suppletieconcepten. Dit leidde tot een eerste inschatting van de kosten en milieukosten en de volwassenheid van de technologie (uitgedrukt in Technical Readiness Level, TRL). Als tweede stap zijn voor een selectie van de alternatieve uitvoeringsmethoden de kosten en milieukosten in detail uitgewerkt. Meer details over de uitvoeringsmethoden, de berekeningen en interpretatie van de resultaten staan beschreven in het rapport van Werkpakket 3 (Vereniging van Waterbouwers, 2023).

Vergelijking van alternatieve uitvoeringsmethoden

Uit lopende nieuwe ontwikkelingen zijn alternatieve uitvoeringsmethoden geïdentificeerd. Hierbij is gekeken naar parallelle trajecten, in het bijzonder het Innovatiepartnerschap Innovaties in de Kustlijnzorg (IKZ), het Maritiem Masterplan en de Zero Emission Dredging Hub (ZED Hub). Uit deze initiatieven is een zestal alternatieve uitvoeringsmethoden gedestilleerd:

- 1) sleephopperzuiger op bestaande en nieuwe brandstoffen (o.a. MDO, HVO, LNG),
- 2) “Hopper van de Toekomst” op alternatieve brandstoffen (bijv. waterstof, methanol),
- 3) Zandwindmolen,
- 4) Groene Leiding,
- 5) Cablehopper en
- 6) AUMD 2.0 (een onderwaterdrone).

In Tabel 3-4 is weergegeven voor welke suppletieconcepten de uitvoeringsmethoden toepasbaar zijn. De eerste vergelijking leerde dat AUMD 2.0, groene leiding en zandwindmolen minder kansrijk zijn voor toepassing in kustlijnzorg op de korte termijn. Dit is bepaald op basis van (een combinatie van) drie criteria: mate van toepasbaarheid (laag voor AUMD 2.0), operationele kosten (relatief hoog voor groene leiding en zandwindmolen) en TRL (relatief laag voor al deze drie). Deze alternatieven zouden bij goede doorontwikkeling later alsnog in beeld kunnen komen voor de verduurzaming van het kustonderhoud. Voor dit project blijven ze verder buiten beschouwing.

De “hopperoplossingen” (alternatief 1 en 2 hierboven) en de Cablehopper zijn verder onderzocht voor het verduurzamen van het kustonderhoud in de komende 15 jaar. De “hopperoplossingen” hebben een relatief hoog TRL (6-9) en het grootste toepassingsbereik. Ze kunnen worden ingezet voor reguliere en megasuppleties (Tabel 3-4) en zouden ook op een persleiding kunnen worden aangesloten voor een continue suppletie. De inzet van duurzamere hoppers leidt tot aanzienlijke reductie in de MKI tegen beperkte operationele meerkosten t.o.v. de huidige werkwijze⁹. De Cablehopper is kansrijk als alternatief voor continue suppleties op de vooroever en mogelijk ook reguliere vooroeversuppleties, maar heeft nu nog een lager TRL (4). Bij succesvolle doorontwikkeling leidt de Cablehopper tot aanzienlijke reductie in MKI tegen beperkte operationele meerkosten t.o.v. de huidige werkwijze.

Tabel 3-4: Toepasbaarheid van combinaties van suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden. A = toepasbaar, technisch haalbaar B = beperkt toepasbaar, technisch haalbaar, C = niet toepasbaar, technisch niet haalbaar. Bron: Vereniging van Waterbouwers (2023).

	Suppletie	Uitvoeringsmethode (inzet toepasbaar/haalbaar)						
	Variant	Sleephopper (MDO)	Sleephopper (Bio-brandstof)	Sleephopper (Hopper van de toekomst)	AUMD2.0	Cablehopper	Groene Leiding	Zandwindmolen
Onderhouds-suppletie (reguliere suppletie)	Strand-suppletie	A	A	A	C	C		
	Vooroeversuppletie	A	A	A	B Diepgang	B : Anker verplaatsen		
	Geulwand	A	A	A	C	C		
	Buitendelta	A	A	A	C	C		
Mega-suppletie	Strand (zandmotor)	A	A	A				

⁹ Merk op dat het vraagstuk of het economisch verstandig is voor een marktpartij in een dergelijk schip te investeren hier niet in is betrokken.

	Vooroever (onderwater)	A	A	A				
	Eiland	A	A	A				
	Buitendelta	A	A	A				
	Strand puntsuppletie						A	A
Continue suppletie	Vooroever					A	A	A
	Zeegat						B Navigatie	B Navigatie
	Bypass						A	A

Kosten en milieukosten van kansrijke alternatieven

Voor de uitwerking van de kosten en milieukosten zijn de drie vormen van megasuppleties (schiereiland, eiland en onderwater megasuppletie) berekend en vergeleken met reguliere suppleties. Hierbij is uitgegaan van grote en/of kleine hoppers, met drie verschillende soorten brandstof: een traditionele hopper op MDO, een traditionele hopper op Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) en een nieuwe hopper op duurzame brandstof (een gecombineerde waarde voor waterstof of methanol).

Voor het bepalen van de kosten en de milieu-impact zijn meerdere factoren meegewogen, waaronder de geometrie van het suppletieconcept, de zandwinlocatie, het in te zetten materieel, de productie, het brandstofverbruik en type brandstof en mobilisatie en demobilisatie van het materieel (zie voor toelichting Vereniging van Waterbouwers, 2023). De impact van uitvoeringsmethoden op het milieu is onderzocht met de 'Milieukostenindicator' (MKI). Deze indicator voegt alle milieueffecten samen in één score en drukt deze uit in euro's. Deze schaduwprijs hoeft niet daadwerkelijk te worden betaald, maar is een manier om de negatieve milieu-impact van producten of projecten te kunnen vergelijken en communiceren.

Voor de drie hoppervarianten geldt in het algemeen: hoe duurzamer de energiedrager des de hoger de prijs per m³ en des de lager de milieukosten (Tabel 3-5 t/m Tabel 3-7). Een duurzame energiedrager als waterstof of methanol kan de MKI per m³ zand met ca. 90% reduceren tegen een meerprijs van ca. 40-50% (excl. ombouw van materieel). HVO, dat deels ook al toepasbaar is in het huidige baggermaterieel, kan de MKI per m³ met ca. 50% reduceren tegen een meerprijs van ca. 40%. Daarnaast variëren kosten en milieukosten met het type suppletie. De relatie is eenvoudig. Vraagt een suppletie meer energie, dan stijgen kosten en milieukosten. De energievraag is het laagst voor zand dat onder water op de vooroever kan worden aangebracht. Naarmate het zand dichterbij de kustlijn of hoger ten opzichte van het wateroppervlak wordt aangebracht, stijgt de energievraag door grotere vaarafstanden en een energie-intensievere wijze van aanbrengen ('rainbowen' of persen in plaats van klappen).

Als we een vergelijking maken tussen reguliere suppleties en megasuppleties, is te zien dat de kosten per kuub suppletiezand voor megasuppleties gemiddeld lager zijn dan voor reguliere suppleties. Dit komt doordat de eenmalige kosten van een reguliere suppletie en een megasuppletie grotendeels gelijk zijn, maar bij een megasuppletie gedeeld worden door een groter volume. Hierdoor zijn de kosten per m³ relatief lager. De MKI-waarden per kuub zand verschillen niet zoveel tussen reguliere suppleties en megasuppleties. De strandsuppletie met kleine hopper heeft vergelijkbare resultaten als de megasuppletie 'schiereiland' en 'eiland' (met kleine hopper). De MKI van een reguliere vooroeversuppletie is vergelijkbaar met de megasuppletie vooroeversuppletie (met kleine hopper). Uitvoering van een megasuppletie met een grote hopper leidt tot iets hogere MKI-waarden dan de uitvoering met de kleine hopper.

Tabel 3-5 MKI waarden (links) en kosten (rechts) van reguliere strand- en vooroeversuppletie, uitgevoerd met een kleine hopper met alternatieve brandstoftypen (MDO, HVO of alternatief).

MKI (€/m ³)	Strand-suppletie	Vooroeversuppletie	Kosten (€/m ³)	Strand-suppletie	Vooroeversuppletie
Brandstoftype	Kleine hopper	Kleine hopper	Brandstoftype	Kleine hopper	Kleine hopper
MDO	0,60	0,50	MDO	4,70	3,40
HVO 100%	0,30	0,25	HVO 100%	6,50	4,70
Alternatieve brandstof	0,06	0,05	Alternatieve brandstof	6,80	5,00

Tabel 3-6 MKI waarden van megasuppleties schiereiland, eiland en vooroever. Uitgevoerd met grote of kleine hopper met alternatieve brandstoftypen (MDO, HVO of alternatief).

MKI (€/m ³)	Megasuppletie schiereiland		Megasuppletie eiland		Megasuppletie vooroever
	Grote hopper	Kleine hopper	Grote hopper	Kleine hopper	Kleine hopper
MDO	0,67	0,60	0,57	0,53	0,44
HVO 100%	0,36	0,33	0,31	0,29	0,24
Alternatieve brandstof	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04

Tabel 3-7 Kosten (€/m³) van megasuppleties schiereiland, eiland en vooroever. Uitgevoerd met grote of kleine hopper met alternatieve brandstoftypen (MDO, HVO of alternatief).

Kosten (€/m ³)	Megasuppletie schiereiland		Megasuppletie eiland		Megasuppletie vooroever
	Grote hopper	Kleine hopper	Grote hopper	Kleine hopper	Kleine hopper
MDO	4,00	4,50	3,75	4,10	3,00
HVO 100%	5,70	6,10	5,30	5,50	4,20
Alternatieve brandstof	6,00	6,50	5,55	5,80	4,50

Gevoeligheidsanalyse

De berekende kosten en milieukosten van de alternatieven zijn afhankelijk van brandstofprijzen, CO₂-prijs en vaarafstanden. De verschillen tussen de alternatieven blijken hier gevoelig voor.

Bij het brandstofprijsspeil van januari 2021 is MDO €1,8 per m³ goedkoper dan waterstof/methanol voor een megasuppletie als schiereiland en €1,3 per m³ voor een onderwater-megasuppletie. Bij het prijspeil van november 2022 is dit verschil respectievelijk €1,0 en €0,75 per m³. Hogere conventionele brandstofprijzen verkleinen dus het gat tussen duurzame en conventionele energiedragers, maar vooralsnog blijven conventionele energiedragers goedkoper. Zo'n effect treedt ook op als (te voorziene schaalvergroting ertoe leidt dat) duurzame brandstoffen goedkoper worden.

De CO₂-prijs is de afgelopen jaren gestegen en gaat naar verwachting de komende jaren verder stijgen. Bij de huidige CO₂-prijs van €103/kg is MDO €1,8 per m³ goedkoper dan waterstof/methanol voor een megasuppletie als schiereiland en €1,3 per m³ voor een megasuppletie onder water. Bij een verdubbeling van de CO₂-prijs is dit verschil respectievelijk €1,5 en €1,0 per m³. Bij een verviervoudiging van de CO₂-prijs is dit respectievelijk €0,8 en €0,6 per m³. Verhoging van de CO₂-prijs verkleint dus het gat tussen duurzame en

conventionele energiedragers, maar zelfs bij een verviervoudiging van de CO₂-prijs blijven conventionele energiedragers goedkoper, aannemende dat de brandstofprijzen (vorige punt) tegelijkertijd niet verandert.

Door de toenemende drukte op de Noordzee en mogelijke opschaling van de benodigde zandvolumes bij versnelde zeespiegelstijging, is het denkbaar dat zandwinning gemiddeld verder uit de kust moet gebeuren. Voor de analyse van de kosten en milieukosten is uitgegaan van een vaarafstand van ca. 10 km tussen het zandwingsgebied en de suppletie locatie. Voor elke kilometer dat een zandwingsgebied verder komt te liggen, liggen de geschatte kosten en milieukosten ca. 2-4% hoger. Grotere vaarafstanden kunnen de inzet van kleiner materieel belemmeren als deze niet meer bij de bodem kunnen komen. Dit kan tevens consequenties hebben voor haalbare suppletieconcepten, omdat groter materieel minder dichtbij de kust kan komen. Hiermee moet bij opschaling van het kustonderhoud rekening worden gehouden.

3.5 Vergunbaarheid van suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden

Er zijn vergunningen nodig voor de kustlijn zorg, waarvan die onder de Wet natuurbescherming (Wnb) de meeste complexiteit met zich meebrengen. Het bevoegd gezag beoordeelt een aanvraag vooral op de directe ecologische gevolgen van een suppletie en op de impact van de uitvoeringsmethode. De huidige werkwijze (reguliere zandsuppleties met conventionele hoppers) is, onder voorwaarden, vrijgesteld van de vergunningsplicht. Voor alternatieve suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden (zoals beschreven in paragraaf 3.2 en 3.4) is een extra toets nodig op de ecologische effecten. Deze paragraaf vat het onderzoek samen naar wat mogelijke ecologische effecten betekenen voor het verkrijgen van een vergunning daarvoor. Het gaat hoofdzakelijk om de vraag: hoe complex is het om de vereiste vergunningen, ontheffingen en toestemmingen te verkrijgen voor de onderzochte alternatieven? Vooralsnog zijn er geen redenen om aan te nemen dat het verkrijgen van een vergunning bij voorbaat uitgesloten is. De details van deze analyse staan in Arcadis (2022).

Wetgevend kader voor vergunningverlening

De Wnb kent een vergunningensysteem voor ingrepen in beschermde gebieden, waaronder Natura-2000 gebieden. Figuur 3-8 geeft een overzicht van de Natura-2000 gebieden in en rond het projectgebied IJmuiden- Texel. Voor deze gebieden zijn er beheerplannen met instandhoudingsdoelstellingen voor de natuur. De plannen omvatten ook een beschrijving van de effecten van activiteiten op de beschermde natuur. Bepaalde activiteiten, waaronder onderhoudssuppleties, zijn opgenomen in het plan en daarmee, onder voorwaarden, vrijgesteld van de vergunningsplicht. Andere suppleties zijn niet in het beheerplan omschreven en behoeven daarom een toets op significante negatieve effecten op de instandhoudingsdoelstellingen. Negatieve effecten zijn leidend bij zo'n toets en eventuele positieve ecologische effecten zijn niet te gebruiken als compensatie. De negatieve effecten kunnen direct zijn, maar ook 'indirect' door activiteiten buiten het gebied (de zogenaamde "externe werking"). Voor suppleties dichtbij of in een Natura-2000 gebied is de kans op negatieve ecologische effecten groter en daarmee wordt het complexer om een vergunning te krijgen.



Figuur 3-8: Natura-2000 gebieden bij de kust van Noord-Holland (bron: Arcadis, 2022).

Ecologische effecten en vergunningsgemak van alternatieven

Voor de ecologische gevolgen en het vergunningsgemak is gekeken naar drie typen suppleties (reguliere suppleties, megasuppleties en continue suppleties) en de zes uitvoeringmethodes als in 3.4 uiteengezet. De resultaten staan in Tabel 3-8, Tabel 3-9 en Tabel 3-10. Hieronder volgen de resultaten, per type suppletie (conform Tabel 3-4):

Reguliere suppleties

De uitvoering van reguliere strand- en onderwatersuppleties voor het onderhoud van de kustlijn is toegestaan, mits wordt voldaan aan de voorwaarden in het beheerplan Noordzeekustzone. Voor het uitvoeren van deze suppleties zijn de conventionele hopper en duurzame hopper geschikt. De onderwaterwaterdrone AUMD 2.0 is enkel geschikt voor vooroeversuppleties. De Cablehopper, toepasbaar bij reguliere vooroeversuppleties, vraagt een extra toets omdat er andere ecologische effecten en beperkingen optreden door de aanwezigheid van kabels en de verankering tussen de zandwin- en de suppletielocatie.

Megasuppleties

Een megasuppletie die buiten het reguliere onderhoud valt is geen onderdeel van het beheerplan. Bij de extra toets zal het ecologische effect van het eenmalig aanbrengen van een grote hoeveelheid zand beoordeeld moeten worden. Tegenover de toename in impact bij de aanleg staat dat het gebied maar één keer verstoord wordt en dan gedurende langere tijd niet (zie Tabel 3-8). Na de aanleg kan het aangetaste habitat herstellen gedurende een lange periode. Ook maakt de aanleg van een megasuppletie (zie de Zandmotor) het mogelijk om (tijdelijk) habitats te creëren. Deze zaken maken het complexer om megasuppleties te vergunnen onder de Wnb, ongeacht de uitvoeringsmethode. Ook vergunningen onder andere wetgeving worden complexer.

Continue suppleties

Ook continue suppleties zijn geen onderdeel van het beheerplan en vragen dus een toets. De duur van de ingreep is bij dit type suppleties langer. Ze zijn onderzocht bij uitvoering op de vooroever met de Zandwindmolen, de Groene leiding en de Cablehopper (zie Tabel 3-4). De ecologische impact door bedekking (habitataantasting) bij continue suppleties treedt op in een relatief klein gebied. Daartegenover staat dat de effecten aanhouden gedurende de hele

periode van uitvoering, zodat ter plekke geen herstel kan optreden. De langdurige impact is een van de factoren waardoor het complexer is om de continue suppleties te vergunnen onder de Wnb. De complexiteit neemt verder toe vanwege de nog onbekende impact van onderhoud van het materieel, de beperkte flexibiliteit in ruimte en tijd en de potentiële gevolgen van calamiteiten door een storm (zie Tabel 3-9 en Tabel 3-10). Ook de langdurige aanwezigheid van de vaste verbinding tussen wingebied en suppletielocatie, met restricties voor medegebruik, maakt de vergunbaarheid complexer.

Tabel 3-8 Duur en schaal per onderhoudsconcept (bron: Arcadis, 2022)

Suppletieconcepten	Verstoringstijd	Oppervlakte bedekking	Terugkeertijd
Reguliere suppleties	Tijdens uitvoeren van suppleties	Oppervlakte tussen andere concepten in	Orde 5 jaar
Megasuppletie	Tijdens uitvoeren van suppleties	Grootste oppervlakte	Orde tiental(len) jaren
Puntsuppletie	Continu	Kleinste oppervlakte	(Semi-)Continu

Tabel 3-9 Verstoringen en stormcondities per uitvoeringsmethode, X betekent aanwezig

Uitvoeringsmethode	Habitat-aantasting	Vertroebeling en sedimentatie	Bovenwater-verstoring	Onderwater-verstoring	Stikstof-depositie	Gevolgen door stormen
Sleephopperzuiger	X	X	X	X	X	
Hopper vd toekomst	X	X	X	X		
Zandwindmolen	X	X	X	X		X
Groene leiding	X	X	X	X		X
Cablehopper	X	X	X	X		X
AUMD 2.0	X	X		X		

Tabel 3-10 Permanente/tijdelijke effecten per uitvoeringsmethode

Uitvoeringsmethode	Habitat-aantasting	Vertroebeling en sedimentatie	Bovenwater-verstoring	Onderwater-verstoring	Stikstof-depositie	Gevolgen door stormen
Sleephopperzuiger	Tijdelijk	Tijdelijk	Tijdelijk	Tijdelijk	Tijdelijk	
Hopper vd toekomst	Tijdelijk	Tijdelijk	Tijdelijk	Tijdelijk		
Zandwindmolen	Permanent	Tijdelijk	Tijdelijk	Permanent		Permanent
Groene leiding	Permanent	Tijdelijk	Tijdelijk	Permanent		Permanent
Cablehopper	Permanent	Tijdelijk	Tijdelijk	Permanent		Permanent
AUMD 2.0	Tijdelijk	Tijdelijk		Tijdelijk		

Verschillen tussen alternatieven

Het is lastig de vergunbaarheid van de combinaties van onderhoudsconcept en uitvoeringsmethode met elkaar te vergelijken. De verschillen ertussen zijn zeer groot. Van geen ervan kan op voorhand worden gesteld dat het onmogelijk is om alle benodigde vergunningen, ontheffingen en toestemmingen te verkrijgen. De vergunbaarheid van reguliere suppleties uitgevoerd met conventionele methoden (sleephopperzuiger), of met innovatieve methoden die daar sterk op lijken (hopper van de toekomst en onderwaterwaterdrone AUMD2.0) wordt als minst complex ingeschat. Het verkrijgen van vergunningen voor een megasuppletie is complexer door de omvang van de ingreep. De continue suppleties hebben extra complexiteit vanwege de nieuwe uitvoeringsmethoden, in het bijzonder de permanente aanwezigheid van materieel tussen zandwinlocatie en het punt waar de suppletie plaatsvindt. Dat geeft niet alleen langduriger ecologische effecten, maar geeft ook beperkingen voor andere activiteiten. Dit heeft gevolgen voor de vergunbaarheid, die daarom, bij continue suppleties met een Cablehopper, zandwindmolen of groene leiding, als meest complex is aangemerkt.

3.6 Marktbenadering en contractstrategieën

Werkpakket 4 onderzocht de bouwsteen “contract- en samenwerkingsvormen”. De centrale vraag was: “hoe kunnen we de transitie naar klimaatneutraal en (op termijn) opschaalbaar kustonderhoud maken en tegelijkertijd een gezonde markt behouden”? Met ‘gezonde markt’ wordt bedoeld dat er voldoende spelers actief zijn voor onderlinge concurrentie. Als werkhypothese is in dit project gehanteerd dat bij ‘tenminste 5 spelers’ er voldoende bedrijven actief zijn voor de kustlijnzorg. De scope van dit werkpakket betreft de hele Nederlandse kustlijnzorg en reikt dan ook verder dan het projectgebied IJmuiden- Texel. Het onderzoek resulteerde in een voorstel voor een marktbenadering en contractstrategie die een ‘gezonde markt’ kan waarborgen tijdens de transitie naar klimaatneutraal kustonderhoud. De resultaten en methoden zijn uitgebreid beschreven in Hombergen & De Koning (2022).

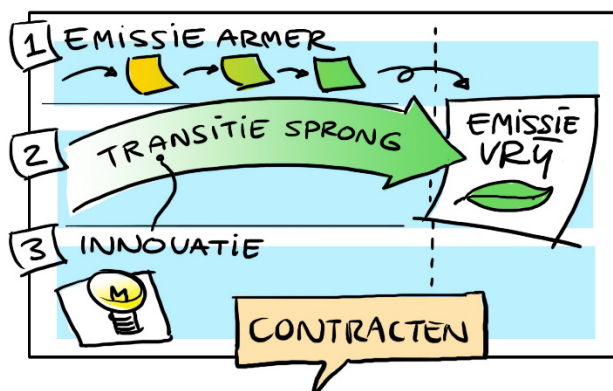
Huidige situatie

De huidige marktbenadering voor kustlijnzorg kent een regie bij het Rijk, met Rijkswaterstaat als uitvoeringsorganisatie. Er komen suppletieopdrachten op de markt voor specifieke kustvakken, voor een afgebakende periode van twee á drie jaar. Het Rijk wijst ook de locaties voor zandwinning aan. De inzet van materieel is de verantwoordelijkheid van de aannemer(s). Gunning van de opdracht vindt doorgaans plaats op basis van criteria voor Beste Prijs Kwaliteit Verhouding (BPKV).

Drie ontwikkelsporen

Voor de transitie naar klimaatneutraal kustonderhoud is een marktbenadering langs 3 sporen uitgewerkt, waarbij binnen ieder spoor concurrentie plaatsvindt. Elk van de sporen past bij een ander ontwikkelstadium met bijbehorende marktrijpheid van innovaties:

- Spoor 1: Emissiearme uitvoering, ontwikkeld vanuit de huidige werkwijze;
- Spoor 2: (Nagenoeg) Emissievrije uitvoering, met een transitie sprong;
- Spoor 3: Ontwikkel (innovatie) spoor.



Spoor 1 richt zich op het structureren en versnellen van innovaties die al op de markt zijn (“het laaghangende fruit”). Dit zijn vooral innovaties met een hoog Technical Readiness Level (TRL) die emissies van bestaand materieel reduceren (bijvoorbeeld gebruik van filters of LNG). Deze innovaties alleen zijn niet genoeg om het doel van klimaatneutraal kustonderhoud te bereiken.

Spoor 2 richt zich op het maken van een transitie sprong naar klimaatneutraal kustonderhoud. Het betreft innovaties die nog investeringen in ombouw van bestaand of aanschaf van nieuw materieel vergen en een gemiddeld TRL hebben (bijvoorbeeld baggerschepen die worden aangedreven door waterstof, ammonia of elektriciteit).

Spoor 3 richt zich op ontwikkelingen voor de langere termijn. Dit zijn innovaties die in een vroegtijdig ontwikkelstadium (laag TRL) zijn en op korte termijn nog beperkt kunnen bijdragen aan het kustonderhoud. Ze kunnen mogelijk op de lange termijn een groot effect hebben.

Het werken langs deze drie sporen is nodig om gelijktijdig te zorgen voor de leverzekerheid van het kustlijnonderhoud en te werken aan de sprong naar een duurzamer uitvoering voor de langere termijn. Het beeld is dat de komende 15 jaar het grootste deel van de uitvoering van kustlijnverzorging in spoor 1 en 2 zal plaatsvinden. De ambitie is dat spoor 1 rond 2030 samenvloeit met de emissievrije uitvoering van spoor 2. De spelers in de markt zullen zich hierop aan moeten passen. De bijdrage uit spoor 3 aan de uitvoering van kustlijnverzorging is de komende 15 jaar naar verwachting nog laag. Dit zal vooral op de lange termijn effect hebben.

Marktbenadering en contractspecificaties voor de drie ontwikkelsporen

Om de markt te stimuleren om duurzame innovaties te ontwikkelen en in te zetten, is het voorstel om de duurzaamheidseisen in de contractspecificaties (incrementeel) op te schroeven en hier passende contractprofielen bij te definiëren. In dit project typeren we contractprofielen op 6 thema's:

- 1) Scope van de opdracht (type suppletie, omvang, alleen aanleg of ook onderhoud),
- 2) Looptijd (contractduur en eventuele verlengingsoptie),
- 3) Vraagspecificatie (de mate van detail en variatie in de werkzaamheden),
- 4) Risicoprofiel (risico's in geld, tijd en kwaliteit voor opdrachtnemer en opdrachtgever),
- 5) Type prestatie (kubieke meters, verbeteren van duurzaamheid),
- 6) Betalingsregime (tussentijds of achteraf, basis van verrekening).

Spoor 1 sluit qua marktbenadering en contractprofiel nauw aan op de huidige werkwijze. Opdrachten hebben voor aanbieders een beperkte omvang, looptijd en risicoprofiel. Wel worden de eisen qua verduurzaming stapsgewijs verhoogd in de uitvraag. Hierdoor dingen aanbieders alleen mee als er een minimum duurzaamheidsniveau (bijvoorbeeld uitgedrukt in de MKI-waarde) is. Opdrachten met een hoger duurzaamheidsniveau kunnen met lange termijnperspectief in de markt worden gezet. Opdrachten met een lager duurzaamheidsniveau zijn korter en zullen in dit spoor uiteindelijk verdwijnen. Deze incrementele aanpak beperkt de noodzaak tot versnelde afschrijving van ouder, minder duurzaam materieel en zorgt tegelijk voor een (steeds) hogere prikkel om het huidige materieel te verduurzamen. Spoor 1 is voor bijna alle kustvakken toepasbaar, tenzij in de toekomst lokaal de milieueisen voor emissies (te) hoog worden (bijvoorbeeld in de buurt van Natura 2000 gebieden).

Spoor 2 faciliteert een transitie sprong naar klimaatneutrale uitvoering via stevige duurzaamheidseisen in de vraagspecificatie, met een zwaardere weging in de BKPV. Opdrachten in dit spoor hebben een hogere "duurzaamheidsdrempel" dan opdrachten in Spoor 1 en impliceren grotere technische risico's en investeringen. Om voldoende partijen uit de dagen om deze sprong te nemen, kan het Rijk meer zekerheid bieden in de vorm van grotere opdrachten in omvang en tijd (met eventuele verlengingsopties). In de opstart van Spoor 2 kunnen de risico's meer worden gedeeld tussen opdrachtgever en opdrachtnemer, bijvoorbeeld in de vorm van samenwerkingsvormen als een Innovatie-Partnerschap, een Alliantie of een Publiek Private Samenwerking. De risico's voor marktpartijen kunnen ook worden verminderd door een breder tijdsframe toe te staan voor de uitvoering. Spoor 2 zal vooral toepasbaar zijn op kustvakken met een grotere suppletieopgave. Door onderhoudssuppleties te clusteren of een megasuppletie aan te brengen, kan werk verder in tijd naar voren gehaald. Hiermee is er wel enige, maar een beperkte en acceptabel geachte, invloed op de markt. Gegeven de huidige innovaties van het materieel binnen IKZ is dit spoor op kortere termijn vooral geschikt voor voorroeversuppleties (aangezien de meeste innovaties niet of minder geschikt zijn voor strandsuppleties).

Voor Spoor 3 is het lastig om op voorhand een contractprofiel te typeren, aangezien dit mede zal afhangen van het beoogde doel van de innovatie. De innovatie kan een test (pilot) zijn op een specifieke locatie of een meerjarige uitvoering. Een ontwikkeling in Spoor 3 kan eventueel ook worden ingebed in samenwerking met een opdracht uit Spoor 1 of 2. Opdrachten binnen Spoor 3 zijn in potentie voor alle kustvakken denkbaar, maar locaties met een acute veiligheidsopgave, strak tijdspad of kritische uitvoering lijken minder geschikt voor dit meer "experimentele" spoor.

Programmatiese aanbesteding

Het voorstel is om de opdrachten binnen kustlijnzorg programmatiesch aan te besteden over de verschillende sporen. Op dit moment valt vrijwel het gehele opdrachtvolume in Spoor 1. Het idee van de programmatiese aanbesteding is om dit opdrachtvolume uiteindelijk terug te brengen naar nul. Bij aanvang van Spoor 2 kan Rijkswaterstaat als "launching customer" optreden en zal het aantal aanbieders nog beperkt zijn (gezien de grote investeringen en risico's). Indicatief zou Spoor 2 bij de start ca. 30% van het opdrachtvolume kunnen bevatten. Als het aantal aanbieders binnen dit spoor groeit, kan het opdrachtvolume groeien richting ca. 90% van het opdrachtvolume (en vloeit daarmee samen met Spoor 1). Of dit pad succesvol gevolgd kan worden zal mede afhangen van de mate waarin internationale opdrachtgevers strengere duurzaamheidseisen in hun uitvragen gaan opnemen, waardoor de markt voor aanbieders groter wordt. Om continu te kunnen blijven innoveren is het voorstel voor Spoor 3 een indicatief opdrachtvolume van 5 á 10% aan te houden, verdeeld over kleinere opdrachten.

Bij de aanbestedingsprocedure zijn verschillende tools inzetbaar om duurzaamheid een zwaarder gewicht te geven in de selectie van de beste aanbidding. Voorbeelden hiervan zijn: een groter gewicht van de milieu kosten indicator (MKI) en/of een aparte beoordeling op CO₂-emissies in de BKPV, een (steeds) hogere drempelwaarde voor emissies voor een geldige inschrijving, een hogere BKPV voor contracten met een langere doorlooptijd en een extra bonus op een lagere eindwaarde van de MKI bij uitvoering ten opzichte van de inschrijving. Deze wijze van aanbesteding is een leerproces. Het voorstel is het zo in te richten dat monitoring en bijsturing goed mogelijk is om zowel op leverzekerheid als toename in duurzaamheid te kunnen blijven sturen.

3.7 Toepasbaarheid alternatieven in Nederland

Op basis van de resultaten van de bouwstenen uit werkpakketten 2 en 3, is geëvalueerd welke delen van de Nederlandse kust in aanmerking komen voor de implementatie van deze bouwstenen. In aanvulling op de reguliere vooroever- en strandsuppleties langs de Nederlandse kust, kwamen er twee kansrijke alternatieve combinaties naar voren (zie 3.2, 3.4 en 3.5). De eerste kansrijke combinatie is de megasuppletie (op strand en/of op de vooroever) uitgevoerd met een baggerschip / hopper. De tweede combinatie is een continue suppletie uitgevoerd door een Cablehopper. Over de methode en resultaten is gerapporteerd in Róbkke et al. (2023).

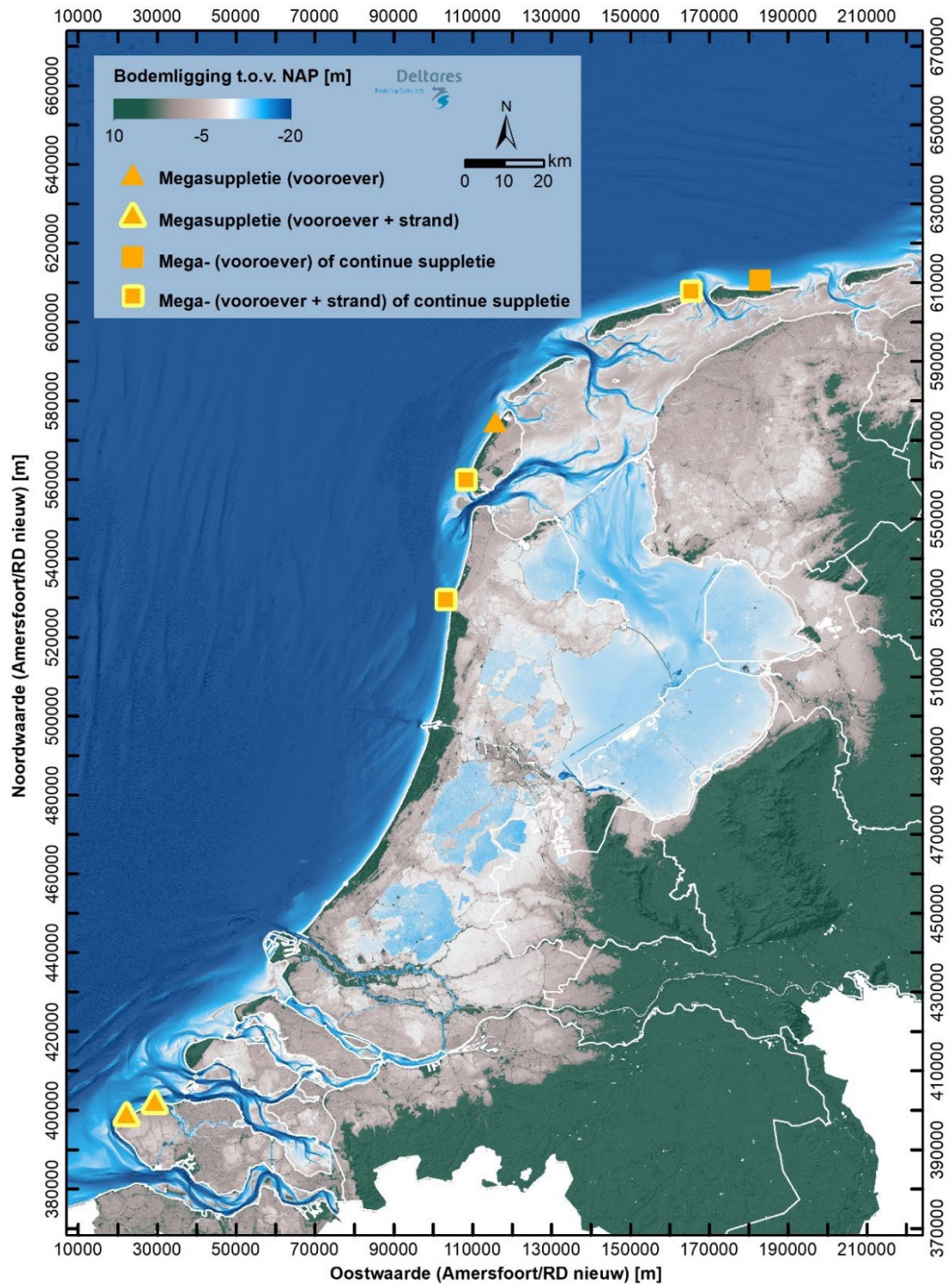
Met een toekomstprojectie van de suppletievolumes tot 2035 (zie 3.1, maar nu voor heel Nederland) zijn de gebieden bepaald waarvoor het zinvol is de toepasbaarheid te bepalen. De evaluatie van de bouwstenen is vervolgens uitgevoerd via expert judgement, inclusief workshop. De zaken die daarbij zijn beschouwd zijn: lokale morfodynamiek, kustfuncties (scheepvaart, ecologie, toerisme, etc.), technische aspecten, vergunbaarheid en, waar van toepassing, andere beleidsaspecten.

Uit de evaluatie volgt dat er twaalf gebieden met voldoende suppletiebehoefte zijn, waarvan er zeven in aanmerking om al in de komende 10-15 jaar een alternatieve wijze van kustonderhoud te implementeren. Deze gebieden zijn (zie Figuur 3-9):

- 1) de centrale eilandkust van Ameland,
- 2) de eilandstaart van Terschelling,
- 3) Texel Noord,
- 4) Texel Zuidwest,
- 5) de Hondsbossche Duinen,
- 6) de Vrouwenpolder (Zeeland) en
- 7) de kust bij Domburg (Zeeland).

Voor al deze locaties is alternatief kustonderhoud via een megasuppletie voldoende kansrijk voor verdere verkenning. Op vier daarvan is een continue suppleties een mogelijkheid. Uiteraard moet, voordat er grote stappen worden genomen, een meer gedetailleerde analyse van de lokale omstandigheden worden uitgevoerd. De vijf locaties met wel voldoende suppletiebehoefte, maar onvoldoende perspectief (o.b.v. de hierboven genoemde

evaluatiefactoren) zijn niet aangegeven in Figuur 3-9. Dit waren locaties Schiermonnikoog, Vlieland, Scheveningen, Maasvlakte 2 en Westkapelle/Oostgat.



Figuur 3-9: Locaties waar implementatie van alternatief kustonderhoud in komende 10-15 jaar mogelijk lijkt (bron: Röbbke et al., 2023)

4 Synthese

Dit project beoogt (1) kennis te ontwikkelen voor 'bouwstenen voor klimaatneutraal, natuurinclusief & opschaalbaar kustonderhoud' en (2) ervaring op te doen met en een doorbraak bewerkstelligen in de samenwerking binnen de driehoek (overheid, markt, kennisinstellingen) voor het kustonderhoud in de nabije en verre toekomst (zie 1.2). De bouwstenen zijn suppletieconcepten c.q. suppletievarianten (werkpakket 2, zie 3.2), uitvoeringsmethoden (werkpakket 3, zie 3.4) en contract- en samenwerkingsvormen (werkpakket 4, zie 3.6). De samenwerking is geëvalueerd in hoofdstuk 2. Dit hoofdstuk evalueert de bouwstenen in samenhang en gegeven de doelstellingen klimaatneutraal, natuurinclusief en opschaalbaar kustonderhoud.



Allereerst zijn de criteria uiteengezet waarop de alternatieven met elkaar zijn vergeleken (4.1). Vervolgens worden de resultaten van de (combinaties van) suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden op deze criteria samengevat (4.2). Als laatste wordt de afweging gemaakt tussen de alternatieven vanuit de drie hoofddoelstellingen van het project: klimaatneutraal, natuurinclusief en opschaalbaarheid kustonderhoud (4.3). Deze redeneerlijnen geven aan welke alternatieven dit onderzoek als kansrijk ziet om dat doel te halen en wat de consequenties zijn voor de andere criteria. Meer informatie over de activiteiten binnen WP5, de criteria en redeneerlijnen is beschreven in (IJff 2023).

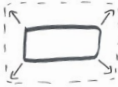





4.1 Criteria voor het vergelijken van de bouwstenen

De bouwstenen zijn onderzocht op hun bijdrage aan klimaatneutraal, natuurinclusief en opschaalbaar kustonderhoud. Er zijn echter meer criteria die van belang zijn bij een afweging voor ontwerp en uitvoering van een zandsuppletie. Daarom bekeek dit project ook randvoorwaarden aan het kustonderhoud en 'overige criteria voor afweging'. Uiteindelijk zijn in dit project de mogelijkheden van zandig kustonderhoud onderzocht op acht criteria (Tabel 4-1).

De doelstellingen zijn vertaald in de criteria 1) milieu-impact (MKI), 2) ecologische impact en 3) opschaalbaarheid en toepasbaarheid. De randvoorwaarden betreffen 4) de te behalen beleidsdoelen (handhaven kustlijn en voldoende volume toevoegen aan het kustfundament), 5) de technische uitvoerbaarheid en vergunbaarheid en 6) het behoud van een 'gezonde markt' (voldoende spelers in onderlinge concurrentie). De 'overige criteria' zijn 7) de kosten en 8) de bredere bijdrage aan welvaart en welzijn (inclusief recreatie en gezondheid). Een aantal van deze criteria is tot op zekere hoogte te kwantificeren (handhaving kustlijn, milieu-impact, kosten en ecologische impact). Anderen kunnen alleen kwalitatief worden vergeleken (opschaalbaarheid en toepasbaarheid, uitvoerbaarheid, gezonde markt, en brede welvaart).

Tabel 4-1 Overzicht van de criteria en randvoorwaarden die zijn gebruikt voor de afweging tussen suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden. Randvoorwaarde zes (gezonde markt) is gebruikt om de bouwstenen van werkpakket 4 te ontwikkelen. Deze resulteren niet direct in onderscheidende scores op één van de andere criteria of randvoorwaarden.

	Criteria / randvoorwaarden	Toelichting
Doelstellingen TKI-DCC	1. Milieu-impact 	Milieu-kostenindicator (MKI), indicator voor de mate van milieubelastende emissies (en dus duurzaamheid) tijdens de uitvoering
	2. Ecologische impact 	De mate waarin een alternatief tijdens en na de aanleg de ecologie beïnvloedt (door verstoring, bedelving en verandering in ecotopen)

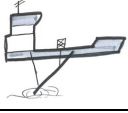
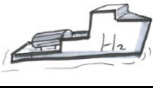

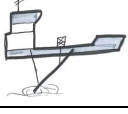
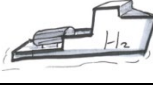

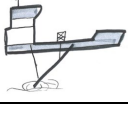
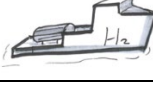
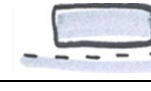
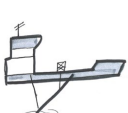


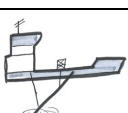



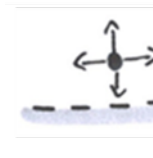
	3. Opschaalbaarheid en toepasbaarheid 	Uitvoerbaarheid en flexibiliteit bij grotere suppletievolumes en verschillende locaties
Randvoorwaarden	4. Voldoen aan beleid kustonderhoud 	Bijdrage aan behoud van BKL en het volume van het kustfundament
	5. Uitvoerbaarheid 	De mate waarin een alternatief praktisch uitvoerbaar en vergunbaar is c.q. de inspanning/moeite die daarvoor nodig is
	6. Gezonde markt 	De mate waarin een alternatief ruimte en ondersteuning geeft aan de mogelijkheid om te innoveren in de kustlijn zorg, waarbij de wijze van uitvragen toegankelijk is voor voldoende aanbieders op de Nederlandse markt
Overige criteria	7. Kosten 	De kosten van de aanleg van het alternatief exclusief investeringen in materieel, ondersteunende energie-infrastructuur en monitoring
	8. Brede welvaart 	De mate waarin een alternatief leidt tot een extra bijdrage voor gebruiksfuncties, bovenop hetgeen volgt uit het handhaven van de kustlijn

4.2 Resultaten suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden

Een evaluatie op de hiervoor genoemde criteria gebeurt tussen verschillende vormen van kustonderhoud. Het zijn combinaties van een suppletieconcept en een uitvoeringsmethode met daaraan gekoppeld een marktbenadering/contractstrategie (cf. werkpakket 4). De marktbenadering is afgestemd op de mate van innovatie/marktrijpheid van de combinaties, zodat over de gehele kustlijn zorg aan de randvoorwaarde 'gezonde markt' kan worden voldaan.

Dit project startte met meerdere suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden. Tijdens het onderzoek is een selectie gemaakt van (uiteindelijk zes) kansrijke combinaties daarvan. Dat gebeurde op basis van TRL (Technology Readiness Level, een techniek is kansrijk als deze in de komende 15 jaar tot uitvoering kan komen), energievraag en uitvoerbaarheid (m.n. gegeven de bodemdiepte waar gesuppleerd wordt). De suppletieconcepten zijn verdeeld in reguliere suppleties, megasuppleties en continue suppleties (Tabel 4-2). Voor de reguliere suppleties (vooroever en strandsuppletie) en de megasuppleties (onderwater, eiland en schiereiland) is de uitvoering met een duurzame hopper versus de conventionele sleephopper onderzocht. De enige combinatie met een continue suppletie (onderwater puntsuppletie) is die met uitvoering door een Cablehopper.

Tabel 4-2: Onderzochte combinaties van suppletieconcepten uitvoeringsmethode, onderverdeeld in reguliere suppleties, megasuppleties en continue suppleties

Type	Combinatie suppletieconcept en uitvoeringsmethode			
Reguliere suppleties	Vooroever suppletie met conventionele en duurzame hopper			
	Strandsuppletie met conventionele en duurzame hopper			
Megasuppleties	Onderwater megasuppletie met conventionele en duurzame hopper			
	Eiland met conventionele en duurzame hopper			
	Schiereiland met conventionele en duurzame hopper			
Continue suppleties	Continue vooroever-suppletie met Cablehopper			

4.2.1 Resultaten reguliere suppleties

Met reguliere suppleties is veel ervaring en het is aannemelijk dat ze binnen de huidige kaders van kustlijn­zorg, het optimum zijn tussen kosten en ‘zand in de BKL-zone krijgen op die plaatsen waar overschrijding ervan dreigt’.¹⁰ Ze worden op het strand of onder water uitgevoerd. Dit laatste heeft de voorkeur omdat kosten en milieu-impact (door benodigde hoeveelheid brandstof) ervan lager zijn. Ze geven ook minder overlast voor het gebruik van het strand en dragen (omdat meer zand kan worden ingekocht voor hetzelfde geld) effectiever bij aan de lange termijn doelen. Het deel van de suppletie dat niet direct op het onderhouden deel van de kust terecht komt draagt bij aan het (tijdelijk) uitbouwen van de duinen ten noorden of zuiden. Er is negatieve impact van onderwatersuppleties op de ecologie, vooral als ze plaatsvinden op delen van de vooroever waar fijner sediment ligt en waar soorten leven die minder gewend zijn aan dynamiek door golven en stromingen. Voordeel van reguliere vooroever- en strandsuppleties is dat ze doorgaans geen ingewikkelde vergunningsprocedures vergen. Ze zijn toegestaan, ook in beschermde natuurgebieden, mits ze voldoen aan de voorwaarden in het betreffende beheerplan.

Strandsuppleties sturen directer op het zandvolume in de BKL-zone. Ze vinden plaats waar ze echt nodig zijn om de kustlijn te handhaven, omdat een geul dicht onder de kust loopt of omdat om andere redenen niet voldoende voeding naar het strand vanuit een onderwatersuppletie mogelijk is. Strandsuppleties hebben ook minder negatieve effecten op het bodemleven.

¹⁰ Uit 3.4 i.r.t. de benchmark in 3.1 volgt wel dat deze suppleties hogere kosten en MKI hebben dan megasuppleties, maar daarin is niet betrokken dat het doelmatiger is, als het alleen om handhaving van de kustlijn gaat, de suppletie pas aan te brengen als duidelijker is waar de suppletiebehoefte daadwerkelijk is. Tevens speelt ook nog het aspect van rente.

Bij kustonderhoud via de huidige wijze (reguliere suppleties) kan op de korte termijn op de milieu-impact gestuurd worden via het brandstoftype van de hopper. Het verminderen van de milieu-impact door andere (innovatieve) uitvoeringsmethoden (zoals een onderwaterdrone) lijkt nog niet haalbaar binnen de komende 15 jaar. Waarschijnlijk is een stapsgewijze verhoging van de duurzaamheidseisen in de uitraag nodig om voldoende aanbiedingen te krijgen vanuit de markt met een ander brandstoftype. Dit maakt het mogelijk om gradueel emissies steeds verder te reduceren (conform ontwikkelspoor 1 in paragraaf 3.6), bijvoorbeeld door meer biobrandstoffen (zoals HPV) in plaats van diesel te gebruiken (wat nu al mogelijk is). Vanwege de beperkte omvang van reguliere suppleties is de stap om direct over te stappen klimaatneutraal materieel (ontwikkelspoor 2 in paragraaf 3.6) waarschijnlijk te groot door de grote risico's en relatief lange terugverdientijden op investeringen.

4.2.2 Resultaten megasuppleties

Bij megasuppleties wordt 'vooruit gewerkt': de suppletiebehoefte van langere periode wordt in één keer aangebracht. Ze komen in beeld komen als de meerwaarde die 'lokaal een overmaat zand' geeft voor natuurlijkheid (nieuwe habitats) en menselijke gebruiksfuncties (zoals recreatiemogelijkheden) voldoende is. Het moet opwegen tegen andere elementen van het beoordelingskader. De prijs per m³ zand is voor megasuppleties lager dan voor reguliere suppleties. Echter, door vooruit te werken worden de kosten ook naar voren gehaald en dat geld moet er wel zijn. Bij een afweging tegenover reguliere suppleties speelt ook een toename in de onzekerheid op andere criteria (in het bijzonder het 'voldoen aan het beleid' en vergunbaarheid) een rol. Dit zou een 'afname in beheersbaarheid' genoemd kunnen worden.

Er zijn drie typen megasuppleties onderzocht: een schiereiland, een eiland en een onderwater megasuppletie. Net zoals bij de reguliere suppleties, zijn ook hier de kosten en milieu-impact het laagste bij de onderwater megasuppletie (en per m³ tevens lager dan bij een reguliere suppletie). In alle gevallen is er een groot oppervlak waar het bodemleven afsterft door bedelving. Dit heeft tevens consequenties voor de inspanningen die nodig zijn om vergunningen te krijgen voor megasuppleties, zeker in beschermde Natura-2000 gebieden. Afhankelijk van het type megasuppletie, veranderen de typen ecotopen rondom de suppletie. De natuurwaarde die hierop wordt gerealiseerd (bijv. gemeten in biodiversiteit) is afhankelijk van het beheer en het instellen van rustgebieden na aanleg van de megasuppletie. Hierin moet een afweging worden gemaakt met de andere functies, met name recreatie. Vooral het schiereiland biedt mogelijkheden voor andere vormen van strandrecreatie, zoals op de Zandmotor is gedemonstreerd. Een eiland zal door de rust meer kansen bieden voor nieuwe natuurwaarden, en op de onderwater megasuppletie kan de bodemdiergemeenschap worden hersteld. De kustlangse verspreiding van alle drie de megasuppleties is beperkt en stagneert na verloop van tijd. Hierdoor kan slechts een beperkt deel van de kust gevoed worden vanuit een centrale verspreidingslocatie. Om een grotere deel van de kust te voeden zijn dus meerdere verspreidingslocaties nodig.

Net als bij reguliere suppleties, kunnen conventionele of duurzame hoppers ingezet worden voor de uitvoering van megasuppleties. Megasuppleties lenen zich vanwege hun omvang beter om een transitie-sprong naar klimaatneutrale uitvoering te maken (conform ontwikkelspoor 2 in paragraaf 3.6). Grotere opdrachten in omvang en tijd bieden meer zekerheid voor aanbieders om de sprong te maken en te investeren in duurzamer materieel. Bij de eerste uitvragen kunnen de risico's gedeeld worden tussen opdrachtgever en opdrachtnemer, bijvoorbeeld in de vorm van samenwerkingsvormen als een Innovatie-Partnerschap, een Alliantie of een Publiek Private Samenwerking.

4.2.3 Resultaten continue suppleties

Bij continue suppleties wordt voortdurend op dezelfde plaats zand aangebracht. Hierdoor bouwt de kust vanaf die plaats uit en zal door natuurlijke processen het zand naar andere plaatsen (in de nabijheid) moeten gaan die ook een onderhoudsbehoefte hebben. Hiervoor is normaal gesproken extra zand nodig, omdat de lokale uitbouw van de kustlijn moet plaatsvinden bovenop het zand dat nodig is in de zone waar suppletiebehoefte is (om kustlijn te handhaven gegeven de ligging van de BKL).

De belangrijkste meerwaarde van continu suppleren lijkt de mogelijkheid om andere uitvoeringsmethoden dan de hopper in te zetten met een beduidend lager energieverbruik. Een tweede duidelijke meerwaarde is het kleinere oppervlak van verstoring van bodemleven. De geleidelijke verspreiding van het zand vanaf het punt van suppleren is namelijk vergelijkbaar met de natuurlijke situatie. Echter, de verspreiding lijkt zo geleidelijk dat de omliggende kust niet voldoende gevoed wordt en de aanvoer in de knel komt. Net als bij de megasuppleties moet ook hier dit opwegen tegen extra kosten en een 'afname in beheersbaarheid' ten opzichte van reguliere suppleties.

Het onderzoek richtte zich op een continue vooroeversuppletie met een Cablehopper, omdat een permanente lange pijpleiding (nog) niet competitief lijkt in termen van kosten en vergunbaarheid. De Cablehopper heeft een lage energievraag en de ingeschatte kosten en milieu-impact zijn daardoor ook laag. Het aanbrengen van een megasuppletie via het principe van een continue suppletie (met Cablehopper) heeft minder directe ecologische impact dan 'in één keer via hoppers'. Het gebied waarin het bodemleven wordt bedolven is namelijk kleiner. De suppletieomvang die op één plaats met de Cablehopper bereikt kan worden is echter gelimiteerd omdat een minimale diepgang nodig is. De berekeningen die in dit project zijn uitgevoerd geven aan dat de verspreiding van zand vanaf de locatie van aanbrengen beperkend is. Dat betekent dat een kleiner deel van de kust kan worden gevoed (in vergelijking met een megasuppleties via een hopper) door de suppletie. Dit zal waarschijnlijk leiden tot ophoping van zand op de aanvoerlocatie waardoor het volume per tijdseenheid dat kan worden aangevoerd afneemt. Tevens zorgt de langdurige aanwezigheid van de kabel voor aanvullende eisen in het vergunningstraject.

De Cablehopper is een innovatief concept (relatief laag TRL) dat nog volop in ontwikkeling is. Voordat deze methode kan worden toegepast, is daarom nog een grote innovatiesprong nodig. Daarom zou een inzet ervan eerst getest moeten worden in een pilot op een locatie zonder acute veiligheidsopgave, strak tijdspad of kritische uitvoering (conform ontwikkelspoor 3 in paragraaf 3.6)

4.3 Redeneerlijnen projectdoelstellingen

4.3.1 Klimaatneutraal kustonderhoud



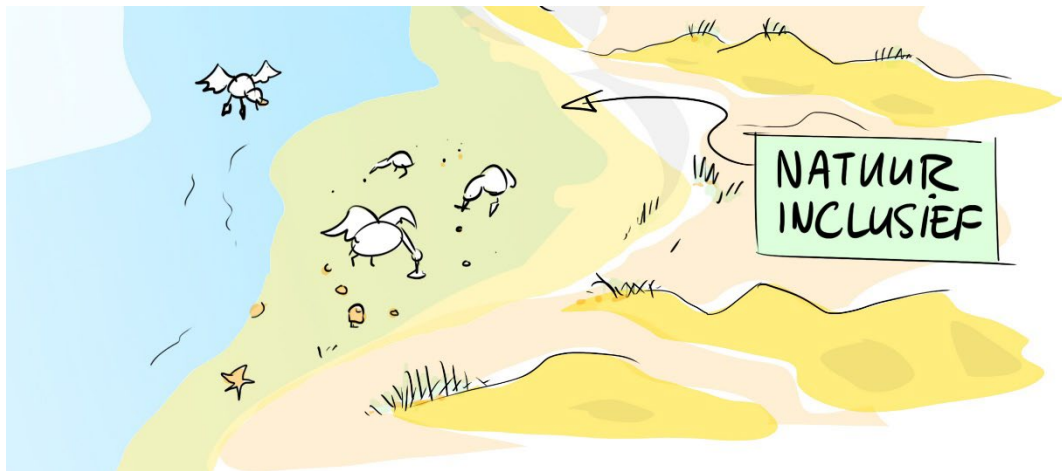
De cruciale factor om te komen tot klimaatneutraal kustonderhoud is het energieverbruik en het type energiedrager van het materieel. Voor de komende jaren lijken met name oplossingen voor het terugdringen van emissies van huidig materieel of inzet van duurzame energiedragers in omgebouwd of nieuw materieel kansrijk voor een transitie naar klimaatneutraal kustonderhoud. De suppleties die het minste energie per m³ zand vragen zijn onderwatersuppleties waarbij het zand via 'klappen' kan worden aangebracht (voldoende diepgang nodig). De vaarafstanden tot de winlocaties kunnen dan zo kort mogelijk worden gehouden en het 'klappen' vraagt minder energie dan wanneer het zand via 'rainbowen' of persen richting ondieper water of het strand moet worden gebracht. De inzet van grotere baggerschepen kan het energieverbruik per m³ verder terugdringen, maar stelt wel verdere beperkingen aan de aanleghoogte van de onderwatersuppleties (i.v.m. grotere diepgang schip).

Het gebruik van "duurzame hoppers" (hoppers op duurzame energiedragers) geeft een grote milieuwinst (ca. 90% reductie ten opzichte van conventionele hoppers op diesel). Qua operatie zijn de duurzame hoppers in grote mate vergelijkbaar met conventionele hoppers. Daarom zijn

de uitvoerbaarheid (waaronder vergunningen), ecologische impacts (van de suppleties zelf) en opschaalbaarheid & toepasbaarheid vergelijkbaar met de huidige werkwijze. Hiervoor worden geen grote problemen voorzien. De belangrijkste uitdaging is het opschalen van de 'innamepunten' van de duurzame energie. Momenteel zijn de kosten per m³ zand ca. 40-50% hoger dan bij conventionele hoppers. Dit is exclusief de kosten voor de ombouw van het materieel en de aanleg van energie-infrastructuur voor nieuwe energiedragers. Er is dus nog een innovatie- of transitie sprong nodig.

In theorie kan deze sprong gemaakt worden door een groot deel van het kustonderhoud bij één of enkele partijen te beleggen, zodat zij voldoende volume en zekerheid hebben om hun investeringen in ombouw of nieuwbouw van materieel terug te verdienen. Aandachtspunt hierbij is dat de markt dan voor minder aanbieders toegankelijk is en de competitieve prijsvorming voor Rijkswaterstaat onder druk komt te staan. Deze (theoretische) sprong valt daarmee af. Vanuit het onderzoek in werkpakket 4 leidt dit tot een voorstel om het duurzame materieel geleidelijk in het kustonderhoud te introduceren (met ca. 30% van het opdrachtvolume bij aanvang), met de overheid als "launching customer", waarbij het aantal aanbieders geleidelijk kan groeien.

4.3.2 Natuurinclusief kustonderhoud



Natuurinclusief kustonderhoud wordt behandeld door bespreken van drie aspecten: (a) behoud (zo min mogelijk verstoring van de bestaande ecosystemen, cf. Wet natuurbescherming), (b) ontwikkeling (vorming van nieuwe ecotopen) en (c) sedimenttransport en invloed op duindynamiek.

a. Natuurbehoud (bestaande natuur)

Kustonderhoud kan conflicteren met natuurbehoud door:

- (i) sterfte van bodemdiergemeenschappen bij de aanleg van suppleties (bedelving, al dan niet tijdelijk verlies van habitat);
- (ii) vertroebeling die leidt tot minder doorzicht en minder primaire productie, treedt voornamelijk op tijdens de zandwinning (suppletielocaties hebben vaak al beperkt doorzicht door de golfdynamiek);
- (iii) verstoring (geluid en/of zicht, zowel boven als onderwater);
- (iv) eutrofiëring, met name door stikstofdepositie (zie 3.4), alleen bij de conventionele sleephopperzuiger.

De belangrijkste verschillen tussen bouwstenen liggen in de factoren (i) bedelving en (iii) verstoring. De bodemdieren die in de diepere delen van de vooroever (onder -6 m NAP) leven zijn in het bijzonder gevoelig. Op dit punt zijn ondieper gelegen vooroeversuppleties en strandsuppleties gunstiger. Bij megasuppleties (groot, maar lange tijd daarna geen nieuwe ingreep) is het gebied waar bedelving plaatsvindt groter, maar is er veel tijd voor herstel. Bovendien kunnen ze gebruikt worden om (tijdelijk) nieuwe / andere ecotopen doen ontstaan (zie aspect b.). Continue suppleties zijn interessant als alternatief omdat het tot de minste ecologische schade door bedelving leidt (kleiner oppervlak en geleidelijke aanvoer van

sediment). Ze scoren echter slechter qua verstoring. Ze zijn immers permanent aanwezig, wat bovendien hinder of beperkingen aan andere gebruiksfuncties kan veroorzaken. Het verkrijgen van vergunningen (o.m. Wet natuurbescherming) is veel minder vanzelfsprekend.

b. Natuurontwikkeling (nieuwe c.q. versterkte natuur)

Er is verschil in leefgebieden in de kustzone door gradiënten in diepte en stroomsnelheid (en mede als gevolg daarvan in sedimentsamenstelling / korrelgrootte). Suppleties kunnen deze veranderen en ook tot verrijkingen leiden. Bij megasuppleties, die voor langere tijd het lokale gedrag en profiel beïnvloeden, is dit het meest evident. De Zandmotor bijvoorbeeld, leidde direct na aanleg tot een nieuw hoogteprofiel, waarbij hoger gelegen ecotopen zoals strand en embryonale duinen in oppervlak toenemen. Het ontwerp van de Zandmotor leidde ook tot luwere, meer slibrijkere plekken. Hiervoor verdwenen uiteraard oppervlaktes van andere ecotopen. Bij continue en reguliere vooroever- en strandsuppleties is de verandering in oppervlaktes van de ecotopen beperkt

c. Invloed op sedimenttransport

Suppleties kunnen het zandtransport richting de duinen beïnvloeden, met gevolgen voor duinvorming. De belangrijkste factoren zijn de effectieve strandbreedte (het droge strand waar zandtransport plaats vindt) en aanwezigheid grovere zandkorrels en/of schelpen die het zandtransport bemoeilijken. Bij (mega)strandsuppleties kunnen beide factoren meespelen, zoals bleek bij de Zandmotor. Het zandtransport richting duinen was minder dan verwacht en duinvorming kwam later op gang kwam. De ontwikkeling van rijroutes langs de 'oude duinen' en een mechanische manier van schoonmaken van het strand speelden hierbij ook een rol. Dit toont de invloed van het ontwerp en het beheer op het ontwikkelen van strand- of duinnatuur.

Afweging tussen suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden

Welke combinatie van bouwstenen het meest natuurinclusieve kustonderhoud geeft is in de eerste plaats afhankelijk van de natuurdoelen van het gebied. Hoe waardevol is de bestaande natuur en behoud ervan of is de wens of noodzaak tot creëren van nieuwe ecotopen van groter gewicht? Vanuit het oogpunt 'beperken bedelving' zijn strandsuppleties en ondiep gelegen vooroeversuppleties het meest gunstig. Strandsuppleties hebben voor de ecologie als nadeel dat er meer verstoring is en het risico dat de korrelgrootteverdeling anders is, met invloed op het zandtransport richting de duinen. Of de natuurwinst door minder bedelving bij continue suppleties opweegt tegen de continue verstoring die ze geven is niet op voorhand te zeggen. Voor het creëren van nieuwe ecotopen zijn megasuppleties het meest geschikt: met het aanbrengen van grote volumes zand worden de omstandigheden zodanig veranderd dat er grotere oppervlaktes aan droge en ondiepe ecotopen ontstaan. Ze veranderen ook lokale stroming en zandtransport richting duinen. Hierop kan met ontwerp en beheer worden gestuurd.

4.3.3 Opschaalbaar kustonderhoud



Een versnelde zeespiegelstijging zal op termijn (waarschijnlijk pas 2050 of later) leiden tot grotere jaarlijkse hoeveelheden zand voor kustonderhoud. De vraag is welke alternatieven dan meer geschikt zijn / worden. Toepasbaarheid, zijn de alternatieven op meerdere locaties te gebruiken, is een onderdeel van deze vraag. Alle suppleties die met grote hoeveelheden tegelijk kunnen worden aangebracht (lees: hoppers) zijn geschikt voor grotere volumes, zo

lang als de lokale morfologische situatie dit toelaat (vergelijk kusten waar een geul nabij het strand ligt en er nu al weinig ruimte is voor een suppletie). Suppleties onder water kunnen meestal makkelijker worden opgeschaald dan die op het strand en ze scoren gunstiger op verstoring, kosten en MKI. Bij de aanleg van Hondsbossche Duinen, Maasvlakte en Zandmotor is gebleken dat ontwerpen kunnen worden aangepast aan de lokale eisen (functies) en grote hoeveelheden aanbrengen per tijdseenheid mogelijk is.

Continue suppleties zijn minder goed opschaalbaar, want er zijn beperkingen aan de volumes die aangebracht kunnen gegeven de afhankelijkheid van verspreiding in kustlangs richting. Bij opschaling van materieel vergroten de voor- en nadelen zich uit ten opzichte van elkaar. Zo zal de Cablehopper meer problemen met uitvoerbaarheid en ecologische effecten hebben.

De inzet van duurzame hoppers scoort nu goed op “klimaatneutraal”, maar lager op “opschaalbaar”. Dit vraagt een volgende stap, want de duurzame hoppers zijn nog relatief klein. Als vaarafstanden naar winlocaties toenemen is groter materieel nodig. Om de opschaalbaarheid van deze en andere innovaties te vergroten zou inzet van het, in werkpakket 4 gepresenteerde, experimentele spoor van uitvragen (pilots) voor ontwikkeling hulp kunnen bieden.

5 Aanbevelingen voor vervolg

5.1 Is er urgentie?

In dit onderzoek zijn stappen gezet naar een voor de toekomst robuuste vorm van kustonderhoud: emissievrij, rekening houdend met opgaven qua natuurlijkheid en opschaalbaar als er in de toekomst veel meer moet worden gesuppleerd. Tevens heeft dit project een belangrijke rol gespeeld in de onderzoekssamenwerking tussen overheid, markt en kennisinstututen. De vraag ligt voor waar de resultaten vervolg behoeven en hoe dit dan tot stand kan komen.

Afweging en besluitvorming over een vervolg valt uiteraard buiten dit rapport. In strategische overlegorganen als de coalitietafel DCC kunnen partijen dit (binnen ieders verantwoordelijkheid) afstemmen en voor het Nederlandse kustonderhoud meer bereiken dan ieder afzonderlijk. Binnen dit onderzoeksproject zijn de voordelen van het werken in een kennisalliantie aangetoond (hoofdstuk 2).

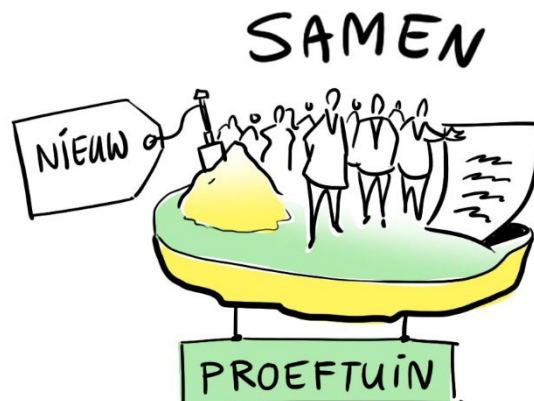
De urgentie om tot een vervolg te komen kan komen vanuit een aantal gezichtspunten:

- *Handhaven kustlijn komende 15 jaar*
Beperkte urgentie. De Nederlandse kust wordt effectief onderhouden met de huidige werkwijze en de kust 'zit goed in 't zand'. Het totale suppletievolume is in beleidsadvies Kustgenese 2.0 gezet op 11 miljoen m³/jaar, vergelijkbaar met de laatste twee decennia.
- *Transitie naar emissievrij*
Grote urgentie. Een vervolg op dit onderzoek kan helpen om het volume te creëren dat de markt nodig heeft om de overstap sneller te maken (hoe investeringsbeslissingen te beïnvloeden). Voor alternatieve vormen van uitvoering is soms een praktijktest nodig om kennisleemten (wat weten we nog niet goed genoeg voor houdbaarheid / opschaling etc.) in te vullen.
- *Onderhoud van de kennisbasis om op lange termijn adaptief de kust te blijven beheren:*
Gemiddelde urgentie. Voor Nederland blijft kennisontwikkeling nodig, niet alleen in het begrip van de werking van het kuststelsel, maar ook om te investeren in mensen die straks de innovaties moeten verzorgen. Overheid, marktpartijen en kennispartijen hebben een voldoende grote, continue stroom van onderzoeken en ontwikkelingen nodig om de kennisbasis te onderhouden.
- *Ruimtelijke keuzes in de komende jaren met invloed op de mogelijkheid om op lange termijn adaptief de kust te blijven beheren:*
Grote urgentie. Er is nu al in Nederland veel discussie over de houdbaarheid van ons land onder versnelde zeespiegelstijging. In dit debat is niet voldoende duidelijk hoeveel het 'zandige onderhoud' daar aan bijdragen kan. Praktijkprojecten van ruimtelijke ontwikkelingen die intrinsiek adaptief zijn omdat ze gebaseerd zijn op sedimentbeheer kunnen laten zien wat de perspectieven zijn. Nederland leert hierbij hoe de samenleving inspeelt op veranderend / ander kustlandschap.
- *Samenwerking in het kustonderhoud:*
Grote urgentie. Dit project heeft de kracht van het samenwerken in een kennisalliantie laten zien. De grote uitdagingen die er zijn als de zeespiegel echt versneld gaat stijgen, kunnen alleen met een gezamenlijke inspanning worden opgepakt.

Met bovenstaande in acht genomen is een discussie met de coalitietafel DCC voorbereid en uitgevoerd. De hoofdlijnen daarvan staan in de volgende sectie.

5.2 Gezamenlijke kennisontwikkeling in combinatie met uitvoering

In één van haar vergaderingen heeft de coalitietafel DCC aan dit TKI-project gevraagd na te denken over een vervolg c.q. de implementatie van de kennis, zonder beperkingen van 'staand beleid', die de samenwerking die de DCC zoekt in het kustonderhoud weer een stap verder kan brengen. Dit is verwoord als "geef ons een offer we cannot refuse".



Uitgangspunten

Toekomstige (onderzoeks)projecten voor duurzaam kustonderhoud moeten uiteraard goed aansluiten op andere onderzoekstrajecten en initiatieven. Denk aan 'Beheer en Onderhoud Kust', 'Innovaties in de Kustlijn zorg (IKZ)', 'Kenniprogramma Zeespiegelstijging' en het 'Transitiepad Kustlijn zorg en Vaargeulonderhoud'. Vervolgonderzoek moet ook logisch aangesloten worden op de kennisleemten, conclusies en aanbevelingen uit dit rapport. Deze zijn uitgebreider beschreven in Bijlage B en betreffen in het bijzonder aspecten van gebruik van kennis in besluitvorming en (het aantonen van) maatschappelijke meerwaarde.

Bureaustudies zijn in de volgende fase niet voldoende, want morfologie en ecologie vragen empirische toetsing en voldoende schaalgrootte. Het gaat om langlopende processen. Startpunt van een 'offer you cannot refuse' is de succesvolle samenwerking in een kennisalliantie. Daarvoor zal, als een concreet project zich aandient, er voor alle partijen voldoende belang moeten zijn om mee te doen.

Waar liggen kansen / mogelijkheden?

De kennisvragen en drempels voor implementatie liggen in het bijzonder in de opschaling van emissievrije varianten en het nut en de noodzaak van andere, met name grotere, suppleties. Dit hangt samen met vragen aangaande de opschaalbaarheid. Er is een kans om grotere (clusters van) suppleties te koppelen aan de transitie naar klimaatneutraal kustonderhoud. Grotere suppleties of clusters van reguliere onderhoudssuppleties bieden schaal om de transitieprong naar / investeringen in emissievrij materieel mogelijk te maken. Tegelijkertijd ontwikkelt Nederland dan op tijd kennis voor uitvoering en ontwikkeling van grotere (onderhouds)suppleties. De beleidsmatige inpassing hiervan zou een combinatie kunnen zijn van het naar voren halen van kustonderhoud en van de maatschappelijke en ecologische meerwaarde die ontstaat. Voor brede toepassing is een goede Maatschappelijke Kosten-Baten Analyse (MKBA) nodig. De afweging tussen kosten en baten voor een eerste stap (pilot of proeftuin) moet met de huidige kennis mogelijk zijn. De eerste stap hoort vergezeld te gaan van een kennis- en monitoringsprogramma dat ook op de in de toekomst nodige brede MKBA is gericht. Aanbevolen wordt het kennis- en monitoringsprogramma te ontwikkelen in een kennisalliantie, in combinatie met stakeholderparticipatie.

In alle gevallen ligt zo'n *Living Lab* logischerwijs in een kustvak met een terugkerende (grote) onderhoudsopgave en/of waar door een omvangrijkere ingreep met sediment een kust ontstaat met een klimaatbuffer die direct al gebruiksfuncties ondersteunt (natuur, recreatie, zie b.v. keuze locatie Zandmotor). Projecten als de laatste, die buiten die reguliere opgave vallen, komen uiteraard niet in beeld vanuit de behoefte van de DCC, maar vanuit ruimtelijke opgaven

en een regionaal proces. Het is echter wel belangrijk te beseffen dat die mogelijkheden zich voordoen en hierop voor te sorteren vanuit het DCC-netwerk.

In het bijzonder kan gedacht worden om met een kennisalliantie¹¹ bij te dragen aan de wetenschappelijke inpassing van 'gebiedsprojecten'. Dergelijke ruimtelijke ontwikkelingen worden vaak al uit veel verschillende bronnen gefinancierd en hebben geen of beperkte ruimte voor kennisontwikkeling via monitoring anders dan gericht op evalueren of 'doelen worden bereikt', zoals aanpakken van leemten die in dit rapport worden genoemd. Grote ingrepen aan de Nederlandse kust waar empirisch onderzoek gevolgen van ingrepen op morfologie en ecologie mogelijk is zijn de PAGW (Programmatische Aanpak Grote Wateren)-projecten¹². Die hebben veelal geen (of een kleine) kenniscomponent.

Benadrukt wordt dat het niet alleen om technische aspecten gaat. Op allerlei plaatsen wordt gesproken over de strategie die Nederland moet volgen bij veel snellere zeespiegelstijging. Concrete locaties waar de kracht van 'op natuur en sediment gebaseerde oplossingen' getoond worden helpen daarin. De verandering in opinie van lokale stakeholders over de Zandmotor illustreert dat (van argwaan tot trots over het project).

¹¹ Met financiering door specifiek daarvoor ruimte biedende geldstromen / fondsen.

¹² Maar merk op dat deze projecten meestal geen suppleties omvatten

6 Referenties

Arcadis (2017). Zandwinning Noordzee 2018-2027. Rapportage Arcadis en Wageningen Marine Research.

Arcadis (2022). TKI Dutch Coastline Challenge. Vergunbaarheid suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden kustonderhoud. Arcadis rapport D10046428:173.

Dean, R. G. (2003). Beach Nourishment: Theory and Practice, World Scientific.

Röbke, B., Vet, L. de, Santinelli, G. en Meijer-Holzhauer, H. (2021). TKI Dutch Coastline Challenge – Werkpakket 1. Systeemkennis morfologie en toekomstprojectie suppletieopgave voor de kustvakken Noord-Holland en Texel. Deltares rapport 11207047-001-HYE-0001.

Gielen, C. (2023, in preparation) Bypass sandy solutions and assessing ecological impact. MSc thesis, Delft University of Technology.

Groen, F. de, Zelst, V. van, Valk, L. van der, & Arens, B. (2019). Natuurlijk Veilig door Kust- en Zeereepbeheer. Deltares rapport.

Herman, P., Huisman, B., & Prins, T. (2022). Natuurlijk Veilig - Cumulatief effect van zandsuppleties op sediment en bodemdieren. Deltares rapport 11205236-004-ZKS-0001.

Hombergen, L. & De Koning, J. (2022). TKI-DCC Notitie WP 4. Samenwerkings- en contractvormen. Memo.

Huisman, B. J., Walstra, D. J. R., Radermacher, M., de Schipper, M. A., & Ruessink, B. G. (2019). Observations and modelling of shoreface nourishment behaviour. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3), 59.

Huisman, B.J.A., Wijsman, J.W.M., Arens, S.M., Vertegaal, C.T.M., van der Valk, L., van Donk, S.C., Vreugdenhil, H.S.I. & Taal., M.D. (2021). Evaluatie van 10 jaar Zandmotor. Deltares rapport.

Ijff, S. D., Smits, B., van Zelst, V., & Arens, B. (2019). Natuurlijk Veilig - Landschapsvormende processen. Deltares rapport.

Ijff, S.D. (2023) Resultaten TKI-DCC Werkpakket 5: Waardering van alternatieven toekomstig kustonderhoud. Deltares memo.

Ijzendoorn, C.O. van, de Vries, S., Hallin, C., Hesp, P.A. (2021). Sea level rise outpaced by vertical dune toe translation on prograding coasts. *Nature portfolio, scientific reports*. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92150-x>.

Lesser, G.R. (2009). An approach to medium-term coastal morphological modelling, PhD dissertation, Unesco-IHE Institute for Water Education and Delft University of Technology, The Netherlands.

Luijendijk, A. P., Ranasinghe, R., de Schipper, M. A., Huisman, B. A., Swinkels, C. M., Walstra, D. J. R., & Stive, M. J. F. (2017). The initial morphological response of the Sand Engine: A process-based modelling study. *Coastal Engineering*, 119, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.09.005>

Luijendijk, A. P., de Schipper, M. A., & Ranasinghe, R. (2019). Morphodynamic acceleration techniques for multi-timescale predictions of complex sandy interventions. *Journal of marine science and engineering*, 7(3), 78. <https://doi.org/10.3390/jmse7030078>

Röbke, B., Van der Spek, A. en Santinelli, G. (2023) TKI Dutch Coastline Challenge project – Toepasbaarheid van alternatieve onderhoudsconcepten/-methoden langs de Nederlandse kust. Deltares rapport.

Roest, B., de Vries, S., de Schipper, M., & Aarninkhof, S. (2021). Observed changes of a mega feeder nourishment in a coastal cell: Five years of sand engine morphodynamics. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(1), pp. 1–24.
<https://doi.org/10.3390/jmse9010037>

Rijkswaterstaat (2019). Bedrijfsinformatie, beheer- en onderhoudsstrategie, objectbeheerregime kustfundament.

Rijkswaterstaat (2020). Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust. Rijkswaterstaat rapport.

de Schipper, M.A., de Vries, S., Ruessink, B.G., de Zeeuw, R.C., Rutten, J., van Gelder-Maas, C., Stive, M.J.F. (2016). Initial spreading of a mega feeder nourishment: observations of the sand engine pilot project, *Coast. Eng.* 111, pp. 23-38.

Taal, M. (2018). Memo. Beoordeling innovatieve kustlijnzorg: omgevingswaarde.

Taal et al. (in prep). Rapportage Kennisprogramma Zeespiegelstijging, Zandige Kust.

Technische Universiteit Delft (2023a). Inventarisatie kustonderhoudsconcepten voor de Dutch Coastline Challenge. Memo TU Delft.

Technische Universiteit Delft (2023b). TKI Dutch Coastline Challenge: Description of the setup of the Delft3D Flexible Mesh model and validation of the hydrodynamics. Memo TU Delft.

Technische Universiteit Delft (2023c). TKI Dutch Coastline Challenge: Evaluation of the morphological predictive skills of the Delft3D FM model based on simulations of the Sand Engine. Memo TU Delft.

Technische Universiteit Delft (2023d). Morphological and ecological indicators for the Dutch Coastline Challenge nourishment evaluation. Memo TU Delft.

Technische Universiteit Delft (2023e). TKI Dutch Coastline Challenge: morphological and ecological evaluation of nourishment concepts. Memo TU Delft.

Tonnon, P. K., Huisman, B. J. A., Stam, G. N., & Van Rijn, L. C. (2018). Numerical modelling of erosion rates, life span and maintenance volumes of mega nourishments. *Coastal Engineering*, 131, pp. 51-69.

Van Duin, M. J. P., Wiersma, N. R., Walstra, D. J. R., Van Rijn, L. C., & Stive, M. J. F. (2004). Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, *The Netherlands. Coastal Engineering*, 51(8-9), pp. 813-837.

Van Zanten, S. C. (2016). Towards engineering the ecosystem services of a mega-nourishment A forecast of the ecosystem service dynamics of the Sand Motor. MSc thesis, Delft University of Technology.

Vereniging van Waterbouwers (2023). Dutch Coastline Challenge. Uitvoeringsmethoden (werkpakket 3). Vereniging van Waterbouwers rapport.

Walstra, D-J. (2017). KPP – B&O Kust; Product H. Modelontwikkeling voorspelling (vooroever) suppleties. Memo Deltares aan RWS-WVL.

A Afkortingenlijst

AUMD	Autonomous Underwater Maintenance Dredger
BKL	Basiskustlijn
BPKV	Beste Prijs Kwaliteit Verhouding
DCC	Dutch Coastline Challenge
DCSM	Dutch Coastal Shelf Model
DTS	Deltares
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
IKZ	Innovaties in de Kustlijnzorg
KG2.0	Kustgenese 2.0
KIA	Kennis- en Innovatie Agenda
MDO	Marine Diesel Oil
MER	Milieueffectrapportage
MKI	Milieukostenindicator
PAGW	Programma Aanpak Grote Wateren
PPS	Publiek Private Samenwerking
RWS	Rijkswaterstaat
TKI	Topconsortia voor Kennis en Innovatie
TRL	Technical Readiness Level
TUD	Technische Universiteit Delft
VVW	Vereniging van Waterbouwers
WnB	Wet Natuurbescherming
WP	Werkpakket
ZED	Zero Emission Dredging

B Overzicht kennisleemten

Tijdens het onderzoek kwamen punten naar voren waar verdere ontwikkeling van kennis van het kuststelsel, modelleren, suppletietechnieken en contracten gewenst is. Rapportering hierover vindt plaats in de eindrapporten van de werkpakketten.

In dit syntheserapport past een analyse van de benodigdheden en mogelijkheden in relatie tot een vervolg als in hoofdstuk 5 is besproken. Dat volgt hieronder, evenals een beschouwing over de stappen in innovatie die, volgens dit rapport, verdere opschaling van emissievrije kustlijnverzorging bemoeilijken. De verdere uitwerking ligt echter buiten de scope van dit project.

B.1 Kennisleemten die specifiek passen bij een vervolgproject

Hieronder volgen drie, meer integrale, kennisvragen, passend bij de ontwikkeling van een 'living lab' voor emissievrij kustonderhoud en volgend uit het onderzoek in dit project. In de opsomming is geen prioritering besloten.

1. Hoe de maatschappelijke meerwaarde te bepalen van grootschaliger suppleties?

Vraagstuk:

Wat is de maatschappelijke meerwaarde van andere, veelal grotere, suppleties waarbij investeringen in zand voor de BKL-zone eerder in de tijd worden gedaan?

Toelichting:

Hiermee is door de Zandmotor bij Delfland ervaring opgedaan. De bijdrage aan welzijn en welvaart was nog lastig te evalueren. Denk hierbij aan het waarderen van de bijdrage van grootschaliger suppleties ten opzichte van reguliere suppleties aan de belevingswaarden van lokale stakeholders, de (internationale) concurrentiepositie van de Nederlandse water-(bouw)sector en de "tijdsame kennisontwikkeling" met het oog op versnelde zeespiegelstijging. Ook in dit project was het erg moeilijk de doelstelling 'bijdragen aan bredere welvaart / maatschappelijke meerwaarde creëren' goed te evalueren.

Kansen / weg vooruit:

Onderzoek in een kennisalliantie naar het verdienvermogen en bijdragen aan welzijn van andere vormen van kustonderhoud. Voor toekomstige Maatschappelijke Kosten Baten Analyses (MKBA) die de investeringsbeslissing voor grootschaliger suppleties onderbouwen zullen deels aannames moeten worden gedaan. Een goed doordacht monitorings- en kennisprogramma gekoppeld aan de uitvoering van een eerste stap (pilot, proeftuin) kan helpen om deze aannames te toetsen en verbeteren. Dit vraagt een uitgebreidere opzet van onderzoek naar waardering en gebruik dan in het verleden (b.v. Zandmotor) is gebeurd. Voor de financiering van een dergelijk monitorings- en kennisprogramma is het mogelijk aan te sluiten bij onderzoeken die onder het groeifonds of EcoShape worden uitgevoerd.

2. Hoe de effectiviteit van morfologische modelstudies van suppleties te verhogen?

Vraagstuk:

Op welke wijze kan met modelonderzoek worden bijgedragen aan betere planning en ontwerp van kustonderhoud / suppleties?

Toelichting:

In dit project is getracht te onderzoeken of andere vormen van suppleties mogelijk zijn en te evalueren hoe de verspreiding van het zand bijdraagt aan gebruiksfuncties. Het bleek enerzijds lastig om de eisen vanuit gebruiksfuncties goed in indicatoren te vertalen, maar anderzijds nog lastiger om vervolgens die indicatoren met voldoende zekerheid te berekenen via een modelstudie. Dit laatste met name doordat de kustdwarse verspreiding van zand notoir lastig te modelleren is. Modelmatige bevindingen vragen daarom vrijwel altijd om een empirische toetsing in de praktijk.

Kansen / weg vooruit:

Een betrouwbaar modelinstrumentarium kan helpen om vooraf afwegingen te maken tussen verschillende (combinaties van) suppleties. Het extra begrip van de kustdwarse fysieke

processen dat nodig is om de verspreiding van (met name) vooroeversuppleties beter te kunnen voorspellen vraagt om fundamenteel onderzoek: combinatie van veldmetingen, schaalmodellen en gedetailleerde CFD (Computational Fluid Dynamics) berekeningen. Monitoring van het gedrag van suppleties in een 'living lab' kan hiervoor de benodigde validatiedata uit het veld toeleveren.

Behalve het oppakken van deze uitdaging in de modellering lijkt het verstandig te onderzoeken welke onzekerheden in het gedrag van suppleties nu daadwerkelijk de besluitvorming in het kustonderhoud bemoeilijken. Hoe worden morfologische indicatoren (en de bandbreedte in de uitkomsten daarvan) in de praktijk gebruikt?

3. Hoe passen verschillende beleidsdoelen, op korte en lange termijn, beter in een strategie?

Vraagstuk:

Het kustonderhoud heeft ondertussen al een doelstelling op korte en lange termijn, maar in de besluitvorming is het al dan niet overschrijden van de BKL leidend. Is het wenselijk en mogelijk hiervan af te wijken om tot duurzamer kustonderhoud te komen?

Toelichting:

Megasuppleties op de vooroever lijken een kansrijk alternatief voor reguliere suppleties vanuit het perspectief van kosten en emissies, maar het duurt even voor dat zand de kustlijn voedt, waardoor de BKL tijdelijk overschreden kan worden of aanvullende strandsuppleties nodig zijn (met hogere kosten en emissies). Is dit laatste wel noodzakelijk in zo'n geval?

Verder lijkt het dat de verspreiding van suppleties in kustlangse richting langzaam gaat. Een grote suppletie voedt ook na tien jaar nog pas een beperkt deel van de kust.

Kansen / weg vooruit:

In dit project is beperkt gevarieerd en geoptimaliseerd met verschillende dimensies en combinaties van mega- en reguliere suppleties. Er kan verder onderzocht worden, bij voorkeur bij een concreet ruimtelijk vraagstuk langs de kust, welke dimensies van een suppletie zorgen voor de grootste bijdrage aan de gebruiksfuncties in kustlangs bereik. En wat zijn de kosten en baten van verschillende (combinaties van mega- en reguliere) suppleties voor onderhoudstermijnen van b.v. 10-20-30 jaar?

Dit is niet alleen een technisch vraagstuk, maar ook een vraagstuk van combineren van doelstellingen van meerdere beheerders en meerdere agenda's. Mocht er een initiatief ontstaan (zie suggesties gedaan in hoofdstuk 5) waarin 'zand dat in de toekomst nodig is, nu al wordt aangebracht' dan is dit ook een uitgelezen kans om de besluitvorming daarvan, de rol van kennis daarin en de betrokkenheid van stakeholders te onderzoeken.

B.2 Innovatiebehoefte om tot verder opschalen emissievrije kustlijnzorg te komen

Dit project heeft zich voor een belangrijk deel gericht op de mogelijkheden die er zijn tot een emissiearme of -vrije vorm van kustonderhoud te komen. Hieronder volgen vier punten waarop duidelijk behoefte was tot ondersteuning van innovaties hierin. Onderstaande punten kunnen worden gekoppeld aan onderzoek in een kennisalliantie bij een praktijkproef, maar kunnen deels ook voorafgaand of parallel daaraan worden opgepakt.

- **Beperkt duurzaam materieel voor strandsuppleties:** De emissievrije opties die er nu zijn, zijn vooral geschikt voor vooroeversuppleties. Innovaties die voor strandsuppleties geschikt zijn vragen veel energie voor het persen van zand. Ze brengen daarom ook hogere kosten met zich mee (2 à 3 keer zoveel als bij conventionele strandsuppleties). In de huidige strategie van kustonderhoud blijven strandsuppleties nodig. Hoe gaan we de strandsuppleties van de toekomst aanleggen zodat ze duurzaam, uitvoerbaar en betaalbaar zijn?
- **Langzaam suppleren:** Een alternatief dat gaandeweg het project wel is geopperd maar niet is uitgewerkt, is 'langzaam suppleren'. Dit is het langzamer varen en meer geleidelijk uit laten stromen van suppletiezand dan het huidige 'klappen'. Dit brengt minder emissies met zich mee en naar verwachting zijn de negatieve ecologische effecten ook kleiner (minder bedelving). Het duurt wel langer en zal daardoor kostbaarder zijn. Hoe verhouden kosten en baten zich werkelijk en moet deze innovatie in de uitvoering verder onderzocht worden?

- **Infrastructuur voor duurzame energiedragers:** In dit project is niet gekeken naar de (bunker)infrastructuur die nodig is om de *'hopper van de toekomst'* van duurzame energiedragers te voorzien. Wat zijn logische locaties (bijvoorbeeld in havens of bij offshore windparken) voor de (bunker)infrastructuur voor nieuwe energiedragers voor het Nederlandse kustonderhoud, in relatie tot vaarafstanden en kosten? En hoe kan hierbij de "nieuwe werkwijze" worden geoptimaliseerd?
- **Rekenmethode voor kosten en MKI voor duurzame energiedragers:** Het bepalen van de kosten en MKI van duurzame toekomstige brandstoffen zoals waterstof en methanol is nog niet zover dat hier een eenduidige rekenmethode voor is vastgelegd. Dit komt door het ontbreken van informatie over bijvoorbeeld te hanteren brandstofprijzen voor schepen of onvolledige uitgewerkte Life Cycle Analyses (LCA's). Dit soort informatie zou, met de waterbouwsector samen, verder ontwikkeld kunnen worden. Denk hierbij aan het daadwerkelijk meten van emissies "aan de pijp" (o.a. CO₂, stikstof, fijnstof) en geluidproductie bij inzet van nieuw materieel.

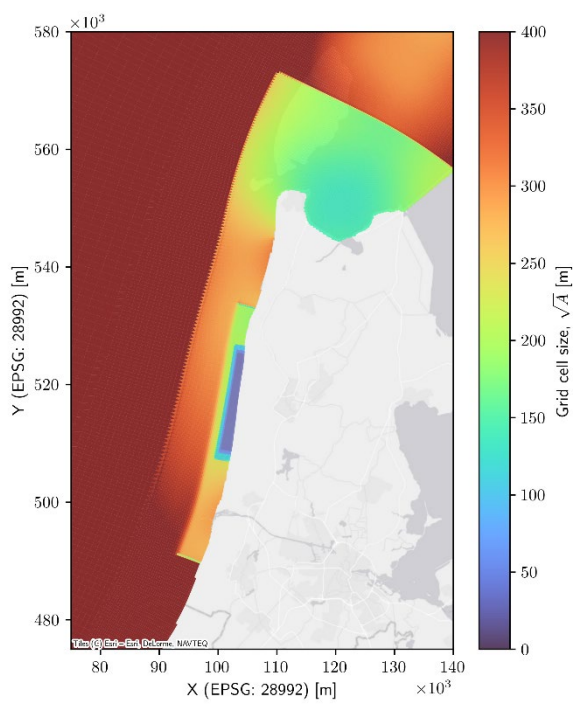
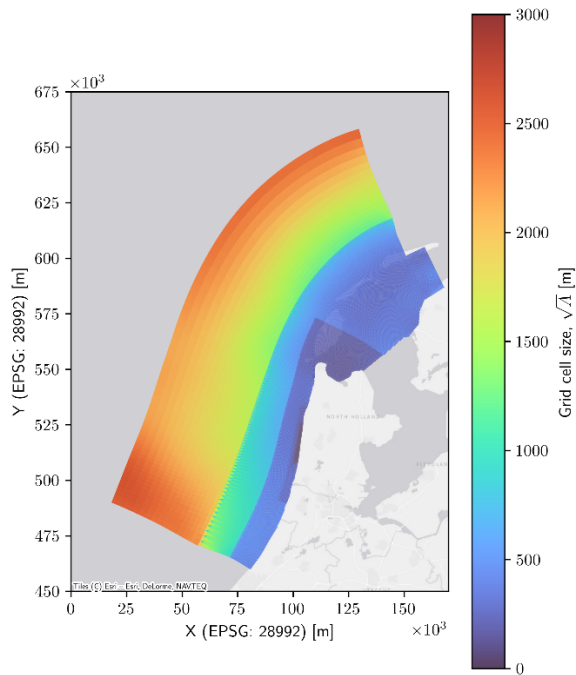
C Simuleren van suppletieconcepten met numeriek model

Om suppletieconcepten met elkaar te vergelijken op concrete locaties en voldoende inzicht te hebben in de effecten op gebruiksfuncties, is goed modelinstrumentarium nodig. Eén van de taken van werkpakket 2 was daarom het evalueren van de huidige morfologische voorspelkracht voor suppleties. Hierom is een numeriek model opgezet met de nieuwste simulatiesoftware (Delft3D Flexible Mesh, hierna Delft3D-FM). De verwachting was dat dit verbeteringen kan opleveren in meerjarige morfologische voorspellingen (doel ca. 10 jaar) in het projectgebied omdat rekenroosters flexibel, en daarom ook lokaal, verfijnd kunnen worden. Het numeriek reproduceren van morfologisch gedrag in de brandingszone is tot nu toe notoir lastig gebleken (zie o.m. Walstra, 2017). Desalniettemin lieten Luijendijk et al. (2017, 2019) en Roest et al. (2021) veelbelovende resultaten zijn voor de reproductie van de ontwikkeling van de Zandmotor bij Delfland (na 1 jaar) met een Delft3D model met curvilineaire rekenroosters (de voorganger van Delft3D-FM).

Deze bijlage vat de resultaten samen van de inspanning om die stap daadwerkelijk te realiseren. Het vat twee memo's samen, gericht op de opzet van het morfologische model (zie Technische Universiteit Delft, 2023b) en de evaluatie van de morfologische voorspelkracht (Technische Universiteit Delft, 2023c).

Het ontwikkelde morfologisch model voor de kust tussen IJmuiden en Texel

Er is een gekoppeld dieptegemiddeld Delft3D-FM model opgezet voor hydrodynamica (D-Flow module) en golven (D-Waves module) dat de waterbeweging beschrijft onder invloed van getij, wind en golven. Op basis van de waterbeweging is vervolgens sedimenttransport en morfologie gesimuleerd. Het model beslaat een breder gebied dan het studiegebied zelf: de Hollandse kust vanaf de haven van Scheveningen en de westelijke Waddenzee en reikt tot 70 km offshore (zie Figuur 6-1). De randvoorwaarden voor de wind en de golven zijn afgeleid van ECMWF en ERA5. De sedimenteigenschappen zijn gelijk gekozen als Luijendijk et al. (2017) met als korrelgrootte 250 μ m. Voor de 10-jarige morfologische simulaties zijn gecomprimeerde tijdseries gebruikt en een morfologische versnellingsfactor (MorFac) van 4. Om suppletieconcepten goed onderling met elkaar te kunnen vergelijken zijn alle varianten op dezelfde locatie rondom Egmond gemodelleerd. Ter plekke is het rekenrooster verfijnd tot een resolutie van ~40m en ~20m kustdwars per roostercel in de brandingszone voor respectievelijk het D-Waves golfmodel en het D-flow model (zie Figuur 6-1). Dit gebeurde om de effecten van golfbreking goed te kunnen simuleren .



Figuur 6-1: Delft3D-FM model voor de Hollandse Kust en westelijke Waddenzee (links) en ingezoomd op de kust rond Egmond met een steeds fijnere roosterresolutie van offshore naar de kust.

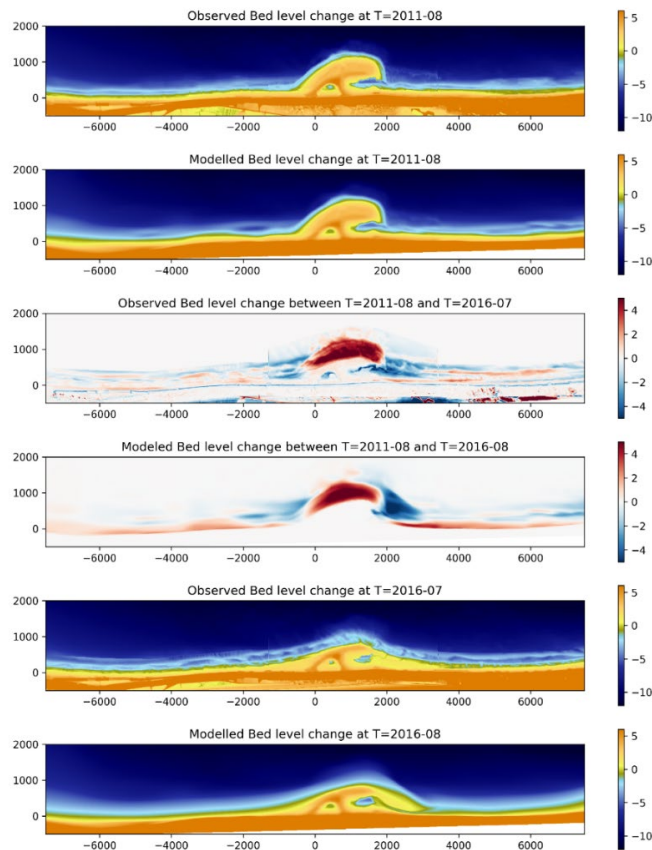
Validatie van hydrodynamica en golven

De hydrodynamische voorspelkracht is gevalideerd door getijcomponenten (in amplitude en fase) en spectrale golfparameters (significante golfhoogte en golfperiode) te vergelijken met meetpunten (zie Technische Universiteit Delft, 2023b). Voor het dominante M_2 -getij wijken de gemodelleerde getijamplitudes minder dan 6% en de getijfasen minder dan 10 graden af voor vrijwel alle meetpunten. Voor de spectrale golfparameters is er een afwijking (Root Mean Square Error, RMSE) van ~ 22 - 27 cm in significante golfhoogte en ~ 0.8 - 1.6 s in golfperiode ($T_{m-1,0}$). Het model neigt de hogere golven te onderschatten. Dit is waarschijnlijk gerelateerd aan de relatief grove resolutie van het ECMWF model dat is gebruikt om de randvoorwaarden

af te leiden. Op basis van voorafgaande is de conclusie getrokken dat het hydrodynamisch model voldoende is voor een vergelijking van suppletieconcepten.

Validatie van morfologische voorspelkracht

De validatie van de morfologische voorspelkracht gebeurt idealiter via een vergelijking van de bodemontwikkeling op meerdere punten in de tijd met een gemeten bodemontwikkeling. Voor de kust tussen IJmuiden en Texel zijn echter alleen de jaarlijkse JARKUS metingen, langs raaien dwars op de kust, beschikbaar. Dit is helaas een onvoldoende gedetailleerd beeld van het gedrag van een suppletie voor een dergelijke validatie. Voor de Zandmotor in Delfland zijn dergelijke metingen wel beschikbaar (zie o.a. De Schipper et al., 2016). De morfologische voorspelkracht is daarom geëvalueerd met een Delft3D-FM model voor de Zandmotor (deels gebaseerd op het curvilineaire model van Luijendijk et al, 2019). Om de modelprestaties zo goed mogelijk te kunnen beoordelen zijn de roosterresolutie, gebruikte bronnen voor de randvoorwaarden en modelinstellingen zoveel mogelijk gelijk gehouden aan die van het model voor Egmond (Noord-Holland). Onder de aanname dat condities en karakteristieken voor Delfland en Egmond vergelijkbaar zijn geeft dit een indicatie van de morfologische voorspelkracht.



Figuur 6-2: Vergelijking tussen de gemeten en gesimuleerde morfologische ontwikkeling van de Zandmotor bij Delfland voor de initiële bodem (boven), de bodemverandering na 5 jaar (midden) en de bodem na 5 jaar (onder). NB: de kustlijnoriëntatie is geroteerd voor de presentatie van de resultaten. Assen zijn in meters, kleuren in de bodemligging figuren in m NAP.

Figuur 6-2 vergelijkt de gemodelleerde en gemeten morfologische ontwikkeling van de Zandmotor bij Delfland na een periode van 5 jaar. Op het oog komen de resultaten behoorlijk goed overeen. Dat volgt ook uit een diepgaandere analyse van de resultaten. In Technische Universiteit Delft, 2023c wordt getoond dat het model zowel het kustdwarse als het kustlangse gedrag van de ontwikkeling van de Zandmotor goed representeert. De analyse toont echter ook dat het model de balans van de kustdwarse processen die nodig zijn voor het gedrag van ondieptes (bv vooroever suppleties of brekerbanken) niet goed kan reproduceren. Eerder werk van Van Duin et al. (2004) heeft dit ook laten zien. Dit is deels het gevolg van de dieptegemiddelde en golfgemiddelde modelaanpak, waardoor dieptevariaties in de stroming

en het sediment transport niet worden meegenomen naast de uitwisseling met het droge strand. Het is echter vooral ook een kennisleemte die vraagt om een fundamentele studie om inzicht en modelprestaties in de kustdwarse processen te vergroten.

Bij grootschalige interventies en/of interventies die voornamelijk op langtransport zijn ontworpen zoals de Zandmotor bleek dit geen grote invloed te hebben op de reproductie van het gedrag. Dit zal echter anders zijn bij kleinschaliger suppleties (zoals reguliere vooroeversuppleties). Waar interventies minder groot zijn worden de beperkingen in het simuleren van kustdwarse processen belangrijker en moet geconcludeerd worden dat de kennis over aggregeren van kustdwarse processen in het model nog steeds onvoldoende is om verspreiding van suppleties en bankgedrag in deze kustdwarse richting te voorspellen. In het vergelijken van suppletieconcepten is het daarom van belang om deze tekortkoming impliciet mee te nemen (zie volgende sectie).

Verbeteren rekentijden

Naast een goede reproductie van de morfologische resultaten is met de inzet van de nieuwe software ook beoogd de rekentijden van de grootschalige morfologische simulaties te reduceren. Dit is niet goed gelukt, om meerdere redenen:

- Morfologische versnellingsstechnieken als MorMerge (Lesser, 2009) bleken nog niet compatibel met de Delft3D-FM software, waardoor het model is geforceerd met gecompriemde meerjarige tijdseries die niet konden worden onderverdeeld over verschillende computerprocessoren.
- Bij geparalleliseerd rekenen op meerdere processoren vertoonde de D-Waves module instabiliteit, waardoor lineair is gerekend en de rekentijden opliepen;
- De grootte ruimtelijke schaal van het model in combinatie met de meerjarige forcering in tijdseries leidden behalve tot grotere rekentijden ook tot modelinstabiliteit.

Een groot deel van deze beperkingen is vermoedelijk weg te nemen door te werken aan de doorontwikkeling/verbetering van de Delft3D-FM software en te werken met een kleiner modeldomein dat een deel van het projectgebied beslaat.

De voorspelkracht van suppletieconcepten

Voorgaande literatuur laat zien dat numerieke modellen en vuistregels kunnen worden ingezet voor het voorspellen van suppletiegedrag, zie o.a. Dean (2003), Tonnon et al. (2018), Huisman et al. (2019) en Luijendijk et al. (2019). Voor een belangrijke parameter, het resterende suppletievolume in een gesuppleerde kustsectie, is het mogelijk om goede meerjarige voorspellingen te maken. In dit project is een belangrijke stap gezet om het instrumentarium verder uit te breiden en het langjarig voorspellen van suppleties op grote schaal m.b.v. ongestructureerde rekenroosters mogelijk te maken. Het ontwikkelde Delft3D FM model heeft een goede voorspelkracht voor de verliezen bij een geconcentreerde mega suppletie en de kustlangse verspreiding. Voor een Zandmotor casus is het verschil tussen de waargenomen en voorspelde verliezen over 5 jaar ontwikkeling minder dan 15% bij een volume verandering van 4 miljoen m³.

Voor de kustdwarse ontwikkeling van suppleties zijn gebruikelijke rekenregels en éénlijnsmodellen ongeschikt. Het Delft3D FM model zoals hier gebruikt geeft daarover in kwalitatieve zin (en gecombineerd met het expert inschattingen) informatie. Voor een volledige voorspelling van het kustdwarse gedrag ontbreekt het op dit moment aan het goede kennisbasis die de verschillende dwarsdomeinen (vooroever, brandingszone, strand en duinen) aan elkaar verbindt.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl