

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Systemanalyse Zandige Kust

Effect van zandsuppleties op functies in de kustzone bij toenemende zeespiegelstijging

RWS INFORMATIE

Systeemanalyse Zandige Kust

Effect van zandsuppleties op functies in de kustzone bij toenemende zeespiegelstijging

Kennisprogramma Zeespiegelstijging

Datum	25 November 2024
Versie	1.0
Status	Definitief

Colofon

Deze publicatie maakt deel uit van het **Kennisprogramma Zeespiegelstijging**, een initiatief van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat en de Deltacommissaris. Het programma levert kennis op over de gevolgen van zeespiegelstijging en hoe Nederland daarmee kan omgaan. Deze kennis wordt gebruikt bij de herijking van het Deltaprogramma in 2026.

Meer informatie over het kennisprogramma en een overzicht van alle publicaties staat op **kennisprogrammazeespiegelstijging.nl**.

Uitgegeven door Kennisprogramma Zeespiegelstijging

In opdracht van Rijkswaterstaat WVL

Datum	25 November 2024
Versie	1.0
Status	Definitief

Effect van zandsuppleties op functies in de kustzone bij toenemende zeespiegelstijging

Rijkswaterstaat

25 november 2024 - Public

Contactpersonen

JELMER CLEVERINGA
Senior Advisor Coastal
Morphodynamics

M +31 (0)650736850

Arcadis Nederland B.V.
Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland

Samenvatting

Het Kennisprogramma Zeespiegelstijging beschouwt hoe houdbaar de huidige zandige strategie is bij toenemende versnelde zeespiegelstijging. Bij versnelde zeespiegelstijging nemen de suppletievolumes toe om aan de beleidsdoelstellingen te blijven voldoen. De berekende omvang van de toename verschilt voor de drie deelgebieden (Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust) en staat in Tabel 1-1. De omvang van de reguliere strand- vooroever- en geulwandsuppleties kan niet onbeperkt toenemen, zodat bij versnelde zeespiegelstijging ook systeemsuppleties in de vorm van zandmotoren en suppleties op de buitendelta's nodig worden.

Tabel 1-1 Suppletievolumes per jaar per deelgebied voor vier zeespiegelstijgingsscenario's.

Scenario	Waddenkust (Mm ³ /yr)	Hollandse kust (Mm ³ /yr)	Deltakust (Mm ³ /yr)
Huidig	5,7	3,1	2,2
Laag	11,3	n.v.t. (gelijk aan huidig)	n.v.t. (gelijk aan huidig)
Hoog	18,8	4,4	3,3
Hoog/extreem	26,4	5,8	5,1
Extreem	35,9	7,7	7,3

Aanpak

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de drie deelgebieden (Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust). Voor de deelgebieden zijn geschematiseerde kustgebieden opgesteld, waarvan de kenmerken, zoals de lengte en het huidige suppletievolume, zijn ontleend aan bestaande kustvakken. Het bepalen van de effecten is stapsgewijs opgebouwd.

Stap 1 vergelijkt de omvang van de (jaarlijks gemiddelde) suppletievolumes na verlengende maatregelen van de bestaande strategie (1) en na de inzet van systeemsuppletie (strategie 2) met benodigde zandvolume voor de scenario's van zeespiegelstijging. Strategie omvat de reguliere onderwatersuppleties, strandsuppleties en geulwandsuppleties, met verlengende maatregelen in de vorm van het vergroten van het suppletievolume ter plaatse van de locaties waar al wordt gesuppleerd, het verhogen suppletiefrequentie en het uitbreiden van aantal suppletielocaties langs de kustlijn. Strategie 2 bestaat uit de inzet van zandmotoren en buitendeltasuppleties.

Stap 2 bestaat uit het bepalen van de effecten. Voor de basisindicatoren CO₂ uitstoot, beïnvloede kustoppervlakte en bodemdieren zijn op basis van eerder bepaalde kengetallen voor de verschillende suppletietypen de waarden berekend. Voor de factoren vogels, habitat, biodiversiteit, connectiviteit en strandtourisme is op basis van expert judgement bepaald welke effecten optreden en hoe deze zich verhouden tot de effecten van andere scenario's.

Tipping points.

De uitkomst van stap 1 geeft antwoord op de onderzoeksvraag over het optreden van 'tipping points' in het beheer van de kust bij versneld stijgende zeespiegelstijging: *Zijn er bij het toenemen van de suppletievolumes situaties aan te geven waarbij de bestaande strategie (de huidige wijze van suppleren) niet meer volstaat en een overgang naar verlengende maatregelen nodig is?* Het antwoord op deze vraag staat in Tabel 1-2, waarin in zichtbaar is dat voor de drie deelgebieden het duidelijk verschilt bij welk scenario een stap moet worden gezet naar verlengende maatregelen en naar strategie 2. Bij de Hollandse kust hoeft geen stap te worden gezet naar strategie 2, terwijl voor de Waddenkust deze stap al nodig wordt bij het scenario hoog. De Deltakust zit hier tussenin. Bij de Waddenkust is met de gehanteerde aannames de overstap naar strategie 2 nog niet voldoende om de zandvolume te suppleren die daar nodig zijn.

Tabel 1-2 Overzicht van de verschillende verlengende maatregelen en strategieën voor de drie deelgebieden van de kust voor de scenario's. Hoe donkerder de kleur, hoe groter het effect.

Scenario	Waddenkust	Deltakust	Hollandse kust
Huidig	Strategie 1 (huidig) + uitbreiding volume + verhogen suppletiefrequentie	Strategie 1 (huidig)	Strategie 1 (huidig)
Laag	+ Uitbreiden suppletielocaties	Strategie 1 (huidig)	Strategie 1 (huidig)
Hoog	+ Strategie 2	Strategie 1 (huidig) + uitbreiding volume + verhogen suppletiefrequentie	+ uitbreiding volume
Hoog/Extreem	+ Strategie 2 (tekort)	+ Uitbreiden suppletielocaties + Strategie 2	+ verhogen suppletiefrequentie
Extreem	+ Strategie 2 (tekort)	+ Uitbreiden suppletielocaties + Strategie 2	+ Uitbreiden suppletielocaties

Stap 2 geeft antwoord is gegeven op de hoofdonderzoeksvraag: *Wat zijn de effecten op de diverse functies van de kust bij de specifieke suppletiestrategieën? Ook de deelvraag Zijn er bij het toenemen van de suppletievolumes gevolgen aan te geven die sterk afwijken van de huidige situatie.* De berekende en beredeneerde effecten zijn in samengevatte vorm overgenomen in Tabel 1-3. Logischerwijs is bij het toenemen van het gesuppleerde zandvolume sprake van steeds grotere effecten. De benodigde zandvolumes zijn het grootst zijn voor de Waddenkust, zodat de effecten daar ook het grootst zijn. Voor de Hollandse kust zijn de effecten het beperktst. Voor de ecologische effecten geldt dat de toename in de beïnvloede oppervlakte en de verhoogde suppletiefrequentie leidt tot meer bedekt oppervlak en een toename van de frequentie van de bedekking en de verstoring.

Tabel 1-3 Overzicht van de effecten op de indicatoren op hoofdlijnen voor de drie deelgebieden van de kust voor de scenario's. Hoe donkerder de kleur, hoe groter het effect.

Scenario	Waddenkust	Deltakust	Hollandse kust
Huidig	CO ₂ : 0,018 Ecologie: -- Toerisme: 0	CO ₂ : 0,010 Ecologie: - Toerisme: 0	CO ₂ : 0,011 Ecologie: - Toerisme: 0
Laag	CO ₂ : 0,036 Ecologie: --- Toerisme: -	CO ₂ : 0,010 Ecologie: - Toerisme: 0	CO ₂ : 0,011 Ecologie: - Toerisme: 0
Hoog	CO ₂ : 0,056 Ecologie: --- Toerisme: -	CO ₂ : 0,015 Ecologie: -- Toerisme: -	CO ₂ : 0,016 Ecologie: -- Toerisme: 0
Hoog/Extreem	CO ₂ : 0,063 Ecologie: ----- Toerisme: -	CO ₂ : 0,022 Ecologie: -- Toerisme: --	CO ₂ : 0,021 Ecologie: -- Toerisme: 0
Extreem	CO ₂ : 0,063 Ecologie: ----- Toerisme: -	CO ₂ : 0,026 Ecologie: -- Toerisme: ---	CO ₂ : 0,027 Ecologie: -- Toerisme: -

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
1 Inleiding	7
1.1 Aanleiding	7
1.2 Vraagstelling en doelstelling	7
1.3 Definities	7
2 Methode	9
2.1 Stappenplan	9
2.1.1 Schematiseren	9
2.1.2 Effecten van de strategieën en varianten bepalen	11
2.2 Input voor berekening	12
2.2.1 Scenario's met suppletievolumes	12
2.2.2 Strategieën	12
2.2.3 Verlengende maatregelen	13
2.2.4 Varianten	13
3 Varianten en knikpunten	15
3.1 Waddenkust	15
3.2 Hollandse kust	17
3.3 Deltakust	19
4 Effecten op indicatoren	21
4.1 Aannames	21
4.2 Basisindicatoren	21
4.2.1 CO ₂	21
4.2.2 Beïnvloed kustoppervlakte	27
4.2.3 Bodemdieren	28
4.3 Systeemindicatoren	32

4.3.1	Vogels	32
4.3.2	Habitats	33
4.3.3	Biodiversiteit	35
4.3.4	Connectiviteit	36
4.3.5	Strandtoerisme	37
4.4	Overzicht van de effecten op de indicatoren	38
4.5	Discussie indicatoren	40
5	Conclusies	41
6	Referenties	44
	Colofon	57

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Om de kustveiligheid nu en in de toekomst te kunnen waarborgen en de overige functies van de kust (natuurbehoud en – ontwikkeling, recreatie) te handhaven worden zandsuppleties uitgevoerd. Met de zandsuppleties wordt de basiskustlijn gehandhaafd en volgt de zandvoorraad van het kustfundament de (versneld) stijgende zeespiegel. Binnen het Kennisprogramma Zeespiegelstijging wordt gekeken hoe houdbaar de huidige zandige strategie is bij toenemende zeespiegelstijging. Berekend is dat suppletievolumes dan moeten toenemen, waarbij de mate van toename verschilt per deelgebied (Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust). Ook zullen andere suppletievormen en suppletievormen nodig zijn naast de reguliere strand- vooroever- en geulwandsuppleties.

Eind 2024 rapporteert het project Zandige Kust over de houdbaarheid van de huidige suppletie strategie en de (uitvoerings-) maatregelen die mogelijk zijn om deze strategie te verlengen bij versnelde zeespiegelstijging. Van de maatregelen om de strategie te verlengen is het belangrijk om te weten wat de effecten zijn op de diverse functies in het kustgebied.

Begin 2020 heeft Arcadis een rapportage opgeleverd waarin een beoordelingsmatrix opgesteld werd waarin ecologische, sociale en economische effecten van verschillende suppletie strategieën aan de hand van een set kwantitatieve en/of kwalitatieve kust gerelateerde indicatoren worden bepaald en zo medebepalend kunnen zijn in de afweging van deze strategieën (Arcadis, 2020). De matrix geeft op een eenvoudige en integrale wijze, aan de hand van beschikbare numerieke data, de verschillende effecten van de suppletie strategieën weer en kan fungeren als een simpele tool bij de keuze voor een voorkeursstrategie. Deze matrix is toepasbaar voor suppletievolumes die niet sterk toenemen, onder abiotische condities (zeespiegelstijging, klimaat) die niet sterk afwijken van de huidige situatie, omdat de onderliggende relaties zijn afgeleid voor de vigerende omstandigheden. De bestaande beoordelingsmatrix is hierdoor niet direct toepasbaar, maar geeft het vertrekpunt voor de methode van effectbepaling op hoofdlijnen.

1.2 Vraagstelling en doelstelling

De vraag betreft het in beeld brengen van de effecten op de diverse functies van de kust van grotere suppletievolumes voor de drie deelgebieden van de Nederlandse kust (Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust) die zijn berekend voor verschillende scenario's van zeespiegelstijging.

De hoofdvraag van dit project is daarmee:

- Wat zijn de effecten op de diverse functies van de kust bij de specifieke suppletie strategieën?

Een tweede vraag gaat over het optreden van 'tipping points'. Dit betreft zowel tipping points in de strategie als in de gevolgen voor de functies. De vragen hierbij zijn:

- Zijn er bij het toenemen van de suppletievolumes situaties aan te geven waarbij de bestaande strategie (de huidige wijze van suppleren) niet meer volstaat en een overgang naar verlengende maatregelen nodig is?
- Zijn er bij het toenemen van de suppletievolumes gevolgen aan te geven die sterk afwijken van de huidige situatie?

In het voorliggende rapport worden de effecten van de toename van de suppletie behoefte bij verschillende zeespiegelstijgingsscenario's op hoofdlijnen bepaald voor de drie deelgebieden van de kust, waarbij wordt gekeken naar de huidige werkwijze voor het suppleren van zand, met verlengende maatregelen en met aangepaste strategieën.

1.3 Definities

In dit rapport worden de volgende termen gehanteerd:

- Scenario's: de verschillende verwachte suppletievolumes bij specifieke zeespiegelstijgingssnelheden.

- Strategieën: de wijze van suppleren, dit betreft de huidige strategie (1) die bestaat uit combinaties van strandsuppleties, vooroeversuppleties, geulwandsuppleties en strategie (2) met systeemsuppleties in de vorm van zandmotorconcepten en buitendeltasuppleties.
- Verlengende maatregelen: maatregelen om het huidige suppletievolume 'op te rekken' zonder direct naar een andere strategie over te stappen, bijvoorbeeld uitbreiding van aantal suppletielocaties langs de kustlijn. De verlengende maatregelen zijn een onderdeel van strategie 1.
- Varianten: combinaties van verschillende strategieën en verlengende maatregelen toegespitst op de situatie in het deelgebied.

Deze vier termen worden verder toegelicht in paragraaf 2.2.

2 Methode

2.1 Stappenplan

De methode voor het bepalen van de effecten op de diverse functies van de kust van grote suppletievolumes voor de drie deelgebieden van de Nederlandse kust (Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust) bestaat uit drie stappen:

1. Schematiseren
2. Effectberekening
3. Doorredeneren

De drie stappen worden toegelicht in onderstaande paragrafen. Een uitgebreide beschrijving staat in de bijlagen A en B.

2.1.1 Schematiseren

De drie deelgebieden (Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust) worden afzonderlijk van elkaar beschouwd op basis van drie schematische situaties. Deze versimpelde aanpak zorgt ervoor dat het complex kuststelsel navolgbaar en inzichtelijk kan worden geanalyseerd. Een belangrijke kanttekening is dat een schematische weergave per definitie een vereenvoudiging van de werkelijkheid betreft en dat de resultaten met zorg moeten worden vertaald naar de echte kust.

De output van de schematisatie is tweevoudig. Het eerste resultaat is een variant (combinatie van strategieën en verlengende maatregelen) per deelgebied waarmee per scenario invulling kan worden gegeven aan de suppletiebehoefte. Door deze varianten te vergelijken volgen per deelgebied de tipping points in suppletie strategie. De schematisatie geeft ook het ruimtebeslag en frequentie van elke variant en daarmee worden in de volgende stap de effecten voor de indicatoren berekend.

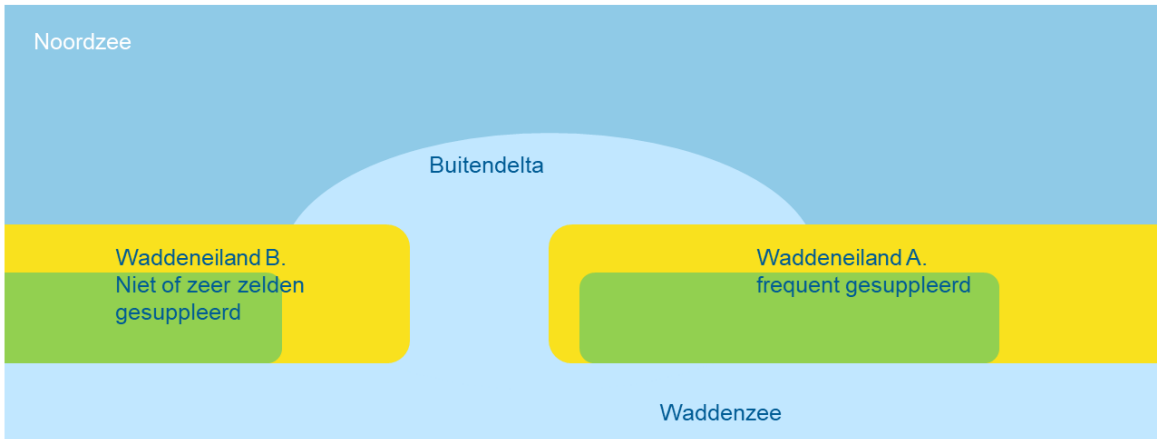
In het schematiseren zijn de volgende acht stappen gevolgd:

1. Geometrie kust en duinen voor het kustgebied;
2. Huidige suppletievolumes onderverdeeld in suppletietype (strand, geulwand en onderwater);
3. Maximaliseren verlengende maatregelen;
4. Uitbreiden systeem suppleties;
5. Conversie bepalen naar gehele kust;
6. Vergelijken met scenario's;
7. Uitkomsten interpoleren naar scenario's → varianten;
8. Per scenario schematisch oppervlakte + frequentie berekenen.

Een uitgebreide beschrijving van de stappen in de schematisatie en de input van de schematisatie is gegeven in Bijlage A.

Per deelsysteem ziet de geometrie van de geschematiseerde kust er als volgt uit:

Waddenkust (Figuur 2-1): De geschematiseerde Waddenkust bestaat uit twee Waddeneilanden met tussenliggende combinatie van zeegat en buitendelta. Op eiland A wordt in de huidige situatie vrijwel nooit gesuppleerd, terwijl op eiland B frequent wordt gesuppleerd.



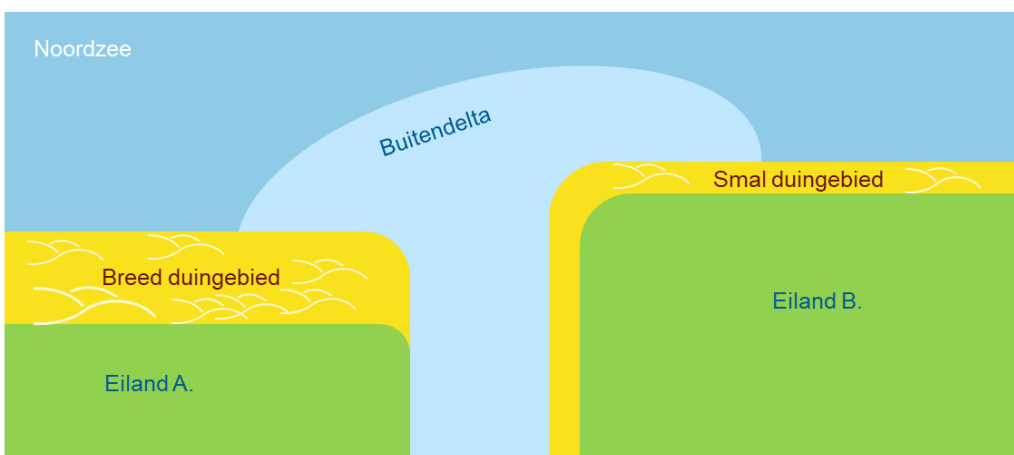
Figuur 2-1 Kaart van de geschematiseerde Waddenkust, in de vorm van twee eilanden met de tussenliggende buitendelta.

Hollandse kust (Figuur 2-2): De geschematiseerde Hollandse kust bestaat uit een rechte kust met de combinatie van een breed duingebied en een smal duingebied met een badplaats.



Figuur 2-2 Kaart van de geschematiseerde Hollandse kust.

Deltakust (Figuur 2-3): De geschematiseerde Deltakust is enigszins vergelijkbaar met de Waddenkust en bestaat uit twee (voormalige) eilanden aan beide zijden van het (voormalige) mondingsgebied (buitendelta) van een zeearm. De duingebieden zijn breed op eiland A en smal op eiland B.



Figuur 2-3 Kaart van de geschematiseerde Deltakust.

De geschematiseerde kustgebieden hebben elk gespecificeerde lengtes en breedtes die zijn afgeleid van de bestaande situatie en suppletievolumes. Ook kennen de kustgebieden een verdeling over de verschillende suppletievormen, die zijn gebaseerd op de huidige situatie. Voor elk deelgebied is op basis van berekeningen in combinatie met expert judgement uitgewerkt in hoeverre de huidige wijze van suppleren is op te rekken met verlengende maatregelen (strategie 1). Daarna is bepaald met hoeveel dit suppletievolume is uit te breiden met systeemsuppleties (strategie 2). Hieruit volgt een bepaald volume dat wordt vergeleken met de benodigde volumes van de suppletiescenario's.

De vervolgstap is om deze uitkomsten per deelgebied om te zetten in varianten. Hierbij bepalen we per scenario (hoeveelheid te suppleren volume bij bepaald zeespiegelstijgingsscenario) een passende combinatie van verlengende maatregelen onder strategie 1 en aanvullende systeemsuppleties (strategie 1 in combinatie met strategie 2).. Deze varianten zijn de input voor de volgende stap in de analyse, waarbij de varianten doorvertaald worden naar de benoemde effecten. Belangrijke parameters die uit de schematisatie volgen zijn het ruimtebeslag en frequentie van elke variant.

2.1.2 Effecten van de strategieën en varianten bepalen

De effecten worden beschouwd aan de hand van een beperkt aantal indicatoren, die zoveel mogelijk kwantitatief worden beoordeeld. De bestaande beoordelingsmatrix uit 2020 (Arcadis, 2020) is niet toepasbaar op de volumes die in het voorliggende project gehanteerd worden. Zeker voor de Waddenkust liggen de suppletievolumes ver buiten het toepassingsbereik. Het eerdere werk aan de matrix is gebruikt als basis voor de vertaling van de suppletievolumes met bijbehorend oppervlaktebeslag en suppletiefrequentie naar de indicatoren voor effecten op ecologie en menselijk gebruik. Daartoe zijn de varianten uit de voorgaande paragraaf vertaald naar uitkomsten die relevant zijn voor de betreffende indicator, zoals de beïnvloede lengte van de kust, de beïnvloede oppervlakte strand, vooroever en buitendelta en de frequentie van de suppleties.

Indicatoren

Basisindicatoren

De indicatoren die in deze studie zullen worden bekeken zijn:

- CO₂ uitstoot (ook als proxy voor NO_x, SO_x, PM 2,5/10) Inclusief de bijdrage van de extra vaarafstand bij toename suppletievolumes
- Beïnvloed kustoppervlakte (strand, vooroever en buitendelta)
- Bodemdieren

Deze drie indicatoren zijn afgeleid van de eerder uitgevoerde studie (Arcadis, 2020).

Systeemindicatoren

De uitkomsten van de berekeningen beperken zich tot de drie indicatoren, die hierboven staan. Aanvullend zijn de volgende indicatoren beschouwd. Maar het hele ecosysteem wordt beïnvloed, net als de recreatiefunctie. Om deze verdere effecten mee te nemen is op basis van expert judgement, en vakliteratuur doorgeredeneerd. Deze systeemindicatoren geven een meer overkoepelend perspectief op het bredere kustecosysteem en de recreatiewaarde:

- Vogels
- Habitats
- Biodiversiteit
- Connectiviteit
- Strandtoerisme, dit omvat de recreatiemogelijkheden, waaronder aspecten vallen als:
 - Beschikbaarheid & bruikbaarheid vanwege werkzaamheden;
 - Zwemveiligheid;
 - Strandbreedte;
 - Recreatiewaarde.

Habitats, biodiversiteit en connectiviteit sluiten aan bij de ecologische uitgangspunten die Rijkswaterstaat hanteert, onder andere bij de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW).

De volgende indicatoren en aspecten zijn niet in de beschouwing meegenomen:

- Kosten
- De gevolgen van de zandwinning zelf op de Noordzee
- Locatiespecifieke aspecten voor delen van de kust (bijvoorbeeld de aanwezigheid van badplaatsen en natuurgebieden).

Het resultaat van het bepalen van de effecten en doorredeneren per indicator levert de antwoorden op de eerste hoofdvraag van het project (“Wat zijn de effecten op de diverse functies van de kust bij de specifieke suppletie strategieën”) en geeft tevens antwoord op de vraag of bij het toenemen van de suppletievolumes gevolgen optreden die sterk afwijken van de huidige situatie.

2.2 Input voor berekening

2.2.1 Scenario's met suppletievolumes

Het eerste uitgangspunt voor de effectbepalingen zijn de te hanteren scenario's, waarin staat welke zand volumes moeten waar gesuppleerd worden voor de drie kustgebieden bij de verschillende snelheden van zeespiegelstijging. De volumes voor de verschillende scenario's zijn gebaseerd op het 'Eindrapport fase 1 Zandige kust: Sedimentbehoefte Nederlands kuststelsysteem' van Deltares uit 2023. In Tabel 2-1 staan de jaarlijkse suppletievolumes per deelgebied voor 4 toekomstige scenario's die worden beschouwd. Hierin betreft het scenario **Laag** 0.5 m zeespiegelstijging in 2100 en 1 m in 2200. De scenario's **Hoog** en **Hoog/Extreem** corresponderen respectievelijk met 1 m en 2 m zeespiegelstijging in 2100 en het scenario **Extreem** met 5 m in 2200. De effecten bij deze vier scenario's worden vergeleken met die bij de huidige werkwijze.

*Tabel 2-1 Suppletievolumes per jaar per deelgebied voor 4 zeespiegelstijging scenario's. De onderste regel van de tabel betreft de huidige * 1,5. Dit is het volume huidig vermenigvuldigd met 1,5, die door RWS wordt gebruikt als indicatie voor hoeveel gesuppleerd kan worden zonder majeure aanpassingen aan de wijze van uitvoering, locaties en frequentie, door de voorziene suppleties ruimer te dimensioneren.*

Scenario	Waddenkust (Mm ³ /yr)	Hollandse kust (Mm ³ /yr)	Deltakust (Mm ³ /yr)
Laag	11,3	n.v.t. (gelijk aan huidig)	n.v.t. (gelijk aan huidig)
Hoog	18,8	4,4	3,3
Hoog/extreem	26,4	5,8	5,1
Extreem	35,9	7,7	7,3
Huidig	5,7	3,1	2,2
Huidig*1,5	8,6	4,65	3,3

2.2.2 Strategieën

De twee strategieën die in dit onderzoek zijn betrokken betreffen:

1. De huidige wijze van suppleren met strand-, vooroever- en geulwandsuppleties;
2. De aanvulling met systeemsuppleties in de vorm van zandmotorconcepten en buitendeltasuppleties.

Deze strategieën worden in principe niet met elkaar vergeleken, maar er wordt gekeken bij welk volume het logisch of noodzakelijk is om over te stappen naar aanvulling met de tweede strategie (tipping point).

2.2.3 Verlengende maatregelen

In plaats van het direct uitbreiden van de suppletie methodiek met zandmotorconcepten en buitendeltasuppleties (strategie 2), zal het in veel gevallen mogelijk zijn om binnen strategie 1, met kleinere en grotere aanpassingen, de suppletievolumes van de bestaande suppletietechnieken op te rekken. Dit worden de verlengende maatregelen genoemd, die onderdeel uitmaken van strategie 1.

De meest basale stap is het vergroten van de zandvolumes van reguliere suppleties (vergroten van het suppletievolume per strekkende meter kustlijn), die door Rijkswaterstaat al is uitgewerkt in de factor 1,5 (zie de onderste regel van tabel 1). Ook kan de frequentie worden verhoogd waarmee bepaalde suppleties worden uitgevoerd. De volgende stap is het langs de kust uitbreiden van de suppletielocaties. Op delen van de kust wordt nooit of zeer zelden een suppletie aangebracht. Door in deze gebieden wel te gaan suppleren kan ook een groter suppletievolume worden bereikt. In variant B in Figuur 2-4 is een illustratie toegevoegd van de toepassing van verlengende maatregelen voor de Waddenkust.

In deze studie worden de volgende verlengende maatregelen bekeken:

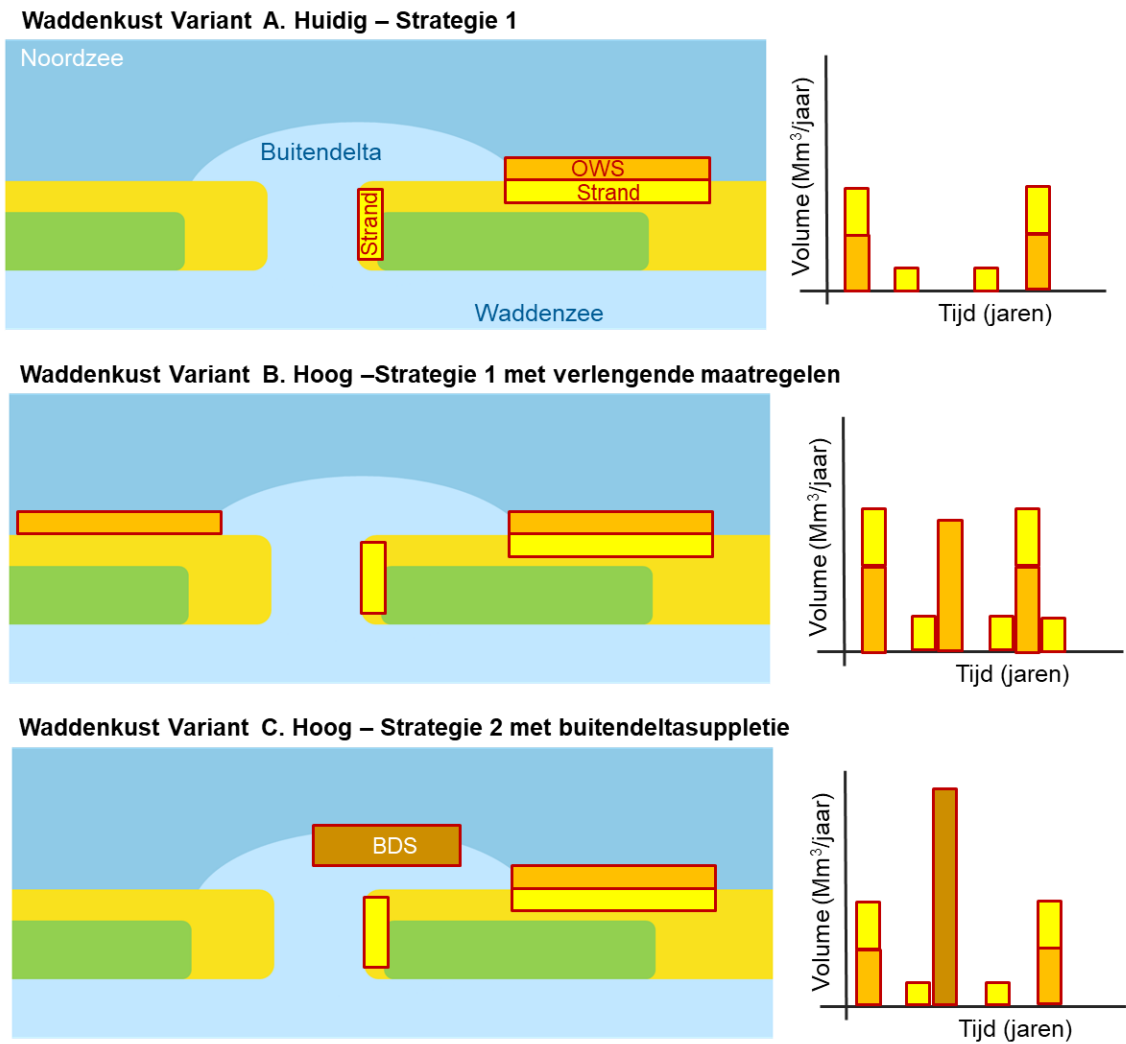
- a. Uitbreiding volume op één locatie
- b. Verhogen suppletiefrequentie
- c. Uitbreiden van aantal suppletielocaties langs de kustlijn

Voor de volledigheid wordt ook vermeld dat ook kan worden gekeken naar de mogelijkheden om het zandvolume van de duinen te vergroten. Omdat de ontwikkelingen van de duinen al in een separaat onderzoek is beschouwd, is deze verlengende maatregel hier niet beschouwd. De verlengende maatregelen sluiten elkaar niet uit, zodat een combinatie van verlengende maatregelen kan worden ingezet.

2.2.4 Varianten

De combinatie van een strategie en verlengende maatregelen levert varianten op waarvan de effecten zijn bepaald. De mogelijkheden van de drie verlengende maatregelen bij de eerste strategie worden voor een deel bepaald door de huidige situatie. Zo wordt de mogelijkheid om een geulwandsuppletie aan te brengen bijvoorbeeld bepaald door de aan- of afwezigheid van een geul nabij de kust. En in hoeverre kan worden uitgebreid langs de kustlijn hangt af van de lengte van het niet-gesuppleerde deel van de kust. Daarom zijn de mogelijkheden voor de verlengende maatregelen per het deelgebied bekeken, op basis van de geschematiseerde kusten (Hollandse kust: Figuur 2-2, Waddenkust: Figuur 2-1 en Deltakust: Figuur 2-3). De hoeveelheid zand die in het geschematiseerde kustvak wordt gesuppleerd in de huidige situatie en de verdeling over de verschillende suppletievormen, is afgeleid uit de Rijkswaterstaat suppletiedatabase (geraadpleegd via de Coastviewer website - <https://www.openearth.nl/coastviewer-static/> en de verscheiden beheerbibliotheek rapporten per kustvak). Op basis van expert judgement zijn de varianten bepaald, die logisch aansluiten op de morfologische, ecologische en maatschappelijke kenmerken van de kust.

Dit levert voor de drie kustgebieden Waddenkust (W), Hollandse kust (HK) en Deltakust (D) een matrix op van varianten. Op deze wijze is een overzichtelijk aantal varianten opgebouwd, waarvan de gevolgen worden beschouwd. In Figuur 2-4 is een illustratie toegevoegd met twee varianten voor de Waddenkust, waarbij variant A de huidige situatie toont, variant B een aantal verlengende maatregelen onder strategie 1 toont en variant C laat zien hoe met een systeemsuppletie onder strategie 2 het suppletievolume verder wordt vergroot.



Figuur 2-4 De geschematiseerde Waddenkust met drie varianten met verschillende vormen van zandsuppleties die kunnen worden ingezet bij twee scenario's (huidig en hoog).

3 Varianten en knikpunten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van het schematiseren gepresenteerd. De resultaten bestaan uit twee samenhangende onderdelen. Ten eerste resulteert de analyse met de schematische kustgebieden in varianten: per scenario een combinatie van strategie en verlengende maatregelen. Door de varianten onderling te vergelijken volgen direct de tipping points in suppletie strategie, waarmee dat deel van de tweede onderzoeksvraag in dit hoofdstuk beantwoord wordt. In dit hoofdstuk worden twee tipping points benoemd, namelijk 1) wanneer de huidige suppletie strategie niet meer voldoende volume oplevert en verlengende maatregelen nodig zijn binnen strategie 1; en 2) wanneer systeemsuppleties nodig zijn (strategie 2).

Het tweede onderdeel van de resultaten is het ruimtebeslag en frequentie bij elke variant, waarbij wordt gekwantificeerd welk oppervlakte (strand, vooroever, etc.) met welke frequentie wordt verstoord. Deze oppervlaktes en frequenties worden in dit hoofdstuk gepresenteerd. In het volgende hoofdstuk worden deze doorvertaald naar de benoemde indicatoren. Hieronder worden de resultaten weergegeven per kustgebied. De gevoeligheidsanalyse van de resultaten voor de invoerparameters is opgenomen in Bijlage B.

3.1 Waddenkust

De bereikte suppletievolumes en varianten voor de Waddenkust zijn getoond in Figuur 3-1 en Tabel 3-1. Uit de grafiek en tabel voor de Waddenkust springen een aantal belangrijke punten naar voren:

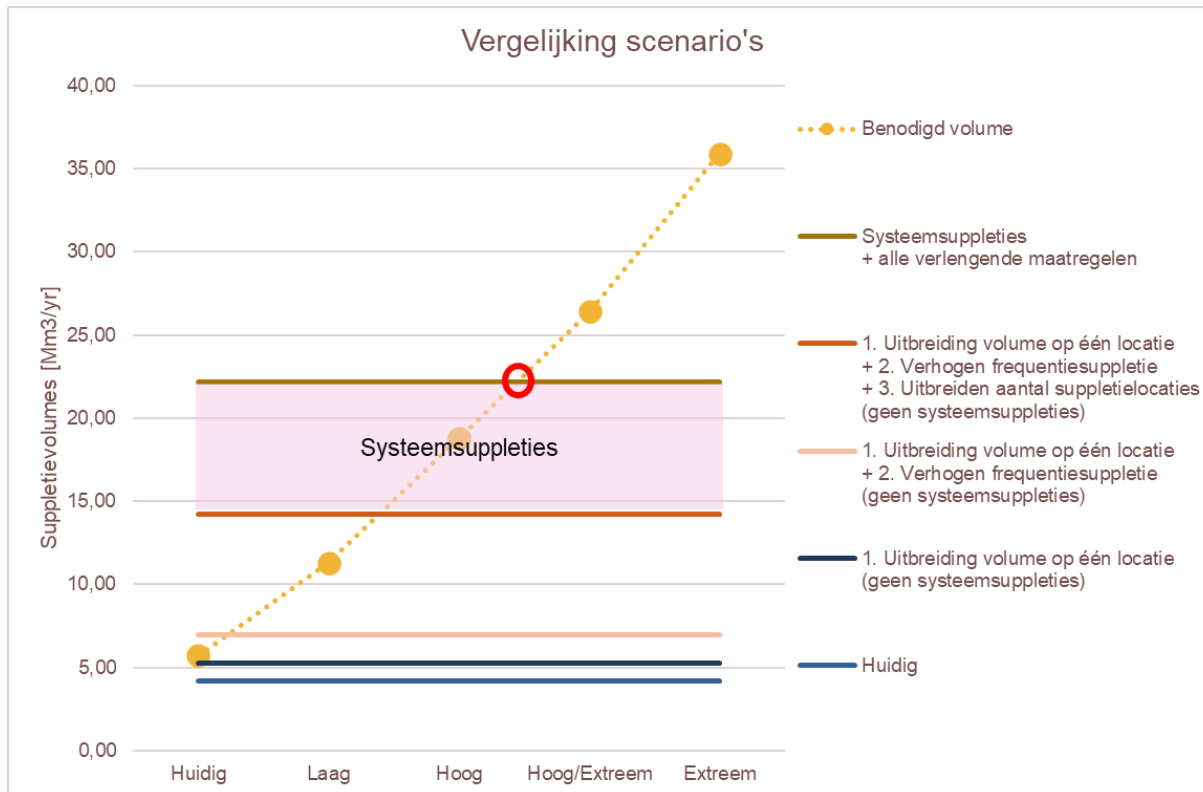
Ten eerste is het huidige suppletievolume minder groot dan momenteel benodigd is, volgens de berekeningen aan de suppletiebehoefte (Deltares, 2023). Zelfs met de eerste verlengende maatregel wordt het huidig benodigd volume niet bereikt. Dat betekent dat in de huidige situatie het eerste tipping point al gepasseerd is. Dit tipping point is dan ook niet zichtbaar in Figuur 3-1.

Wat opvalt is dat de derde stap van de verlengende maatregelen veel meer extra volume oplevert dan de eerste twee. De verklaring hiervoor is dat Waddeneiland B (zie hoofdstuk 2) in de huidige strategie en met de eerste twee verlengende maatregelen niet gesuppleerd wordt en bij de derde verlengende maatregelen wel. De nieuwe suppletie locaties van Waddeneiland B kunnen vaak en met veel volume gesuppleerd worden.

Ten derde valt op dat, tegenstelling tot de Hollandse kust, strategie 2 al snel nodig is bij de Waddenkust, namelijk bij scenario *hoog*. De reden hiervoor is dat de benodigde volumes bij de Waddenkust hoger liggen dan bij de Hollandse kust. Dat de benodigde volumes bij de Waddenkust hoger zijn, komt doordat hier ook de export van zand vanaf de Waddenkust naar de Waddenzee ten dele aangevuld wordt. Het tweede tipping point voor de Waddenkust wordt daarom snel bereikt (rode cirkel in Figuur 3-1).

Het laatste opvallende resultaat is dat bij de scenario's *hoog/extreem* en *extreem* het benodigde volume niet bereikt wordt. Dat betekent dat een gedeelte van het benodigde suppletievolume niet binnen de beschouwde strategieën met de gebruikte randvoorwaarden kan worden bereikt. Het tekort in volume is getoond in de laatste kolom van Tabel 3-1.

Ten slotte nog een opmerking over de toepassing van de systeemsuppleties voor de Waddenkust bij strategie 2. Voor de Waddenkust is uitgegaan van de toepassing van buitendeltasuppleties als enige vorm van systeemsuppletie. Met buitendeltasuppleties is praktijkervaring opgedaan op de buitendelta van het Borndiep (het zeegat tussen Terschelling en Ameland). In de praktijk zijn waarschijnlijk ook systeemsuppleties mogelijk in de vorm van zandmotoren op de Waddeneilanden. Daarmee kan het volume dat wordt gesuppleerd bij strategie 2 worden vergroot. Dit wordt dus noodzakelijk om aan de suppletiebehoefte te voldoen.



Figuur 3-1 Grafiek van de maximale omvang van de varianten voor suppleties in verhouding tot de suppletiebehoefte bij de vijf scenario's voor de Waddenkust. De rode cirkel geeft het tweede tipping point aan.

Tabel 3-1 Tabel waarin is aangegeven in hoeverre de suppletiebehoefte per scenario van de Waddenkust wordt gedekt door de varianten voor de suppleties.

	Variant [Mm3/yr]						Tekort [Mm3/yr]
	Strategie 1			Strategie 2			
	Huidig	+1. Uitbreiding volume op één locatie	+2. Verhogen frequentiesuppletie	+3. Uitbreiden aantal suppletielocaties	+Systeemsuppleties		
Huidig	4,21 (100%)	+1,05 (100%)	+0,44 (26%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)		0,00
Laag	4,21 (100%)	+1,05 (100%)	+1,67 (100%)	+4,37 (60%)	+0,00 (0%)		0,00
Hoog	4,21 (100%)	+1,05 (100%)	+1,67 (100%)	+7,26 (100%)	+4,61 (58%)		0,00
Hoog/Extreem	4,21 (100%)	+1,05 (100%)	+1,67 (100%)	+7,26 (100%)	+8,00 (100%)		4,21
Extreem	4,21 (100%)	+1,05 (100%)	+1,67 (100%)	+7,26 (100%)	+8,00 (100%)		13,71

Tabel 3-2 toont de verstoorde oppervlaktes en de verstoringsfrequentie die volgen uit de varianten van Tabel 3-1. De verstoring is getoond voor alle morfologische onderdelen: het strand, de vooroever, de geulwand en de buitendelta. De tabel laat zien dat het verstoorde oppervlakte meer toeneemt dan de verstoringsfrequentie. Dit kan wederom verklaard worden door de extra oppervlakte van Waddeneiland B dat gebruikt wordt voor zandsuppleties onder verlengende maatregel 3.

Tabel 3-2 Tabel waarin voor de Waddenkust is aangegeven welk oppervlakte met welke frequentie wordt verstoord.

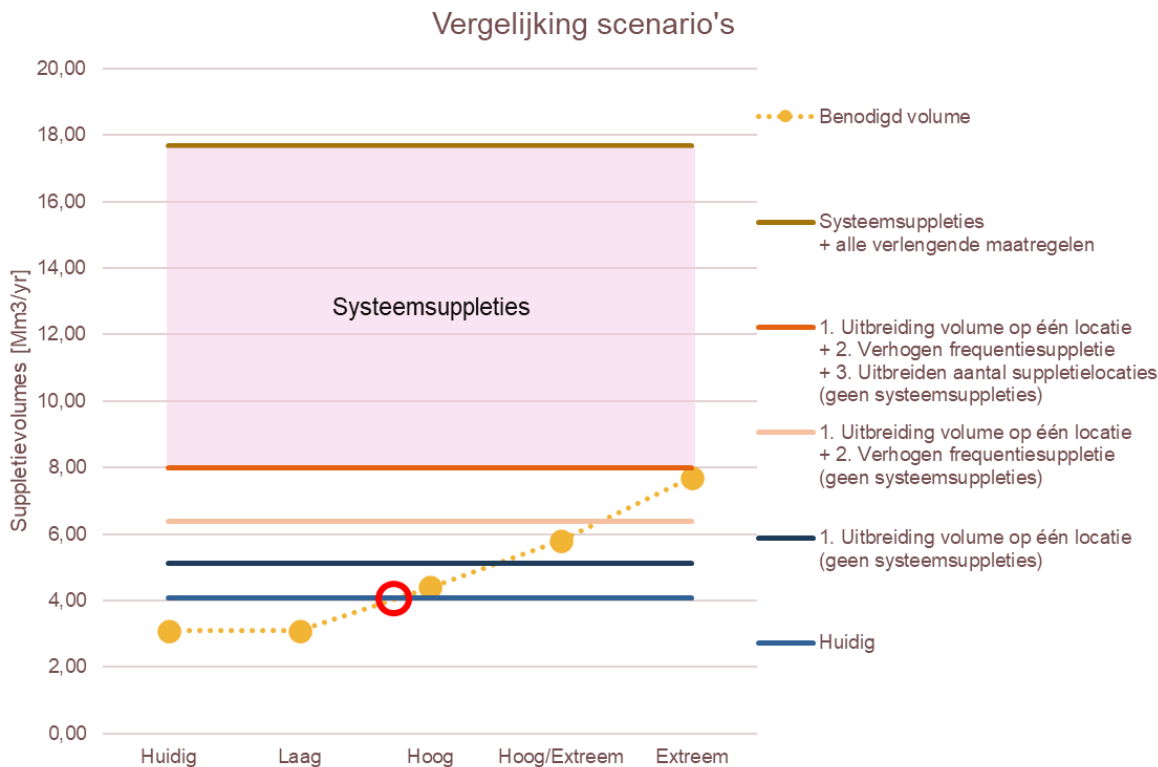
Waddenkust	Strand		Vooroever		Geulwand		Buitendelta	
	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]
Huidig	3,13	4,17	11,39	4,69	1,20	15,85	0,00	0,00
Laag	5,87	3,56	18,08	4,00	1,77	10,00	0,00	0,00
Hoog	7,69	3,56	22,50	4,00	2,15	10,00	20,00	8,68
Hoog/Extreem	7,69	3,56	22,50	4,00	2,15	10,00	20,00	5,00
Extreem	7,69	3,56	22,50	4,00	2,15	10,00	20,00	5,00

3.2 Hollandse kust

De bereikte suppletievolumes voor de Hollandse kust zijn als horizontale lijn weergegeven in Figuur 3-2. In deze grafiek staan op de x-as de vijf scenario's (zie paragraaf 2.2.1). Op de y-as staan de zandvolumes die kunnen worden gesuppleerd, waarbij is gestart met de huidige hoeveelheden en de volumes worden vergroot met de verlengende maatregelen gevolgd door systeemsuppleties. Bij het vergroten van de volumes met de verlengende maatregelen is eerst maatregel 1 toegevoegd, daarna maatregel 2 (bovenop maatregel 1) en tot slot maatregel 3 (i.c.m. 1&2). Het benodigde volume per scenario is met gele bollen getoond. Zo kan direct worden afgelezen met welke verlengende maatregelen en strategieën het benodigde volume bij het betreffende scenario kan worden behaald. De stippellijnen tussen de gele bollen dienen alleen ter identificatie van tipping points, zoals met de rode stip is weergegeven als voorbeeld in Figuur 3-2. Deze output wordt op een andere manier getoond in Tabel 3-3, namelijk als variant per scenario. In het figuur en de tabel is te zien dat met de huidige suppletie strategie (strategie 1 zonder verlengende maatregelen) er meer volume gesuppleerd wordt dan momenteel benodigd (*huidig*) en het scenario en *laag*. Bij scenario *hoog* is verlengende maatregel 1 deels nodig om het benodigde volume te bereiken. Dit kan worden gezien als het eerste tipping point in suppletie methodiek waarbij met de huidige suppletie strategie het benodigde volume niet bereikt wordt. In Figuur 3-2 is dit weergegeven met een rode cirkel. Bij scenario *hoog/extreem* is ook verlengende maatregel 2 deels nodig. Bij scenario *extreem* worden alle verlengende maatregelen vrijwel volledig gebruikt.

Hieruit blijkt dat strategie 1 (met verlengende maatregelen) voor de Hollandse kust in alle scenario's voldoet en dat strategie 2 (systeemsuppleties) nimmer strikt noodzakelijk is. Daarmee wordt het tweede tipping point niet bereikt bij de Hollandse kust.

Het kan natuurlijk zo zijn dat systeemsuppleties om wat voor reden dan ook de voorkeur heeft boven het uitbreiden binnen scenario 1. Met deze "vrijwillige" voortijdige overstap kan het benodigde volume met een alternatieve variant behaald worden. In theorie is een groot aantal combinaties van strategieën en verlengende maatregelen mogelijk. Deze "uitwisselbaarheid" van strategieën en verlengende maatregelen is geen onderdeel van de hier gevolgde analyse. Hier gaan we alleen uit van de overstap naar systeemsuppleties, wanneer strategie 1 inclusief verlengende maatregelen niet afdoende is om het benodigde volume te bereiken. Bij de Hollandse kust wordt in deze analyse de overstap dus niet gemaakt. In algemene zin heeft de uitwisselbaarheid van varianten natuurlijk wel impact op de effecten, indicatoren en tipping points. Zo heeft één keer een systeemsuppletie aanleggen een ander effect op de verstoorde oppervlaktes van het ecosysteem – en ook de frequentie - dan hetzelfde volume suppleren met verlengende maatregelen. Deze complexiteit is belangrijk voor de interpretatie van de resultaten, maar wordt in de analyse verder niet beschouwd.



Figuur 3-2 Grafiek van de maximale omvang van de varianten voor suppleties in verhouding tot de suppletiebehoefte bij de vijf scenario's voor de Hollandse kust. De rode cirkel geeft het eerste tipping point aan.

Tabel 3-3 Tabel waarin is aangegeven in hoeverre de suppletiebehoefte per scenario van de Hollandse kust wordt gedekt door de varianten voor de suppleties.

	Variant [Mm3/yr]						
	Strategie 1				Strategie 2		
	Huidig	+1. Uitbreiding volume op één locatie	+2. Verhogen frequentiesuppletie	+3. Uitbreiden aantal suppletielocaties	+Systeemsuppleties		
Huidig	3,10 (76%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)		
Laag	3,10 (76%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)		
Hoog	4,09 (100%)	+0,31 (30%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)		
Hoog/Extreem	4,09 (100%)	+1,02 (100%)	+0,68 (54%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)		
Extreem	4,09 (100%)	+1,02 (100%)	+1,28 (100%)	+1,31 (82%)	+0,00 (0%)		

Tabel 3-4 toont de verstoorde oppervlaktes en de verstoringsfrequentie die volgen uit de varianten van Tabel 3-3. De verstoring is getoond voor het strand en de vooroever. De andere twee morfologische onderdelen (geulwand en buitendelta) worden bij de Hollandse kust niet gesuppleerd, omdat geulen en buitendelta's niet aanwezig zijn. In Tabel 3-4 is voor de scenario's *huidig* en *laag* uitgegaan van het huidige suppletieprogramma, waarbij meer volume wordt gesuppleerd dan benodigd (zoals blijkt Figuur 3-2 en Tabel 3-3). Wat opvalt is dat de oppervlak en terugkeertijd niet toenemen zodra de eerste verlengende maatregel nodig is (scenario *hoog*). Dit komt omdat bij deze maatregel het suppletievolume alleen toeneemt door een dikker zandlichaam en niet door een groter oppervlak of kortere terugkeertijd. Dat valt namelijk onder respectievelijk de derde en de tweede verlengende maatregel. Bij de scenario's *hoog/extreem* en *extreem* is deze toename in verstoring dan ook wel te zien.

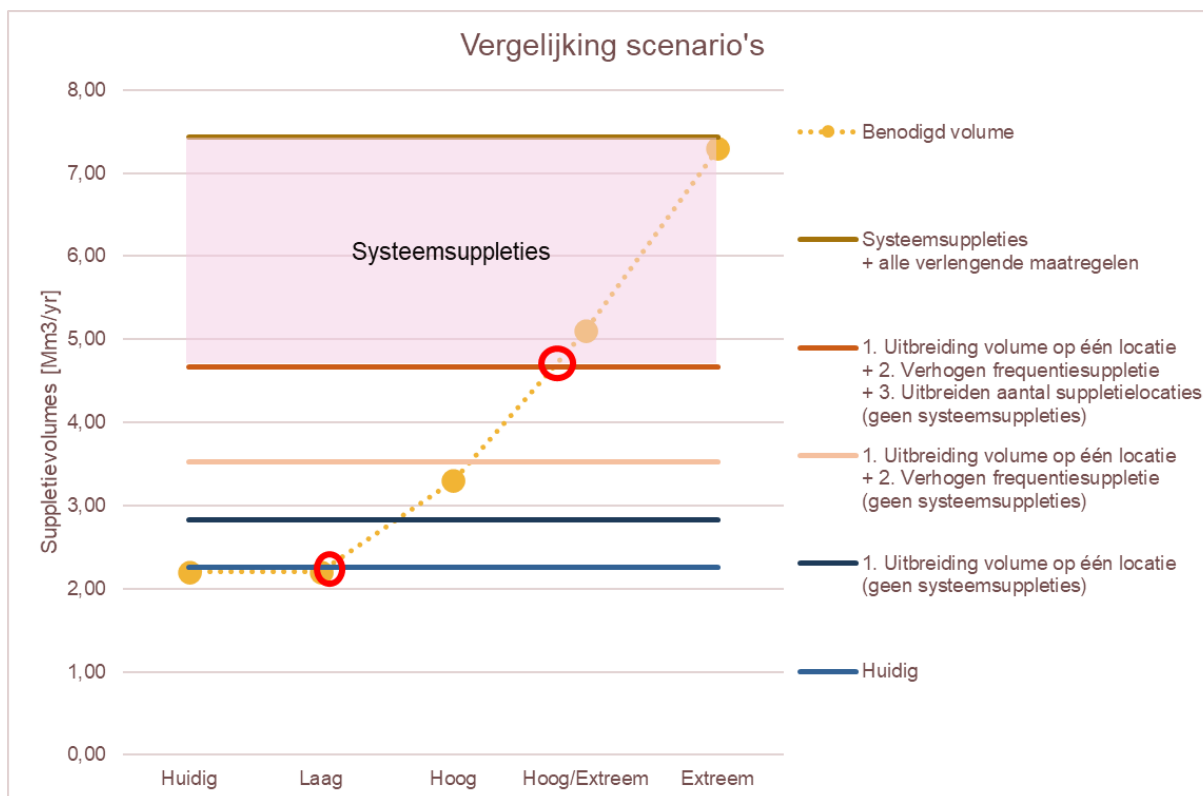
Tabel 3-4 Tabel waarin voor de Hollandse kust is aangegeven welk oppervlakte met welke frequentie wordt verstoord.

Hollandse kust	Strand		Vooroever	
	Oppervlak [km ²]	Terugkeertijd [yr]	Oppervlak [km ²]	Terugkeertijd [yr]
Huidig	7,47	7,22	26,40	7,50
Laag	7,47	7,22	26,40	7,50
Hoog	7,47	7,22	26,40	7,50
Hoog/Extreem	7,47	6,37	26,40	6,61
Extreem	9,00	5,78	31,79	6,00

3.3 Deltakust

Figuur 3-3 en Tabel 3-5 tonen de varianten en suppletievolumes voor de verschillende scenario's voor de Deltakust. Hieruit blijkt dat de bereikte volumes lager liggen dan bij de Hollandse kust en zeker dan bij de Waddenkust. Dit kan vooral verklaard worden doordat het huidige suppletievolume relatief laag is. Desondanks wordt er nu voldoende gesuppleerd en kan ook in alle scenario's het benodigde suppletievolumes bereikt worden. Het eerste tipping point wordt bereikt tussen strategieën *laag* en *hoog* (eerste rode cirkel in Figuur 3-3). Voor scenario's *hoog/extreem* en *extreem* zijn systeemsuppleties (strategie 2) nodig en wordt het tweede tipping point gepasseerd (tweede rode cirkel in Figuur 3-3). In Tabel 3-5 is aangegeven in hoeverre de suppletiebehoefte per scenario van de Deltakust wordt gedekt door de varianten voor de suppleties.

Voor het uitvoeren van de systeemsuppleties is uitgegaan van de mogelijkheid om zowel zandmotoren toe te passen, als buitendeltasuppleties. In tegenstelling tot bij de Hollandse kust (zandmotor) en de Waddenkust (buitendelta suppletie) is bij de Deltakust geen praktijkervaring opgedaan met het toepassen van systeemsuppleties. Het is op voorhand niet duidelijk waar welke concepten toepasbaar zijn voor de Deltakust.



Figuur 3-3 Grafiek van de maximale omvang van de varianten voor suppleties in verhouding tot de suppletiebehoefte bij de vijf scenario's voor de Deltakust. De rode cirkels geven de tipping points aan.

Tabel 3-5 Tabel waarin is aangegeven in hoeverre de suppletiebehoefte per scenario van de Deltakust wordt gedekt door de varianten voor de suppleties.

	Variant [Mm3/yr]					
	Strategie 1			Strategie 2		
	luidig	+1. Uitbreiding volume op één locatie	+2. Verhogen frequentiesuppletie	+3. Uitbreiden aantal suppletielocaties	+Systeemsuppleties	
Huidig	2,20 (97%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	
Laag	2,20 (97%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	
Hoog	2,26 (100%)	+0,56 (100%)	+0,48 (67%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	
Hoog/Extreem	2,26 (100%)	+0,56 (100%)	+0,71 (100%)	+1,14 (100%)	+0,43 (16%)	
Extreem	2,26 (100%)	+0,56 (100%)	+0,71 (100%)	+1,14 (100%)	+2,63 (95%)	

De verstoringen die volgen uit deze varianten zijn weergegeven in Tabel 3-6. Hierin is een relatief geleidelijke toename van verstoringsoppervlakte en -frequentie te zien. Echter, bij scenario *hoog/extreem* wordt de buitendelta voor het eerst verstoord en bij scenario *extreem* neemt de verstoring van het strand, de vooroever en de buitendelta aanzienlijk toe. Dit komt doordat de frequentie van systeemsuppleties (hier zandmotorconcepten en buitendeltasuppleties) tussen deze twee scenario's toeneemt van 16% naar 95% van de maximale frequentie.

Tabel 3-6 Tabel waarin voor de Deltakust is aangegeven welk oppervlakte met welke frequentie wordt verstoord.

Deltakust	Strand		Vooroever		Geulwand		Buitendelta	
	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]
Huidig	5,53	3,70	9,87	16,67	1,74	50,00	0,00	0,00
Laag	5,53	3,70	9,87	16,67	1,74	50,00	0,00	0,00
Hoog	5,53	3,20	9,87	14,42	1,74	43,25	0,00	0,00
Hoog/Extreem	7,55	2,93	14,67	12,67	2,50	40,00	52,50	192,47
Extreem	10,81	2,76	17,93	10,12	2,50	40,00	52,50	31,54

4 Effecten op indicatoren

4.1 Aannames

Bij de hieronder beschreven indicatoren voor effecten op verschillende functies van de Nederlandse kustgebieden is er zoveel als mogelijk gebruik gemaakt van de eerder gebouwde matrix (Arcadis, 2020). Zoals eerder beschreven zijn veel van de aannames van de eerdere matrix niet bruikbaar voor deze scenario's die suppletievolumes voor toekomstige zeespiegelstijging beschrijven.

- Voor de indicatoren 'CO₂' en 'bodemdieren' is gebruik gemaakt van de rekenmethode en parameters zoals geformuleerd voor de eerdere matrix.
- Voor de indicator 'beïnvloed oppervlakte' zijn de uitkomsten van de huidige schematisering gebruikt in tegenstelling tot de eenvoudige omrekenfactor van suppletievolume naar oppervlakte uit de 2020 matrix.
- De systeemindicatoren 'vogels', 'habitats', 'biodiversiteit' en 'connectiviteit' zijn kwalitatief behandeld aan de hand van expert judgement en de uitkomsten van de schematisering en basisindicatoren.
- De indicatoren 'strandbreedte', 'recreatiewaarde' en 'zwemveiligheid' zijn gecombineerd behandeld onder "strandtoerisme" omdat de basisparameters en aannames vanuit de 2020 matrix niet te vertalen zijn naar toekomstig strandgebruik en relatieve waarde per strandoppervlakte. Ook strandtoerisme wordt kwalitatief behandeld, waarbij met name wordt gekeken in hoeverre de toegankelijkheid en beschikbaarheid veranderd door de toename van de suppleties.

4.2 Basisindicatoren

4.2.1 CO₂

Hieronder volgt eerst een beschrijving van de rekenmethode uit de rapportering over de matrix (Arcadis, 2020). Daarna volgt de aanpassing van die methode aan de huidige uitkomsten en de resultaten voor deze indicator voor de verschillende scenario's in de verschillende deelgebieden.

De CO₂ uitstoot is gebaseerd op de hoeveelheid brandstof of Marine Diesel Oil (MDO) die wordt verstoekt bij het vervoeren en suppleren van zand. Deze berekening is dus alleen voor verbrandingsemissies. De uitstoot verschilt per suppletietechniek en dit is verwerkt in de kentallen van het aantal kg per kuub gesuppleerd zand. In deze kentallen zit een gemiddelde vaarafstand van zandtransport voor suppleties over de hele Nederlandse kust verdisconteerd. Voor een strandsuppletie wordt uitgegaan van een gemiddeld MDO gebruik van 1,5 kg/m³. Voor vooroeversuppleties bedraagt dit kengetal 0,95 kg/m³ (Bolech & Kootstra, 2019), voor buitendelta suppleties is dit 0.7 kg/m³ (pers. comm. Rijkswaterstaat).

Het MDO gebruik bestaat uit een variabel en een vast deel. Het variabele deel is het gebruik als gevolg van de vaarbewegingen (deze is afhankelijk van de vaarafstanden). Het vaste deel is het dieselverbruik als gevolg van het suppleren (deze is onafhankelijk van het deelgebied). Er is voor onderwatersuppleties aangenomen dat deze alleen uit een variabel deel bestaan. Het vaste deel (het klappen) valt in het niet in verhouding tot de uitstoot door vaarbewegingen.

De kentallen uit (Bolech & Kootstra, 2019) gaan uit van MDO gebruik door vaarbewegingen gebaseerd op een gemiddelde vaarafstand over de volledige kust. Aangezien de afstanden tussen wingebieden en suppletielocaties verschillend zijn voor de verschillende deelgebieden heeft dit een effect op het MDO gebruik en dus de CO₂ uitstoot. Om de uitstoot als gevolg van vaarbewegingen voor de deelgebieden apart te bepalen is de volgende aanpak gevolgd. Voor onderwatersuppleties is allereerst de gemiddelde vaarafstand tussen win en suppletielocaties bepaald voor de hele Nederlandse kust en voor de deelgebieden apart (Tabel 4-1). Vervolgens is berekend hoeveel brandstof per kilometer nodig is voor een onderwatersuppletie (OWS), op de vooroever of de geulwand. Aangezien onderwatersuppleties alleen een variabel deel bevatten wordt dit berekend door het kental voor onderwatersuppleties uit (Bolech & Kootstra, 2019) te delen door het gemiddelde aantal kilometers. Dat getal (kg MDO/km) is vervolgens gebruikt om te bepalen hoeveel brandstof er voor onderwatersuppleties per deelgebied nodig is.

Tabel 4-1 Gemiddelde vaarafstanden van win- tot suppletie locatie per deelgebied (km)

Waddenkust	Hollandse kust	Deltakust	Volledige kust
9,6 km	11,8 km	13,2 km	11,5 km

Voor strandsuppleties is ervan uit gegaan dat het variabele deel, dat wordt bepaald door de vaarafstand, gelijk is aan de onderwatersuppleties en het vaste deel (de extra kosten voor het pompen naar het strand) overal gelijk is. Het vaste deel wordt verkregen door het kental van onderwatersuppleties uit (Bolech & Kootstra, 2019) af te trekken van het kental voor strandsuppleties. Door de variabele post per deelgebied te combineren met de vaste post wordt een kental verkregen voor kg brandstofverbruik per kuub suppletievolume. Dit kental wordt de Factor gebruik genoemd (Fg).

Vervolgens is de CO₂ uitstoot per scenario bepaald volgens de onderstaande formule:

$$CO_2 = supp * Fg * FC$$

CO₂: CO₂ uitstoot (Mt), Supp: suppletie volume (Mm³), Fg: factor gebruik (kg/m³),

Fc: factor CO₂ in MDO (kg CO₂/kg MDO; er is berekend dat er 3,175 kg CO₂-uitstoot is per kg MDO).

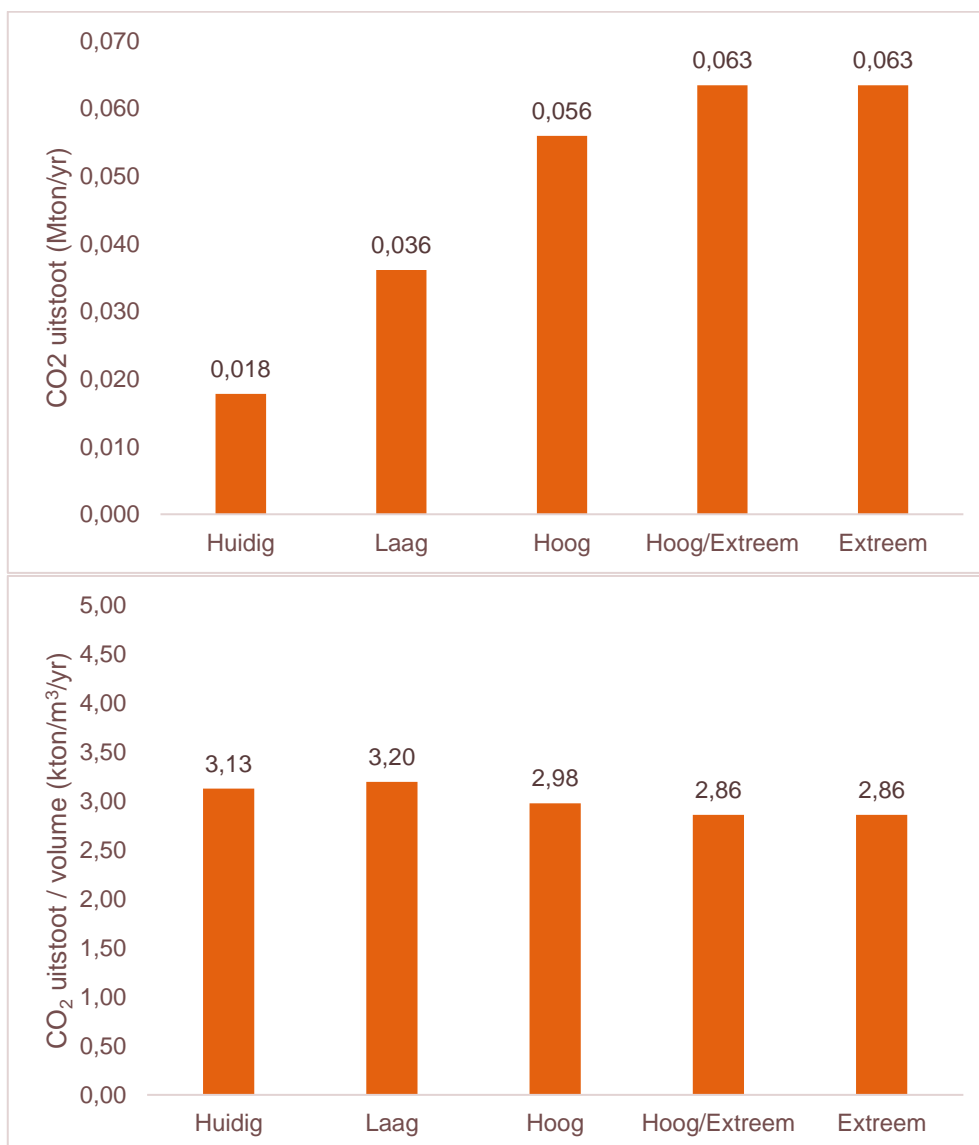
Voor bovenstaande formule is de verdeling van het suppletievolume per deelgebied per kustzone (strand, vooroever, geulwand, systeem) nodig. Hiervoor is met de ruimte die in de verschillende verlengende maatregelen nodig is (percentages in Tabel 3-1, Tabel 3-3 en Tabel 3-5) berekend hoe per scenario het verwachte suppletievolume verdeeld wordt over de kustzones. Tabel 4-2 geeft deze verdeling weer voor de kustgebieden. Bedenk hierbij dat voor de Waddenkust het gesuppleerde volume niet voldoende is om te voldoen aan het benodigde te suppleren volume voor de hoog/extreem en extreem scenario's. Daarom neemt het volume niet verder toe bij de stap naar het extreme scenario.

Tabel 4-2 Verdeling van de benodigde suppletievolumes onder de scenario's over de kustzones per deelgebied.

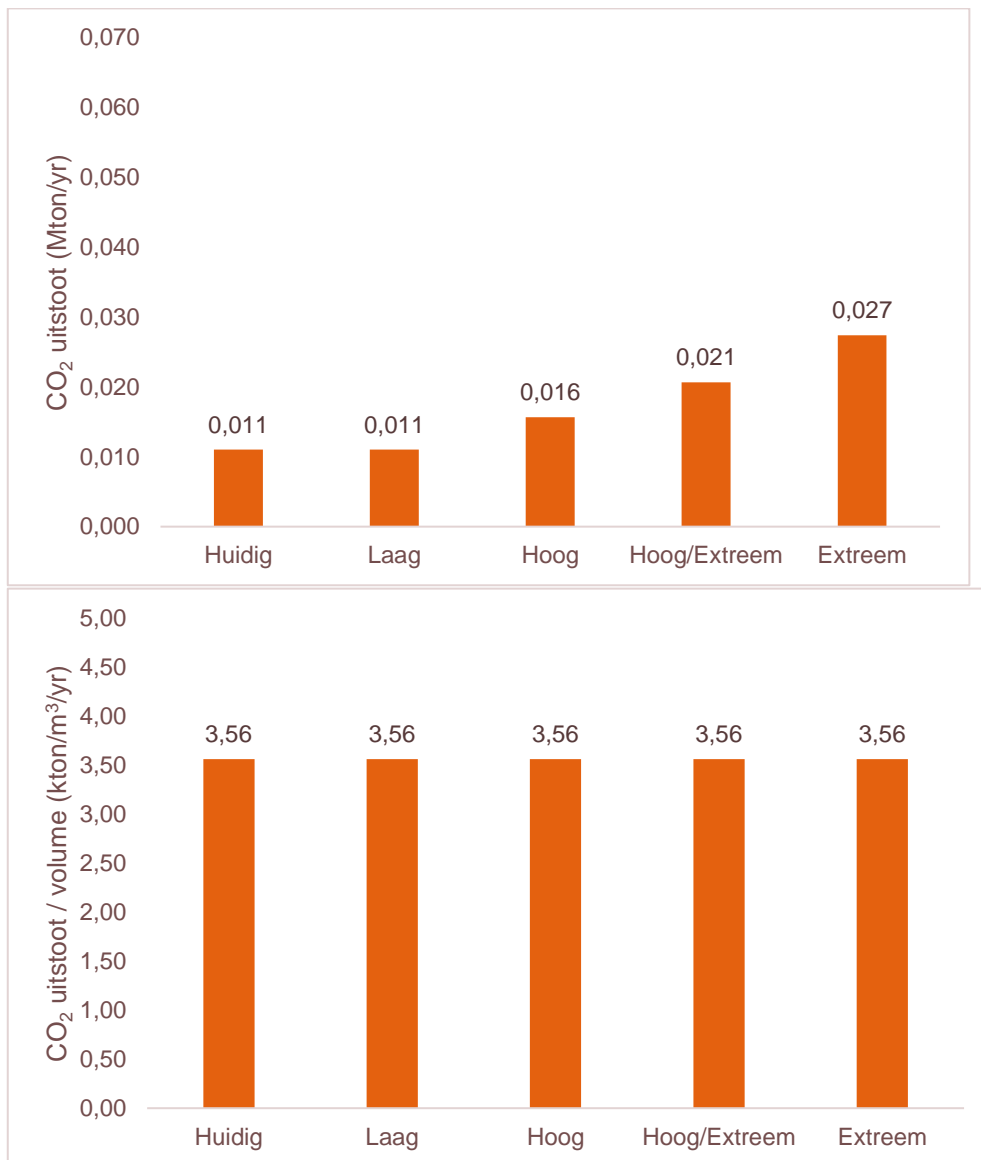
Scenario	Kustzones volumes (Mm ³ /yr)			
	Strand	Geulwand	Vooroever	Systeem
Waddenkust				
Huidig	2,05	0,59	3,06	0,00
Laag	4,51	1,10	5,69	0,00
Hoog	5,91	1,21	7,08	4,61
Hoog/Extreem	5,91	1,21	7,08	8,00
Extreem	5,91	1,21	7,08	8,00
Hollandse kust				
Huidig	0,86		2,24	0,00
Laag	0,86		2,24	0,00
Hoog	1,23		3,17	0,00
Hoog/Extreem	1,62		4,18	0,00
Extreem	2,15		5,55	0,00
Deltakust				
Huidig	1,32	0,33	0,55	0,00
Laag	1,32	0,33	0,55	0,00

Scenario	Kustzones volumes (Mm ³ /yr)			
Hoog	1,97	0,50	0,82	0,00
Hoog/Extreem	2,64	0,78	1,25	0,43
Extreem	2,64	0,78	1,25	2,63

Figuur 4-1 geeft de totale CO₂ uitstoot en CO₂ uitstoot per volume suppletie per jaar weer voor de Waddenkust. Er is een toename in totale CO₂ uitstoot van huidig naar hoog/extreem. Hoog/extreem en extreem zijn gelijk qua uitstoot omdat de beschikbare ruimte volledig gevuld is, hoewel er volgens de uitgangspunten meer volume gesuppleerd moet worden onder deze scenario's. De CO₂ uitstoot per volume is het hoogst bij het lage scenario. Dit komt omdat het percentage van de totale suppletie op het strand dan het hoogst is doordat er uitgebreid moet worden naar extra suppletielocaties. Vanaf scenario hoog zijn er ook systeem suppleties nodig waardoor het relatieve gedeelte van de totale suppletie dat op het strand is weer lager is en de CO₂ uitstoot per volume voor de gehele suppletie navenant daalt. In dit scenario nemen onderwatersuppleties toe die relatief minder CO₂ uitstoten dan strandsuppleties.

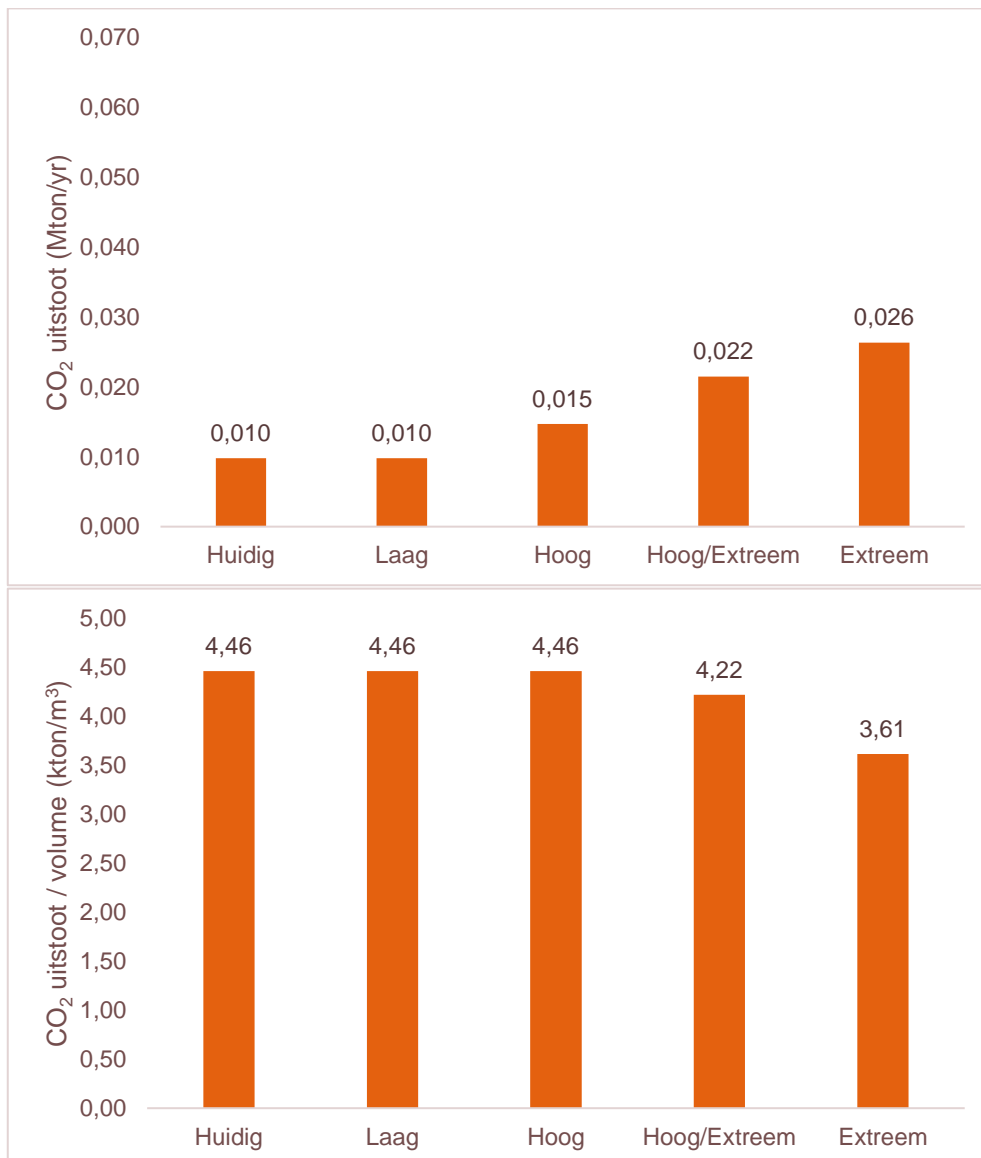


Figuur 4-1 Totale CO₂ uitstoot per jaar (boven) en CO₂ uitstoot per volume per jaar (onder) voor de Waddenkust.



Figuur 4-2 Totale CO₂ uitstoot per jaar (boven) en CO₂ uitstoot per volume per jaar (onder) voor de Hollandse kust.

Figuur 4-2 geeft de totale CO₂ uitstoot en CO₂ uitstoot per volume suppletie per jaar weer voor de Hollandse kust. De totale CO₂ uitstoot is voor alle scenario's lager dan bij de Waddenkust doordat het benodigde volume als geheel lager is. Kijkend naar verschillen tussen de scenario's is bij de huidige en lage scenario's de CO₂ uitstoot gelijk omdat het benodigde volume vanuit de uitgangspunten gelijk is. Vanaf hoog neemt de CO₂ uitstoot toe omdat er steeds meer suppletievolume nodig is bij de verdere scenario's. De uitstoot CO₂ per volume is voor de Hollandse kust gelijk in alle scenario's omdat er bij geen van de scenario's uitbreiding naar andere suppletie locaties nodig is. Hierdoor blijft de verhouding strand- vs. onderwatersuppletie gelijk waardoor er ook geen verschil ontstaat in de berekening van de CO₂ uitstoot.



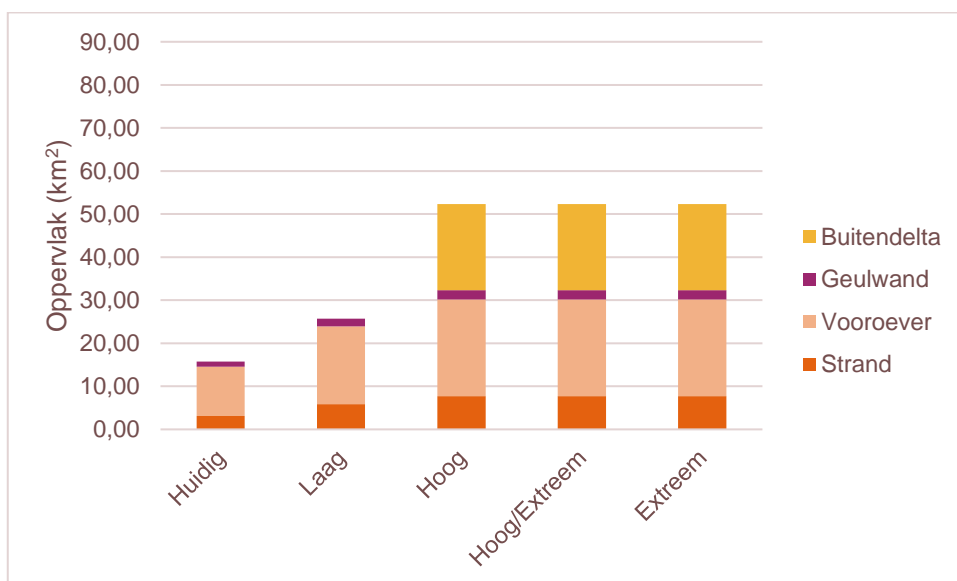
Figuur 4-3 Totale CO₂ uitstoot per jaar (boven) en CO₂ uitstoot per volume per jaar (onder) voor de Deltakust.

Figuur 4-3 geeft de totale CO₂ uitstoot en CO₂ uitstoot per volume suppletie per jaar weer voor de Deltakust. Kijkend naar het beeld over alle scenario's is de CO₂ uitstoot voor de Deltakust vergelijkbaar met die van de Hollandse kust en dus substantieel lager dan voor de Waddenkust. Dit komt omdat verwachte suppletievolumes voor de Deltakust en Hollandse kust vergelijkbaar zijn. Bij de Deltakust is net als bij de Hollandse kust het benodigde suppletievolume bij de huidige en lage scenario's gelijk waardoor de CO₂ uitstoot gelijk is. Vanaf het hoge scenario is er een hoger suppletievolume nodig waardoor de CO₂ uitstoot navenant toeneemt. De uitstoot CO₂ per volume is gelijk van het huidige tot het hoge scenario. Daarna neemt deze af voor het hoog/extreem en extreme scenario. Dit komt omdat er tot en met het hoge scenario geen uitbreiding van suppletielocaties nodig is waardoor de verhouding strand- en onderwatersuppleties gelijk blijft. Bij het hoog/extreem en extreme scenario is uitbreiding van suppletielocaties nodig, maar meteen ook systeemsuppleties. Daardoor zijn voor deze scenario's relatief meer onderwatersuppleties nodig (die relatief minder CO₂ uitstoten dan strandsuppleties) waardoor de CO₂ uitstoot per volume afneemt.

4.2.2 Beïnvloed kustoppervlakte

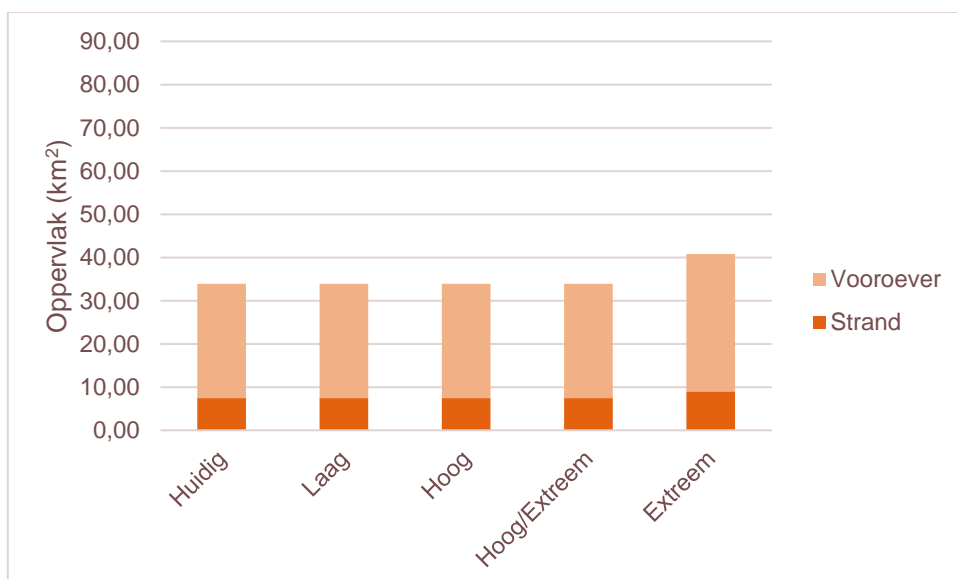
De beïnvloede kustoppervlakte volgt direct uit de eerder beschreven schematisering (Tabel 3-2, Tabel 3-4 en Tabel 3-6). Per scenario is berekend hoeveel van de beschikbare oppervlakte in de verschillende varianten nodig is om het verwachte suppletievolume onder de verschillende scenario's kwijt te kunnen.

Figuur 4-4 geeft de beïnvloede oppervlakte per kustzone per scenario weer voor de Waddenkust. Er is een toename van het huidige naar het hoge scenario omdat er steeds meer oppervlakte nodig is om het benodigde volume te suppleren, vanaf scenario hoog ook met systeem suppleties. Vanaf scenario hoog is de maximale oppervlakte bereikt en is er geen ruimte meer qua oppervlakte. Vanaf hoog/extreem kan ook de frequentie niet verder verhoogd worden en ontstaat er een tekort aan ruimte waardoor er een suppletietekort ontstaat van respectievelijk 4,21 en 13,71 Mm³/yr voor scenario's hoog/extreem en extreem.



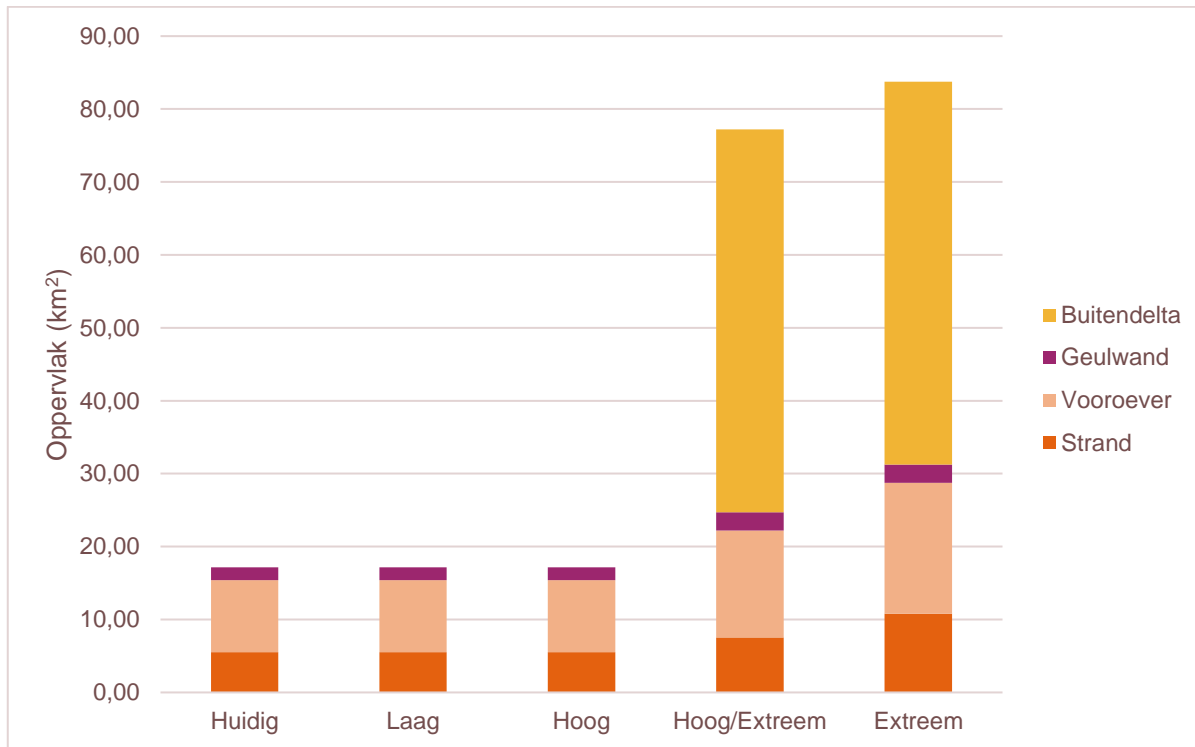
Figuur 4-4 Beïnvloed oppervlak per kustzone per scenario voor de Waddenkust.

Figuur 4-5 geeft de beïnvloede oppervlakte per kustzone per scenario weer voor de Hollandse kust. De totale oppervlakte blijft gelijk tot scenario hoog/extreem omdat tot dan het extra volume gesuppleerd kan worden door op bestaande locaties meer te suppleren en de frequentie te verhogen. Bij het extreme scenario moet ook gesuppleerd worden op andere locaties wat leidt tot een verhoogd beïnvloed oppervlakte.



Figuur 4-5 Beïnvloed oppervlak per kustzone per scenario voor de Hollandse kust.

Figuur 4-6 geeft de beïnvloede oppervlakte per kustzone per scenario weer voor de Deltakust. Voor scenario's huidig, laag, hoog is het oppervlakte en de verdeling tussen kustzones gelijk omdat het benodigde volume gesuppleerd kan worden door op bestaande locaties meer te suppleren en de frequentie te verhogen. Vanaf hoog/extreem zijn meer suppletie locaties en systeem suppleties nodig. Door meer systeem suppleties bij het extreme scenario wordt ook nog een groter oppervlak aan strand en vooroever beïnvloed waardoor het totale oppervlak nog hoger uitvalt.



Figuur 4-6 Beïnvloed oppervlak per kustzone per scenario voor de Deltakust.

4.2.3 Bodemdieren

Hieronder volgt eerst een beschrijving van de analyse uit de rapportering over de matrix (Arcadis, 2020). Daaronder volgen de resultaten voor deze indicator voor de verschillende scenario's in de verschillende deelgebieden.

Er wordt hier aangenomen dat alle dieren sterven binnen het bedekte oppervlak als gevolg van verstikking. Bij de toegepaste laagdiktes bij suppleties, die minimaal enkele decimeters zijn, is dit een geldige aanname. De sterfte leidt bij een groter bedekt areaal dus tot een groter effect op de bodemdiergemeenschap.

Tabel 4-3 laat de gehanteerde aantallen zien die afkomstig zijn uit de in 2020 opgestelde matrix (Arcadis, 2020)¹. Aangezien de fysische eigenschappen van het zand een effect hebben op de bodemdiersamenstelling en deze eigenschappen verschillen tussen de Waddenkust, de Hollandse kust en de Deltakust is voor bodemdiergemeenschappen op het strand onderscheid gemaakt in de verschillende deelgebieden. Voor de bodemdiergemeenschap samenstelling in de vooroever zijn de gegevens gebruikt die zijn verzameld op de vooroevers van Castricum en Egmond (Hollandse kust). De vooroever gegevens zijn ook gebruikt voor de geulwand. Voor de diversiteit en aantallen individuen van de buitendelta zijn getallen gehanteerd zoals die worden besproken in het rapport over de bodemgemeenschap van de t0 meting voor een pilotsuppletie in het Amelandse Zeegat.

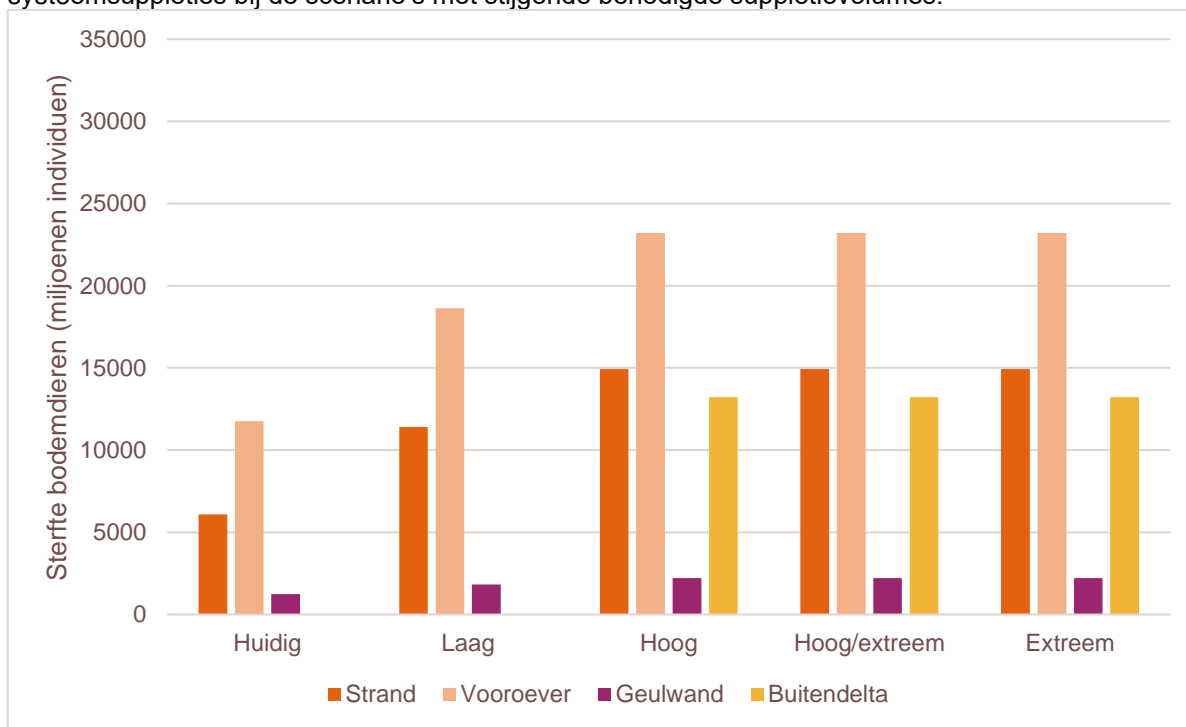
¹ Deze gegevens zijn niet aangevuld met de recenter beschikbaar gekomen gegevens van de pilot buitendeltasuppletie en andere monitoring, omdat dit niet paste binnen de scope van deze studie.

Tabel 4-3 Gehanteerde waarden voor aantallen soorten per vierkante meter voor de verschillende regio's voor strand en vooroever (Arcadis, 2020).

Deelgebied	Aantal individuen (n/m ²)		
	Strand	Vooroever	Buitendelta
Waddenkust	1941,3		
Hollandse kust	600,2	1031	660,75
Deltakust	222		

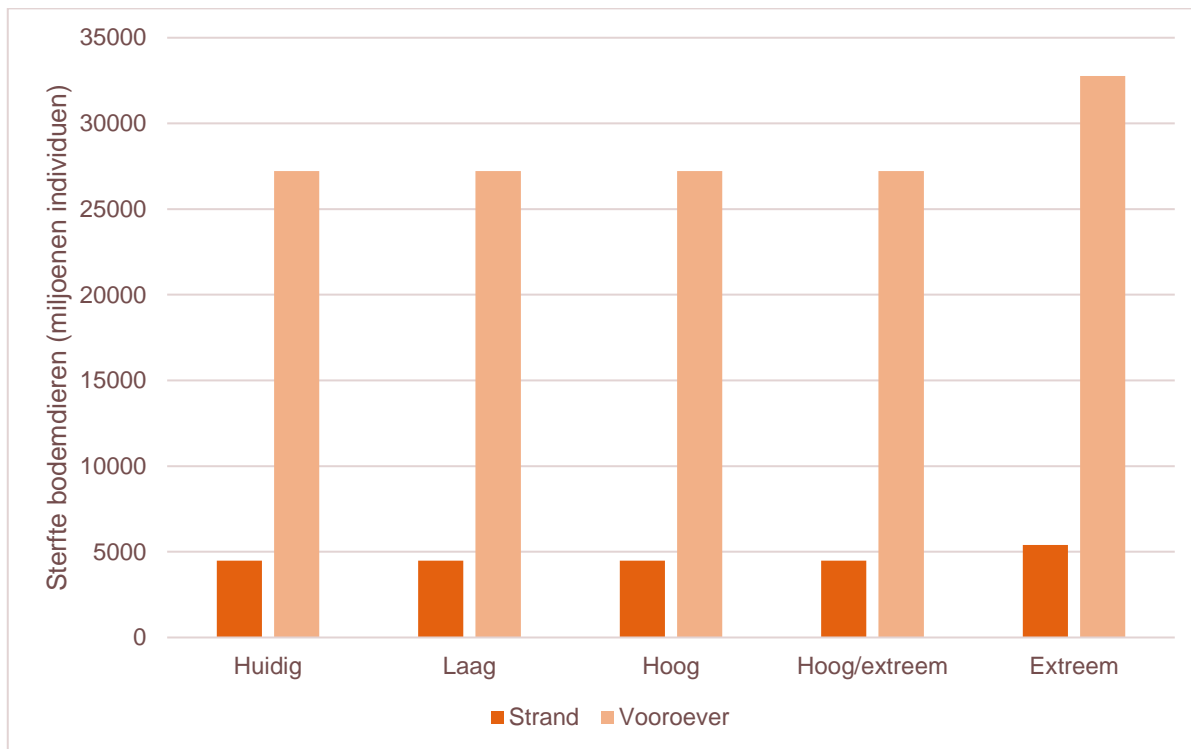
De dichtheden uit Tabel 4-3 zijn gecombineerd met de beïnvloede oppervlakten om een totale impact op bodemdieren te berekenen.

Figuur 4-7 geeft de sterfte aan bodemdieren door de suppleties voor de Waddenkust weer. Het grote oppervlak van de voordelta dat beïnvloed wordt samen met de hoge dichtheid aan bodemdieren geeft deze kustzone de hoogste bodemdiersterfte. Verder volgen de verschillen tussen de scenario's de eerder beschreven toename in oppervlak en systeemsuppleties bij de scenario's met stijgende benodigde suppletievolumes.



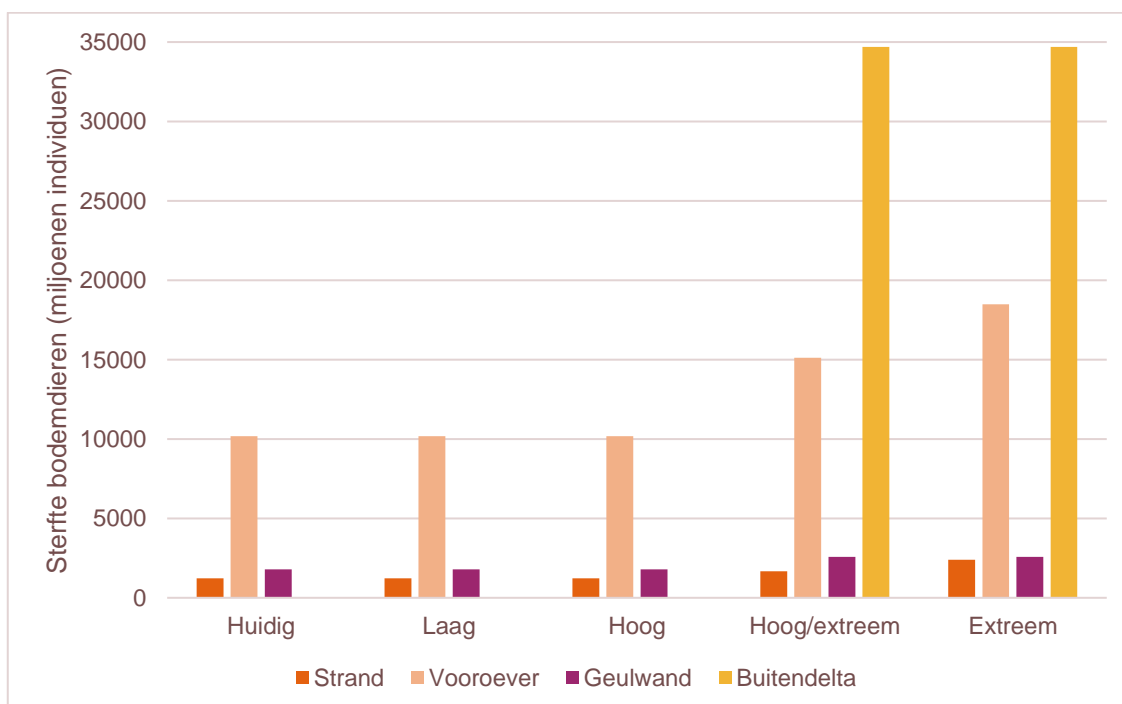
Figuur 4-7 Sterfte bodemdieren voor de kustzones van de Waddenkust onder de verschillende zeespiegelstijgingsscenario's.

Figuur 4-8 geeft de sterfte aan bodemdieren door de suppleties weer voor de Hollandse kust. Ook hier resulteert de grote oppervlakte op de vooroever samen met een hoge dichtheid aan bodemdieren in een grotere totale sterfte daar dan op het strand. De trend tussen de scenario's volgt verder dezelfde als die van het beïnvloede oppervlakte. Pas bij het extreme scenario is meer oppervlakte nodig waardoor daar pas een stijging in bodemdiersterfte zichtbaar is.



Figuur 4-8 Sterfte bodemdieren voor de kustzones van de Hollandse kust onder de verschillende zeespiegelstijgingsscenario's.

Figuur 4-9 geeft de sterfte aan bodemdieren door de supplementies weer voor de Deltakust. Een duidelijk verschil met de Waddenkust is de relatief hoge sterfte in de buitendelta bij scenario's hoog/extreem en extreem. Dit komt door de grote beïnvloede oppervlakte door de systeemsuppleties vergeleken met de Strategie 1 supplementies. Daarnaast is ook een lagere sterfte op het strand dan bij de Waddenkust zichtbaar. Dit komt vooral omdat de bodemdierdichtheid substantieel lager is in de Deltakust dan de Waddenkust (Tabel 4-3). Ook hier volgt de algemene trend over de scenario's die van de beïnvloede oppervlakte. In de scenario's huidig, laag en hoog is niet meer oppervlakte nodig waardoor ook de bodemdiersterfte gelijk is. Vanaf hoog/extreem is steeds meer oppervlakte nodig met daarbij ook nog de toevoeging van systeemsuppleties waardoor ook de bodemdiersterfte stijgt.



Figuur 4-9 Sterfte bodemdieren voor de kustzones van de Deltakust onder de verschillende zeespiegelstijgingsscenario's.

4.3 **Systeemindicatoren**

4.3.1 **Vogels**

Vogels die van de kust gebruik maken worden op verschillende manieren beïnvloed door kustsuppleties. Een belangrijk onderscheid daarbij is tussen broedende en niet-broedende vogels. Niet-broedende vogels worden mogelijk verstoord, of kunnen geen gebruik kunnen maken van foerageergebied waardoor ze moeten uitwijken naar een ander gebied. Bij broedvogels is de impact groter, deze kunnen tijdens de broedtijd niet uitwijken omdat zij op tijd weer terug bij hun nest moeten zijn. Mocht de verstoring van broedvogels groot genoeg zijn of lang genoeg duren dan kan dit leiden tot sterke vermindering van broedsucces met een direct effect op de populatie van die soort.

Er zijn is ook verschillen tussen soorten wat betreft de noodzaak voor hun aanwezigheid in de kustzones voor broeden, foerageren, rusten, etc. Sommige soorten zijn het hele jaar aanwezig in de kustzone door hun voedselvoorkeur of nestlocatie. Andere soorten kunnen bij verstoring landinwaarts uitwijken, of zijn maar een deel van het jaar aanwezig in de Nederlandse kustzone.

Als onderdeel van het project Ecologisch gericht suppleren selecteerde Deltares elf representatieve vogelsoorten als voorbeeldsoorten voor de verschillende effecten van kustsuppleties (Deltares, 2016a). Daarin is een duidelijk onderscheid gemaakt tussen soorten die door hun leefwijze relatief weinig effect ondervinden van kustsuppleties (grote stern, roodkeelduiker, fuut, stormmeeuw, zilvermeeuw en kleine mantelmeeuw) en soorten die gevoeliger zijn (aalscholver, strandplevier, bontbekplevier, drieteenstrandloper en zwarte zee-eend). Aan de hand van deze gevoeligeren soorten worden hieronder effecten in de verschillende kustzones beschreven.

Aalscholvers maken gebruik van de vooroeverzone voor foerageren door te duiken naar vis. Daarbij zijn ze in staat om ook vis te vangen in relatief troebel water (Ministerie van LNV, 2008). Buiten het broedseizoen kunnen op zee foeragerende aalscholvers uitwijken naar andere gebieden en ze zijn maar beperkt verstoringsgevoelig (verstoringsafstand 75 tot 150 meter). Er zijn echter ook broedkolonies die op de vooroever foerageren. Deze groepen die tijdens het broedseizoen (vanaf eind december tot eind augustus met meerdere legsels) aan een locatie gebonden zullen een negatief effect op hun broedsucces ervaren door lokale grootschalige vooroeversuppleties. Voor broedende aalscholvers zou het broedseizoen vermeden moeten worden.

Strand- en bontbekplevieren foerageren langs de waterlijn. Strandplevieren zijn vooral in hun broedperiode (april-juni) aanwezig in het Waddengebied en langs de Deltakust. Bontbekplevieren zijn het hele jaar door aanwezig met een piek in augustus en september. Deze vogel broedt (april-juli) op schelpenstrandjes. Door verstoring door recreatie wordt er nog maar weinig gebroed op Noordzeestranden. De hoogste aantallen vogels zijn te vinden in het Waddengebied en de Zeeuwse Delta. Naast directe verstoring door de suppletie-activiteiten worden deze soorten ook beïnvloed door bedelving van het intergetijdengebied waar ze foerageren. De meest gevoelige periode voor deze soorten ligt dus tussen april en juli.

Drieteenstrandlopers komen langs de hele kust voor met de grootste aantallen van september tot en met mei met ook voor deze soort de grootste aantallen in het Waddengebied en de Zeeuwse delta. Ook deze soort foerageert langs de waterlijn. Hoewel deze soort maar beperkt verstoringsgevoelig is, kan hun foerageervermogen negatief beïnvloed worden door bedekking van het intergetijdengebied. Voor deze soort zouden suppleties het beste vermeden kunnen worden tussen september en mei.

Zwarte zee-eenden zijn het hele jaar door aanwezig in ondiepe kustwateren tot 20m diepte. 's Winters komen grote aantallen zwarte zee-eenden vanuit het noorden naar de Nederlandse kust om te overwinteren. De soort foerageert duikend op schelpdieren en is zeer verstoringsgevoelig (1500 tot 3500 meter). Daarom moet vooral de overwinterperiode als er zeer grote aantallen aanwezig zijn ontzien worden qua suppleties. Dit geldt dan qua verstoring dus voor strandsuppleties, vooroever- en geulwand suppleties en systeem suppleties omdat deze allemaal het foerageergebied van de zwarte zee-eend doorkruisen vanaf de zandwinningsgebieden. Daarnaast wordt de zwarte zee-eend ook beïnvloed door het effect op de schaaldieren waar ze naar duiken als voedsel bij vooroever, geulwand en buitendeltasuppleties (4.2.3 en 4.3.2). Dit is echter niet langs de hele kust het geval. Zwarte zee-eendconcentraties zijn in de winter vooral aanwezig ten noorden van de Waddeneilanden en in de Voordelta.

Kijkend naar deze soorten die door het Ecologisch gericht suppleren project geïdentificeerd werden als meer gevoelig voor kustsuppleties, zien we dat ze een effect ondervinden van suppleties in verschillende kustzones. Daarnaast laten

ze ook de complexiteit zien van het vinden van de minst schadelijke suppletiemaanden. De twee pleviersoorten broeden van april tot en met juli en de drieteenstrandlopers zijn het meest gevoelig van september tot en met mei.

Waddenkust

Voor de kustzones strand, vooroever en geulwand neemt de beïnvloede oppervlakte toe van huidig tot hoog scenario. Voor alle drie neemt de terugkeertijd af van huidig naar laag scenario. Vanaf het hoge scenario zijn ook systeemsuppleties in de buitendelta nodig waarbij de terugkeertijd nog afneemt van hoog naar hoog/extreem.

De bovengenoemde toename in beïnvloed oppervlakte is ook te zien in de aantallen getroffen bodemdieren. Voor vogels die van de Waddenkust gebruik maken zijn beide toenames belangrijk omdat dit zowel leefgebied (bv. strand voor de strandloper en open zee voor de zwarte zee-eend) als voedselbronnen raakt.

De terugkeertijden liggen rond de vier jaar of hoger. Het is dus niet zo dat bij extremere scenario's locaties elk jaar gesuppleerd moeten worden, maar zoals eerder aangegeven is het vooral het moment van de suppletie in het jaar van belang omdat eens in de zoveel jaar een nadelig effect op het broedsucces van broedkolonies veel schadelijker is voor een algemene populatie dan als een gedeelte van hun foerageergebied eens in de zoveel jaar niet beschikbaar is. Daarbij moet natuurlijk ook de totale druk op vogelsoorten van suppleties langs de gehele kust worden meegewogen. Zie ook 4.3.2 voor effecten op hersteltijden van voedselbronnen.

Hollandse kust

Een stijging in beïnvloed oppervlakte en een daling in terugkeertijden zijn zichtbaar vanaf het hoog/extreme scenario. Deze combinatie verhoogt de verstoringdruk op vogels, vooral tijdens de broedtijd. Daarnaast leidt het toenemende beïnvloed oppervlakte door suppleties ook tot minder beschikbaar voedsel voor relevante soorten.

Terugkeertijden liggen tussen de 5 en 8 jaar. Het is dus niet zo dat bij extremere scenario's stukken van de Hollandse kust elk jaar verstoord worden, maar een periodieke impact op broedsucces van kolonies langs de kust kan wel een schadelijk effect hebben op de trend van kustbroedende populaties.

Deltakust

De beïnvloede oppervlakte neemt toe voor strand-, vooroever- en geulwandsuppleties vanaf het hoog/extreme scenario. Ook systeemsuppleties zijn vanaf het hoog/extreme scenario nodig. De terugkeertijden nemen voor strand, vooroever, geulwand af vanaf het hoge scenario.

Terwijl de terugkeertijden voor de andere kustzones substantieel hoger liggen zijn vooral die voor het strand beperkt (~ 3 jaar). Dit zijn de laagste terugkeertijden vergeleken met de andere deelgebieden en kustzones. Zoals eerder gezegd is het voor de verschillende vogelsoorten van belang wanneer in het jaar gesuppleerd wordt zodat gevoelige periodes indien mogelijk vermeden kunnen worden.

4.3.2 Habitats

Bij het beschouwen van de beïnvloede habitats wordt gekeken naar het strand van de duinvoet tot aan de laagwaterlijn en het gebied onderwater vanaf de laagwaterlijn. De gebieden onderwater bestaan uit e onderwateroever en de buitendelta's. Onder Europese habitatrichtlijn is het gebied onderwater een aangewezen habitattypen, namelijk H1110 Permanent overstromde zandbanken. De verschillende duinhabitats die in potentie gevolgen kunnen ondervinden van met name strandsuppleties worden hier niet beschouwd. Het grootste effect op de duinen van de zandsuppleties die worden uitgevoerd vanwege de kustlijnzorg, is dat de duinhabitats niet verloren gaan door kusterosie. Zonder de maatregelen vanwege de kustlijnzorg zou op veel plekken langs de kust erosie optreden, waardoor areaalverlies van duinhabitats zou optreden. Bij versnelde zeespiegelstijging zou deze erosie en het areaalverlies toenemen. Het behoud van de duinen met de daarbij behorende habitats is daarmee een van de belangrijkste gevolgen van het uitvoeren van de zandsuppleties.

Onderwateroever en buitendelta's (Habitattypen H1110 Permanent overstromde zandbanken)

De primaire beschermde habitat die door onderwatersuppleties beïnvloed wordt is H1110 Permanent overstromde zandbanken. Het betreft zandbanken in ondiepe delen van de zee die voortdurend onder water staan. Daarbij is het water in de kustgebieden zelden meer dan 20 meter diep. Plaatselijk kunnen harde substraten als veen, keileem of stenen en schelpenbanken en andere biogene structuren voorkomen (Ministerie van LNV, 2014). Typische soorten voor deze habitat zijn diverse soorten borstelwormen, vissen, weekdieren, kreeftachtigen en stekelhuidigen. Over deze soortgroepen zijn er grote verschillen tussen kort- en langlevende soorten in de mate waarin ze zich kunnen herstellen na verstoring. In een goed functionerend habitattypen H1110 is er een balans tussen deze kort- en

langlevende soorten, maar de specifieke soortensamenstelling verschilt in de ruimte en tijd door natuurlijke dynamiek. Hoogdynamische omstandigheden creëren een gemeenschap van kortlevende, snel reproducerende soorten zoals wormen en kleine kreeftachtigen. Laagdynamische gebieden hebben meestal een grotere biodiversiteit en hogere dichtheden van langlevende soorten zoals schelpdieren en sessiele bodemdieren. Daarnaast zijn laagdynamische gebieden ook belangrijk voor juveniele vissen (Ministerie van LNV, 2014).

Ook menselijke ingrepen zoals visserij en kustsuppleties hebben effect op de lokale gemeenschap van soorten. Net als bij natuurlijke dynamiek zijn het de kortlevende soorten die zich sneller kunnen herstellen in een verstoord gebied. Deze kortlevende soorten kunnen zich binnen een tot enkele jaren herstellen (Ministerie van LNV, 2014). Voor de volledige gemeenschap is dit echter een proces dat langer duurt. Verschillende eigenschappen van de gemeenschap hebben verschillende hersteltermijnen. Na de kortlevende soorten keren ook langer levende soorten terug, maar daarna duurt het nog meerdere jaren voor de biomassa en leeftijdsopbouw van de verschillende soorten zijn hersteld. In het Ecologische Effecten van Kustsuppleties project uit 2016 (Herman, Meijer - Holzhauser, Vergouwen, Wijsman, & Baptist, 2016) kwamen ze gebaseerd op (Rozemeijer, 2009) op een hersteltijd van 4 tot 6 jaar voor vooroever gemeenschappen. Een recenter onderzoek, (van Hal, Volwater, Aarts, Brasseur, & Glorius, 2021), voerde bodembemonstering uit voor en na een suppletie in de buitendelta van het Ameland Zeegat (suppletie in februari 2019). 7 maanden na de suppletie (september) liet de bemonstering met een boxcore zien dat het aantal soorten vergelijkbaar was met voor de suppletie. Er werden echter nagenoeg geen schelpdieren aangetroffen. Dit was in tegenspraak met een eerdere bemonstering na 4 maanden (juni) voor zandspiering. Deze bemonstering met ander tuig besloeg een groter oppervlak en trof wel schelpdieren aan. Deze twee resultaten wijzen naar het eerder genoemde verschil in hersteltijd tussen eigenschappen van soortgemeenschappen (hier biodiversiteit vs. dichtheden/biomassa). Schelpdieren waren wel aanwezig na 7 maanden maar in veel lagere dichtheden waardoor ze door bemonstering met boxcore gemist werden.

De frequentie van verstoringen zoals suppleties heeft dus een effect op de mate waarin een gemeenschap kan herstellen voor de volgende verstoring plaatsvindt. De tijd die een gemeenschap nodig heeft om zich te herstellen tot het niveau van voor de verstoring hangt ook af van de mate van dynamiek waar deze natuurlijk aan blootgesteld wordt. Voor de verdere beredenering van de uitkomsten voor de verschillende scenario's gaan we hier echter uit van een hersteltijd van 4-6 jaar voor H1110 gemeenschappen, dit worden nader toegelicht in de volgende paragraaf.

Stranden

Het strand is de zone tussen de duinvoet en de laagwaterlijn. Van de duinvoet naar de laagwaterlijn is er een gradiënt van de mate en frequentie waarin het strand bedekt wordt door water. Dit heeft ook een gevolg voor welke diersoorten waarop het strand voorkomen. Aan de laagwaterlijn is de gemeenschap vergelijkbaar met de hoogdynamische delen van het eerder beschreven H1110 habitat: vooral wormen en kleine kreeftachtigen (Deltares, 2016b).

Bij bedekking door strandsuppleties vindt er een verstoring plaats van de gemeenschap die in het strand leeft. Voor het ecologisch gericht suppleren project is bij strandsuppleties op Ameland in 2010 en 2011 vervolgens de ontwikkeling van de strandgemeenschap gevolgd (Deltares, 2016b). De ontwikkeling volgde hetzelfde patroon zoals eerder beschreven voor H1110. Kortlevende soorten zoals wormen waren relatief snel weer aanwezig in hogere aantallen terwijl schelpdieren zoals het nonnetje langer deden over herstel (meer dan 18 maanden). Binnen het project vond een winter- en een zomersuppletie plaats op verschillende locaties. Het beeld van de zich herstellende gemeenschap op deze twee locaties is complex en laat ook vooral zien dat het herstel ook sterk beïnvloed wordt door continue ecologische en fysische processen op het strand. Andere studies laten soortgelijke effecten zien. (Paris, Leach, & Corbett, 2023) is een van de weinige studies die over langer dan 2 jaar het herstel van de habitat heeft gevolgd. Zij reviewden 21 studies tussen 2000 en 2022 waarbij het herstel gemiddeld 15 maanden werd gevolgd. Het merendeel van die studies zag herstel binnen twee jaar. Paris et al. volgden echter een strandsuppletie van 2 jaar voor de suppletie tot 7 jaar erna. Zij zagen wel veranderingen in biomassa's na de suppletie, maar deze waren niet significant groter dan de natuurlijke schommelingen in biomassa's die in de omliggende jaren gebeurden en ook zichtbaar waren op controlestranden. Hier was dus van zowel de impact als het herstel geen duidelijk signaal in de omliggende ecologische variatie. Bij de systeemsuppletie door de Zandmotor ontstond op grote ruimtelijke schaal een nieuw "lagune" systeem met veranderingen in zandkorrelgrootte, stromingspatronen en dieptes waardoor ook de litorale biotische gemeenschap sterk veranderde (van Egmond, van Bodegom, Berg, Janssen, & Aerts, 2018; Herman, Moons, Wijsman, Luijendijk, & Ysebaert, 2021).

Ook voor de strandgemeenschap is er dus een complex samenspel van factoren rond het effect van suppleties. Abiotische factoren zoals zandkorrelgrootte en veranderende stromingen en ecologische factoren zoals deel van het strand waar een soort voorkomt, de voorplantingsmethode en bijvoorbeeld het herzadingssucces van getroffen soorten door larven vanuit het plankton (i.e. meroplankton) hebben een sterk effect op de hersteltijd van de

gemeenschap als geheel. De periode van herzading van strandsoorten uit het plankton is ook een proces waar rekening mee gehouden moet worden in de planning van supplementies over het jaar om herstel te bevorderen.

Naast het eenmalige effect van supplementies moet ook rekening gehouden worden met het herhalende karakter dat in deze studie naar voren komt door afnemende terugkeertijden bij extremere scenario's. Een zich herhalende impact kan een versterkend effect hebben op soorten die verstoring gevoeliger zijn. Dit kan ervoor zorgen dat het ecosysteem als geheel weerstand tegen verstoring kwijtraakt en dus bij toekomstige verstoringen een grotere reactie vertoont.

Voor de verdere redenering van de uitkomsten van de verschillende scenario's gaan we uit van een hersteltijd van 2 jaar voor de strandhabitats.

Voor de stranden in de drie deelgebieden is er geen scenario waar de terugkeertijd in de buurt komt van de 2 jaar hersteltijd (Tabel 4-4). Het dichtstbij komt de Deltakust met een strand terugkeertijd van 2,76 jaar voor het extreme scenario. Voor het H1110 habitat is vooral de Waddenkust opvallend qua beperkt herstelpotentieel (Tabel 4-4). De terugkeertijd op de vooroever valt voor alle scenario's binnen de maximale hersteltijd van 6 jaar en dit is ook voor de buitendelta het geval vanaf het hoog/extreme scenario. Verder is alleen de Hollandse kust in het extreme scenario opvallend met een terugkeertijd die gelijk is aan de maximale hersteltijd. Op de Deltakust is in geen van de kustzones de terugkeertijd korter dan de hersteltijd.

Tabel 4-4 Terugkeertijden in jaren voor de kustzones van de deelgebieden onder de zeespiegelstijging scenario's. Oranje gekleurde terugkeertijden vallen binnen de hersteltijd, waarbij voor strand de strandhersteltijd is gebruikt en voor vooroever, geulwand en buitendelta de H1110 hersteltijd.

Scenario	Waddenkust				Hollandse kust		Deltakust			
	Strand	Voor- oever	Geul- wand	Buiten- delta	Strand	Voor- oever	Strand	Voor- oever	Geul- wand	Buiten- delta
Huidig	4,17	4,69	15,85		7,22	7,50	3,70	16,67	50,00	
Laag	3,56	4,00	10,00		7,22	7,50	3,70	16,67	50,00	
Hoog	3,56	4,00	10,00	8,68	7,22	7,50	3,20	14,42	43,25	
Hoog/ Extreem	3,56	4,00	10,00	5,00	6,37	6,61	2,93	12,67	40,00	192,47
Extreem	3,56	4,00	10,00	5,00	5,78	6,00	2,76	10,12	40,00	31,54

4.3.3 Biodiversiteit

Uit de eerdere paragrafen komt een complex beeld naar voren voor verschillende soortgroepen. Per overkoepelende groep (vogels, benthos) is het effect erg soortspecifiek. Verschillende soorten zijn in verschillende jaargetijden minder of meer afhankelijk van de verstoorde kustzone voor voedsel en rusten/broeden en soorten zijn door hun specifieke levensduur en voortplantingsvermogen beter of slechter in staat om terug te komen na een verstoring van hun habitat. Het overkoepelende herstel verloopt ook verschillend voor biodiversiteit, biomassa en verschillende leeftijdsklassen van soorten. Daarnaast kwam bij habitats naar voren dat het herstel van een supplementie plaatsvindt onder doorgaande ecologische en fysische effecten waardoor de mate van herstel kan variëren.

Naast de eerder behandelde soortgroepen zijn er nog andere onderdelen van het ecosysteem die mogelijk beïnvloed worden door supplementies.

Het fytoplankton gebruikt zonlicht voor primaire productie van biomassa. Het baggeren van sediment en vooral het vervolgens storten voor onderwatersuppleties creëren slibwolken die vertroebelend werken in de waterkolom. Dit belemmert de fotosynthese van het fytoplankton. Een toename in oppervlakte en frequentie van supplementies zullen een navenant negatief effect hebben op de primaire productie als de supplementies plaatsvinden in de lente of zomer.

Het zoöplankton ondervindt zelf niet of nauwelijks effect van de onderwatersuppleties, maar een groot deel van het zoöplankton begraast het fytoplankton en zou dus een secundair effect kunnen ondervinden als de groei van het fytoplankton belemmerd wordt door vertroebeling in de waterkolom.

Vissen en andere vrij zwemmende soorten zoals inktvissen ondervinden weinig direct effect van de onderwatersuppleties. Een uitzondering daarop zijn juvenielen die gebruik maken van het H1110 habitat als kraamkamer en gevoeliger zijn voor menselijke ingrepen als suppleties (Ministerie van LNV, 2014). Er zijn echter wel secundaire effecten mogelijk door effecten op voedselbronnen zoals bodemdieren, of effecten op predatie door zichtjagende vogels waarbij er een interactie is tussen het zichtvermogen van de jagende vogels en de prooivissen.

De zeezoogdieren in het gebied worden mogelijk verstoord door de suppletieschepen, maar hebben normaal gesproken ruim voldoende uitwijkmogelijkheden. Ook hun prooidieren ondervinden geen direct effect (behalve mogelijk als juveniel) en zeehonden en bruinvissen maken niet tot nauwelijks gebruik van zicht bij het jagen dus mogelijke vertroebeling heeft ook geen effect. Mogelijke gevolgen voor de zeezoogdieren qua voedsel zouden dus vanuit verder in het voedselweb moeten komen. Gevolgen door verstoring op het strand en/of zandplaten hebben mogelijk een groter effect op zeehonden. Zeehonden gebruiken zandplaten en stranden om te rusten, te verharren en hun jongen te zogen. Tijdens de verhaar- en zoogperiodes zijn ze veel gevoeliger voor verstoring. Grijs zeehonden maken in andere landen gebruik van hoger gelegen droge stranden/duingebieden voor hun jongen. De jongen blijven hier meerdere weken. In Nederland gebruikt de grijze zeehond slechts beperkt gebruik van hogere stranden en duinen. Hier maken de grijze zeehonden voornamelijk gebruik van hoge zandplaten, zoals Richel. Dit komt mogelijk door meer verstoring van de duinen en stranden door recreanten dan in andere landen zoals Schotland (WUR, 2024).

Het is lastig om een overall conclusie te verbinden aan de gevolgen van de varianten op de biodiversiteit. Globaal wordt verondersteld dat bij een toename van de suppletievolume de kans op het optreden van gevolgen voor de biodiversiteit toeneemt. In Tabel 4-5 staat een overzicht van deze kwalitatieve beoordeling, op basis van de volumes in Tabel 2-1.

Tabel 4-5 Kwalitatieve beoordeling van de gevolgen voor de biodiversiteit per scenario voor de drie deelgebieden.

Scenario	Waddenkust (Mm ³ /yr)	Hollandse kust (Mm ³ /yr)	Deltakust (Mm ³ /yr)
Huidig	0	0	0
Laag	-	0	0
Hoog	--	-	0
Hoog/extreem	---	-	-
Extreem	---	-	-

4.3.4 Connectiviteit

Connectiviteit beschrijft de verbindingen tussen kustzones, habitats, en op grotere schaal kustgebieden. Dit kan gaan over soorten die voor een gedeelte van hun levensloop tussen gebieden migreren zoals trekvissen die via de Zeeuwse deltakust tussen zout en zoet water bewegen, of vissen die opgroeien in de Waddenzee en dan naar de Noordzee migreren. Daarnaast kunnen soorten ook bepaalde habitats gebruiken voor bepaalde functies zoals zeehonden die in open water foerageren, maar rusten, verharren en zogen op zandbanken of vogelsoorten die in duinen broeden en op zee foerageren. Daarnaast speelt connectiviteit ook een rol op een hoger ecologisch niveau. Zo wordt de Noordzee voor de Nederlandse kust gekenmerkt door de uitstroom van rivierwater o.a. via de Deltakust en Waddenkust met bijbehorende hoge nutriëntenconcentraties die de primaire productie in de Noordzee beïnvloeden.

Qua connectiviteit langs de Nederlandse kust zijn er grote menselijke ingrepen geweest, b.v. door de deltawerken of de Afsluitdijk. Deze hebben de natuurlijke estuariene verbindingen, met een geleidelijke overgang van zout zeewater naar zoetwater in de rivier in het achterland, sterk verminderd. Op dit moment zijn alleen de Westerschelde en de Eems-Dollard nog een (semi-)natuurlijke estuariene overgangen. Daarom zijn er veel initiatieven gaande om connectiviteit van kustwateren te verbeteren zoals het Ruim Baan voor Vissen project.

De hier beschreven scenario's voor toekomstige kustsuppleties zijn naar alle waarschijnlijkheid te lokaal en infrequent om op hoger ecologisch niveau de connectiviteit te belemmeren. De uitstroom van voedingsstoffen via de Wadden- en Deltakust en verdere riviermondingen zal niet geremd worden. Ook migrerende soorten zullen door de lokale suppleties niet belemmerd worden in hun migratiegedrag. Op kleinere schaal is het echter wel mogelijk dat dieren die zich tussen gebieden verplaatsen verstoord worden door de suppletieactiviteiten. De eerder genoemde zeehonden en

vogels die delen van de kustzone gebruiken voor essentiële functies kunnen lokaal belemmerd worden met mogelijke effecten op voortplantingssucces en daardoor op de populaties. Zoals blijkt uit de schematiseringen zullen bij toenemende zeespiegelstijging de frequentie en ruimtelijke impact toenemen. Op dit moment is het vanuit natuurwetgeving al verplicht om beschermde soorten zoals broedvogels en zeehonden te ontzien bij suppletiewerkzaamheden door ruimtelijk afstand te houden, of gevoelige perioden te ontwijken. Bij een toenemende frequentie en groter suppletieoppervlak zal deze natuurbescherming steeds complexer worden omdat de ruimte en tijd die beschikbaar zijn steeds beperkter zullen worden.

Net als bij de biodiversiteit is het lastig om een overall conclusie te verbinden aan de gevolgen van de varianten. Ook hier wordt verondersteld dat bij een toename van de suppletievolumes de kans op het optreden van gevolgen voor de connectiviteit toeneemt en daarom kunnen de kwalitatieve beoordelingen in *Tabel 4-5* voor de biodiversiteit ook worden beschouwd als de beoordeling van connectiviteit.

4.3.5 Strandtoerisme

Het strandtoerisme is een gecombineerde indicator die het onderwerp van meerdere indicatoren uit de matrix van de eerdere studie samenneemt, zoals de recreatiewaarde, de zwemveiligheid en de beschikbaarheid. In de eerdere matrix werd aan de hand van eenvoudige parameters berekend hoeveel meter strandbreedte zou worden toegevoegd door volumes van strand- en vooroeversuppleties. Binnen het huidige project met een perspectief naar toekomstige zeespiegelstijging is deze eenvoudige kwantificering niet meer te onderbouwen, omdat de toekomstige situatie bij een (sterk) versneld stijgende zeespiegel niet meer gecorreleerd kan worden aan de waarnemingen die zijn gedaan bij de huidige condities van zeespiegelstijging en kustbeheer. Daarom wordt hier een kwalitatief perspectief gegeven naar mogelijke effecten van de verwachte suppleties op strandtoerisme.

Zoals beschreven voor de eerdere matrix worden delen van de totale strandlengte van de kustgebieden gebruikt voor recreatie: 11%, 32% en 28% voor de Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust respectievelijk (Stronkhorst & van Buren, 2012). Kijkend naar verschillen tussen kustgemeentes zijn er ook grote verschillen in recreatie-intensiteit door aspecten zoals bereikbaarheid vanuit grotere steden door wegen en openbaar vervoer en lokale parkeergelegenheid (Arcadis, 2020). Naar alle waarschijnlijkheid zal de Nederlandse bevolking de komende decennia blijven doorgroeien met een bijbehorende groei van strandrecreatie. Hierdoor zal het percentage van de kustgebieden dat gebruikt wordt voor recreatie ook toenemen, o.a. doordat mensen zich meer verspreiden om lokale drukte te ontlopen.

Uit de schematisering blijkt dat bij de verschillende scenario's op een bepaald moment de oppervlakte en frequentie van suppleties moeten toenemen om het benodigde volume te kunnen suppleren. Deze toename in ruimte en tijd kan mogelijk tot conflicten leiden met de toenemende vraag naar ruimte voor strandtoerisme. Dat geldt met name voor de strandsuppleties, omdat de impact hiervan op de beschikbaarheid van het strand het duidelijkst is. Het strandtoerisme aan de Nederlandse kust kent echter wel een piek in de zomermaanden. Rijkswaterstaat geeft aan dat ze in principe niet in juli en augustus op het strand werken om overlast te minimaliseren. De toekomstige interactie tussen kustsuppleties en strandtoerisme zal in grote mate afhangen van de mogelijkheid om locaties en momenten in het jaar met het hoogste toerisme te ontzien terwijl de benodigde suppleties wel uitgevoerd worden.

In de 2020 matrix was er als onderdeel van de socio-economische indicatoren ook de indicator Zwemveiligheid. Voor deze indicator werd toen al aangegeven dat er weinig bekend was over de relatie tussen kustsuppleties en daaropvolgende zwemveiligheid. Voor alle suppletievormen behalve de zandmotor zijn de gevolgen voor de zwemveiligheid als zeer beperkt ingeschat. Aan zandmotor is een grote impact op de zwemveiligheid toegeschreven, vanwege de relatief grote veranderingen. Vanwege de grote afstand tussen de kust en de buitendeltasuppleties worden daarbij geen gevolgen voor de zwemveiligheid verwacht. Voor de Hollandse kust zijn geen systeemsuppleties nodig onder de beoordeelde scenario's omdat ook in het extreme scenario het volume gesuppleerd kan worden met de verlengende maatregelen van strategie 1. Voor de Deltakust is dit wel nodig in het hoog/extreme scenario en in sterkere mate in het extreme scenario. Dit betekent dus dat bij deze scenario's aan de Deltakust impact kan ontstaan op veilig strandtoerisme bij een versneld stijgende zeespiegel.

De combinatie van de verschillende aspecten waar de varianten invloed hebben op de recreatie betekent dat in essentie de gevolgen zullen toenemen bij de grotere suppletievolumes. Daarbij geldt dat de gevolgen voor de Delta kust bij de scenario's hoog en hoog/extreem relatief groter zullen zijn, vanwege de mogelijke impact op de zwemveiligheid. Bij de Waddenkust is bij de impact bij de grootste volumes beperkt, doordat de invloed van buitendeltasuppleties op de recreatie beperkt is. De kwalitatieve beoordeling is opgenomen in *Tabel 4-6*.

Tabel 4-6 Kwalitatieve beoordeling van de gevolgen voor de recreatie per scenario voor de drie deelgebieden.

Scenario	Waddenkust (Mm ³ /yr)	Hollandse kust (Mm ³ /yr)	Deltakust (Mm ³ /yr)
Huidig	0	0	0
Laag	-	0	0
Hoog	--	-	-
Hoog/extreem	--	-	--
Extreem	--	-	--

4.4 Overzicht van de effecten op de indicatoren

Het overzicht van de effecten op de indicatoren, zoals die in de voorgaande paragrafen zijn beschreven, is opgenomen in Tabel 4-7. Logischerwijs nemen de effecten voor alle indicatoren toe, bij het toenemen van de suppletievolumes. Omdat sommige effecten in meerdere mate gekoppeld zijn aan het type suppletie dat wordt uitgevoerd, nemen de effecten niet per se evenredig toe met de volumes.

Tabel 4-7 Overzicht van de effecten op de indicatoren.

Scenario		Waddenkust	Hollandse kust	Deltakust
Huidig	CO ₂ (Mton/jaar):	0,018	0,011	0,010
	Beïnvloed kustoppervlak (km ²)	16	34	17
	Terugkeerfrequentie	-	0	0
	Bodemdieren:	-	0	0
	Vogels	0	0	0
	Habitats	-	0	0
	Biodiversiteit & Connectiviteit	0	0	0
	Strandtoerisme	0	0	0
	Laag	CO ₂	0,036	0,011
Beïnvloed kustoppervlak (km ²)		26	34	17
Terugkeerfrequentie		-	0	0
Bodemdieren:		-	0	0
Vogels		-	0	0
Habitats		-	0	0
Biodiversiteit & Connectiviteit		-	0	0
Strandtoerisme		-	0	0
Hoog		CO ₂	0,056	0,016
	Beïnvloed kustoppervlak (km ²)	52	34	17
	Terugkeerfrequentie	-	0	0
	Bodemdieren:	--	0	0
	Vogels	--	0	-
	Habitats	--	0	0
	Biodiversiteit & Connectiviteit	--	-	0
	Strandtoerisme	--	-	-
	Hoog/Extreem	CO ₂	0,063	0,021
Beïnvloed kustoppervlak (km ²)		52	34	77
Terugkeerfrequentie		-	0	0
Bodemdieren:		--	0	-
Vogels		--	0	-
Habitats		---	-	-
Biodiversiteit & Connectiviteit		---	-	-
Strandtoerisme		--	-	--
Extreem		CO ₂	0,063	0,027
	Beïnvloed kustoppervlak (km ²)	52	41	84
	Terugkeerfrequentie	-	-	0
	Bodemdieren:	--	0	-
	Vogels	--	-	-
	Habitats	---	--	-
	Biodiversiteit & Connectiviteit	---	-	-
	Strandtoerisme	--	-	--

4.5 Discussie indicatoren

De verschillende indicatoren maken gebruik van vrij eenvoudige aannames. Hieronder worden deze aannames kritisch bekeken.

Het is waarschijnlijk dat toekomstige suppleties onder de zeespiegelstijging scenario's onder veranderde omstandigheden zullen plaatsvinden. De doorgaande ontwikkeling van duurzamer materiaal in de baggersector zal bijvoorbeeld leiden tot een lagere uitstoot CO₂ per m³ dan hier in de CO₂ indicator wordt aangenomen. Deze ontwikkeling zal echter waarschijnlijk voor alle suppleties vergelijkbaar zijn en dus zal de onderlinge vergelijking tussen deelgebieden toepasbaar blijven.

De bodemdieren indicator maakt gebruik van gemiddelde aantallen per m² voor de verschillende deelgebieden en kustzones, maar bij de habitat indicator wordt beschreven dat de gemeenschap in het H1110 habitat dynamisch is en tussen locaties en over de tijd sterk kan verschillen. Daarbij is het opvallend dat de gemiddelde strand dichtheid voor de Waddenkust (1941 individuen/m²) substantieel hoger is dan die voor de andere deelgebieden (222-600 individuen/m²). Dit wordt in grote mate veroorzaakt door een meting aan de westkant van Schiermonnikoog met een dichtheid van 4166 individuen/m². In de oorspronkelijke publicatie van deze gegevens wordt beschreven dat deze meting grote aantallen van de borstelworm *Pygospio elegans* bevatte. Een soort die niet verwacht werd in de strandzone waar de metingen uitgevoerd moesten worden (Janssen & Mulder, 2004). Dit wijst erop dat deze meting waarschijnlijk op de verkeerde locatie is uitgevoerd en geeft ook de sterk dynamische natuur van deze habitats weer aangezien deze meting substantieel hoger is dan alle andere bodemdiermetingen die voor de indicator zijn gebruikt ongeacht in welke kustzone ze zijn genomen.

De beschrijving van de verschillende systeemindicatoren geeft aan dat effecten van toekomstige suppleties op verschillende onderdelen van het kuststelsel plaats zullen vinden te midden van natuurlijke dynamiek in stroming, sediment/zand transport en ecologie. Een lange termijn studie van herstel van de strandhabitat gaf zelfs aan dat het effect en herstel van een strandsuppletie beiden niet significant waren ten opzichte van de natuurlijke dynamiek rond de suppletie. Concrete inschattingen van effecten van suppleties op onderdelen van het kuststelsel zullen daarom ook zeer moeilijk zijn. Dat gezegd hebbende zijn er wel de logische uitkomsten dat toenames in oppervlakte en frequentie van suppleties een navenant groter effect zullen hebben op de lokale ecologie, met name als soorten zoals broedvogels voor een periode locatie gebonden zijn waardoor verstoring en aantasting van voedselbronnen effect kunnen hebben op instandhouding van deze populaties.

5 Conclusies

In het voorliggende rapport zijn de effecten in beeld gebracht van het vergroten van de suppletievolumes voor de drie deelgebieden Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust van de Nederlandse kust op de diverse functies van de kust. De grotere suppletievolumes zijn gekoppeld verschillende scenario's van zeespiegelstijging.

Voor de drie deelgebieden is gewerkt met geschematiseerde kustgebieden, waarvan de kenmerken, zoals de lengte en het huidige suppletievolume, zijn ontleend aan bestaande kustvakken. Het bepalen van de effecten is stapsgewijs opgebouwd, waarbij in eerste instantie is gekeken naar de mogelijkheden om de suppletievolumes te vergroten door het verlengende maatregelen in te zetten voor de bestaande strategie (1) van het uitvoeren van onderwatersuppleties, strandsuppleties en geulwandsuppleties. De verlengende maatregelen, die onderdeel zijn van strategie 1 bestaan uit het vergroten van het suppletievolume ter plaatse van de locaties waar al wordt gesuppleerd, het verhogen suppletiefrequentie en het uitbreiden van aantal suppletielocaties langs de kustlijn. In tweede instantie is gekeken naar de vergroten van het suppletievolume door ook zandmotoren en buitendeltasuppleties in te zetten, als aanvullende strategie (2). De suppletievolumes die mogelijk zijn door het inzetten van verlengende maatregelen en de stap naar een andere strategie voor de Waddenkust, Hollandse kust en Deltakust zijn vergeleken met benodigde zandvolume voor de scenario's van zeespiegelstijging.

Deze vergelijking levert het antwoord op de deelvraag over het optreden van 'tipping points' in het beheer van de kust bij versneld stijgende zeespiegelstijging: *Zijn er bij het toenemen van de suppletievolumes situaties aan te geven waarbij de bestaande strategie (de huidige wijze van suppleren) niet meer volstaat en een overgang naar verlengende maatregelen nodig is?*

Het antwoord op deze vraag staat in Tabel 5-1. De tabel laat in één oogopslag zien dat het voor de drie deelgebieden duidelijk verschilt bij welk scenario een stap moet worden gezet naar verlengende maatregelen en naar strategie 2. Bij de Hollandse kust hoeft geen stap te worden gezet naar strategie 2, terwijl voor de Waddenkust deze stap al nodig wordt bij het scenario hoog. De Deltakust zit hier tussenin. En bij de Waddenkust is met de gehanteerde aannames de overstap naar strategie 2 nog niet voldoende om de zandvolume te suppleren die daar nodig zijn.

Tabel 5-1 Overzicht van de verschillende verlengende maatregelen en strategieën voor de drie deelgebieden van de kust voor de scenario's. Hoe donkerder de kleur, hoe groter het effect.

Scenario	Waddenkust	Deltakust	Hollandse kust
Huidig	Strategie 1 (huidig) + uitbreiding volume + verhogen suppletiefrequentie	Strategie 1 (huidig)	Strategie 1 (huidig)
Laag	+ Uitbreiden suppletielocaties	Strategie 1 (huidig)	Strategie 1 (huidig)
Hoog	+ Strategie 2	Strategie 1 (huidig) + uitbreiding volume + verhogen suppletiefrequentie	+ uitbreiding volume
Hoog/Extreem	+ Strategie 2 (tekort)	+ Uitbreiden suppletielocaties + Strategie 2	+ verhogen suppletiefrequentie
Extreem	+ Strategie 2 (tekort)	+ Uitbreiden suppletielocaties + Strategie 2	+ Uitbreiden suppletielocaties

De uitgevoerde berekeningen leveren de input voor het berekenen van de effecten op de uitstoot, het beïnvloede oppervlakte van de kust, en beredeneren van de effecten op vogels, habitats, biodiversiteit, connectiviteit en strandtoerisme. De effecten zijn op hoofdlijnen overgenomen in Tabel 5-2, waarbij de ecologische effecten zijn samengevat (anders zou dit te omvangrijk worden), waarmee antwoord is gegeven op de hoofdonderzoeksvraag: *Wat zijn de effecten op de diverse functies van de kust bij de specifieke suppletie strategieën?* Ook de deelvraag *Zijn er bij het toenemen van de suppletievolumes gevolgen aan te geven die sterk afwijken van de huidige situatie* is beantwoord in deze tabel.

De essentie van de effecten, zoals opgenomen in Tabel 5-2 is logischerwijs dat sprake is van steeds grotere effecten bij het toenemen van het gesuppleerde zandvolume. Omdat de benodigde zandvolumes het grootst zijn voor de Waddenkust, zijn de effecten daar ook het grootst. Voor de Hollandse kust zijn de effecten het beperktst. Voor de ecologische effecten geldt dat de toename in de beïnvloede oppervlakte en de verhoogde suppletiefrequentie leidt tot meer bedekt oppervlak en een toename van de frequentie van de bedekking en de verstoring. De leefwijze van individuele soorten bepaalt hun weerbaarheid tegen deze bedekking en verstoring. Locatie gebonden soorten zoals broedvogels van het strand en trager groeiende schelpdieren zullen een groter effect ervaren dan soorten die kunnen uitwijken of een sterk koloniserend vermogen hebben van verstoord habitat, zoals sommige wormen en schaaldieren.

In de huidige praktijk van kustsuppleties wordt rekening gehouden met beschermde natuurwaarden. Door onder andere effectenanalyses, vergunningsaanvragen, zandkorrelanalyses, borgingsdocumenten en ecologische werkprotocollen worden mogelijke effecten op natuur in kaart gebracht en vertaald naar uitvoeringsvoorwaarden voor aannemers. Daarbij worden ook de relevante Natura 2000-beheerplannen meegenomen. Onderdelen hiervan zijn: waar mogelijk suppleren met vergelijkbaar zand, zodat abiotische omstandigheden gelijk blijven voor lokale biota en het vermijden van locaties en perioden van het jaar waar beschermde soorten verstoringsgevoeliger zijn zoals zeehondenligplaatsen tijdens zoogperiodes en delen van stranden tijdens vogelbroedperiodes. Deze praktische invulling van de bescherming van natuurwaarden in de ruimte en tijd zal steeds complexer worden bij een toenemende oppervlakte en frequentie voor suppleties om de kustlijn in stand te houden. De gevoelige perioden verschillen bijvoorbeeld voor diersoorten, zodat de werkbare periode gedurende het jaar wordt beperkt. Bij het vergroten van het suppletievolume vanwege versnelde zeespiegelstijging, dient dan of binnen dezelfde beperkte periode plaats te vinden, of er wordt toch in periode gewerkt waarin mogelijke gevolgen optreden voor soorten. Hierbij past de opmerking dat dit per suppletielocatie anders kan zijn, omdat de aanwezigheid van diersoorten verschilt.

Verdere complexiteit treedt op en neemt mogelijk toe daar waar recreatie ook restricties opleveren aan de uitvoering van de supplementies. Mogelijk wordt dit versterkt wanneer de groeiende bevolking vraagt om meer ruimte aan de kust voor recreatie. Ook hier zal dan spanning ontstaan tussen de noodzaak om vaker te suppleren en grotere supplementies uit te voeren waarbij het niet meer mogelijk is om tegemoet te komen aan de wensen ten aanzien van recreatie.

Tabel 5-2 Overzicht van de effecten op de indicatoren op hoofdlijnen voor de drie deelgebieden van de kust voor de scenario's. Hoe donkerder de kleur, hoe groter het effect.

Scenario	Waddenkust	Deltakust	Hollandse kust
Huidig	CO ₂ : 0,018 Ecologie: -- Toerisme: 0	CO ₂ : 0,010 Ecologie: - Toerisme: 0	CO ₂ : 0,011 Ecologie: - Toerisme: 0
Laag	CO ₂ : 0,036 Ecologie: --- Toerisme: -	CO ₂ : 0,010 Ecologie: - Toerisme: 0	CO ₂ : 0,011 Ecologie: - Toerisme: 0
Hoog	CO ₂ : 0,056 Ecologie: --- Toerisme: -	CO ₂ : 0,015 Ecologie: -- Toerisme: -	CO ₂ : 0,016 Ecologie: -- Toerisme: 0
Hoog/Extreem	CO ₂ : 0,063 Ecologie: ----- Toerisme: -	CO ₂ : 0,022 Ecologie: -- Toerisme: --	CO ₂ : 0,021 Ecologie: -- Toerisme: 0
Extreem	CO ₂ : 0,063 Ecologie: ----- Toerisme: -	CO ₂ : 0,026 Ecologie: -- Toerisme: ---	CO ₂ : 0,027 Ecologie: -- Toerisme: -

In de voorliggende studie is gewerkt op basis van een eenvoudige schematisatie van de kust, om zo een eerste inzicht te geven van het optreden van tipping points in de supplementiestrategieën voor de drie deelgebieden van de kust. De praktische uitvoerbaarheid, binnen en buiten de kaders die worden geboden door ecologie, recreatie, de omvang en beschikbaarheid van de baggervloot en de meteorologische condities zijn hierbij niet beschouwd. Deze eerste benadering laat al zien dat tipping points inderdaad optreden, bij verschillende scenario's voor de drie deelgebieden. Meer gedetailleerde uitwerkingen in de toekomst zullen duidelijkheid kunnen geven over de locatiespecifieke effecten langs de Nederlandse kust.

6 Referenties

- Arcadis. (2020). *Beoordelingsmatrix suppletiestrategieën Kustgenese 2.0*.
- Bolech, M., & Kootstra, L. (2019). *Ikz Kustsuppletie*. TNO Rapport.
- Deltares. (2016a). *Vogels, onderdeel van het project Ecologisch gericht suppleren*.
- Deltares. (2016b). *Strand, onderdeel van het project Ecologisch gericht suppleren*.
- Deltares. (2018). Beheerbibliotheek Walcheren en Noord-Beveland/Veerse Dam.
- Deltares. (2019). Beheerbibliotheek Rijnland.
- Deltares. (2022). Beheerbibliotheek Kust Schouwen.
- Deltares. (2023). Beheerbibliotheek Kust Ameland.
- Deltares. (2023). *Sedimentbehoefte Nederlands kuststelsel bij toegenomen zeespiegelstijging*.
- Deltares. (2024). Beheerbibliotheek Kust Noord-Holland.
- Herman, P., Meijer - Holzhauer, H., Vergouwen, S., Wijsman, J., & Baptist, M. (2016). *Ecologische effecten van kustsuppleties*.
- Herman, P., Moons, J., Wijsman, J., Lujendijk, A., & Ysebaert, T. (2021). A mega-nourishment (sand motor) affects landscape diversity of subtidal benthic fauna. *Frontiers in Marine Science*, 8, 643674.
- Janssen, G., & Mulder, S. (2004). *De ecologie van de zandige kust van Nederland*. Rijkswaterstaat.
- Ministerie van LNV. (2008). *Profieldocument A017 Aalscholver*.
- Ministerie van LNV. (2014). *Profieldocument Permanent overstroomde zandbanken H1110*.
- Paris, P., Leach, A., & Corbett, D. (2023). Potential long-term disturbance associated with beach nourishment-insights and observations from Pea Island National Wildlife Refuge, Outer Banks, North Carolina. *Heliyon*, 9(1).
- Rozemeijer, M. (2009). *Rekolonisatie van de zeebodem na zandwinning en suppletie: een review*. Rijkswaterstaat.
- Stive, M. J. (2013). A new alternative to saving our beaches from sea-level rise: The sand engine. *Journal of Coastal Research*, pp. 1001-1008.
- Stronkhorst, J., & van Buren, R. (2012). *Ruimtelijke verdeling van functies langs de Nederlandse kust in relatie tot het dynamisch handhaven van de kust*. Deltares.
- Stuart G. Pearson, E. P. (2022, 405). A novel approach to mapping ebb-tidal delta morphodynamics and stratigraphy. *Geomorphology*.
- van Egmond, E., van Bodegom, P., Berg, M. W., Janssen, G., & Aerts, R. (2018). A mega-nourishment creates novel habitat for intertidal macroinvertebrates by enhancing habitat relief of the sandy beach. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 207, 232-241.
- van Hal, R., Volwater, J., Aarts, G., Brasseur, S., & Glorius, S. (2021). *Ecologische effecten van een pilotsuppletie in het Amelandse Zeegat*. Wageningen Marine Research.
- WUR. (2024). *De grijze zeehond*. Opgeroepen op 10 10, 2024, van <https://www.wur.nl/nl/show/de-grijze-zeehond.htm>

Bijlage A Methode: Schematiseren (stap 1)

Schematiseren

Zoals in het vorige hoofdstuk is beschreven worden de drie kustgebieden afzonderlijk beschouwd vanuit een schematische situatie. Deze versimpelde aanpak zorgt ervoor dat een complex systeem eenvoudig en inzichtelijk kan worden geanalyseerd. Een belangrijke kanttekening is dat een schematische weergave per definitie een vereenvoudiging van de werkelijkheid en dat de resultaten met zorg moeten worden vertaald naar de echte kustsystemen.

De output van de schematisatie is tweevoudig. Het eerste resultaat is een variant per deelgebied en per scenario. Door de varianten (combinaties van strategieën en verlengende maatregelen) te vergelijken volgen direct de tipping points in suppletie strategie, waarmee dat deel van de tweede onderzoeksvraag beantwoord is (hoofdstuk 0). De schematisatie geeft ook het ruimtebeslag en frequentie van elke variant. Hiermee worden de varianten doorvertaald naar de benoemde indicatoren (hoofdstuk 4).

Hoe het schematiseren is uitgevoerd en welke analyse ermee gedaan is, wordt in dit hoofdstuk kort samengevat.

Stappenplan

In het schematiseren zijn de volgende acht stappen gevolgd:

1. Geometrie kust en duinen voor het kustgebied
2. Huidige suppletievolumes onderverdeeld in vormen
3. Maximaliseren verlengende maatregelen
4. Uitbreiden systeemsuppleties
5. Conversie bepalen naar gehele kust
6. Vergelijken met scenario's
7. Uitkomsten interpoleren naar scenario's → varianten
8. Per scenario schematisch oppervlakte + frequentie berekenen

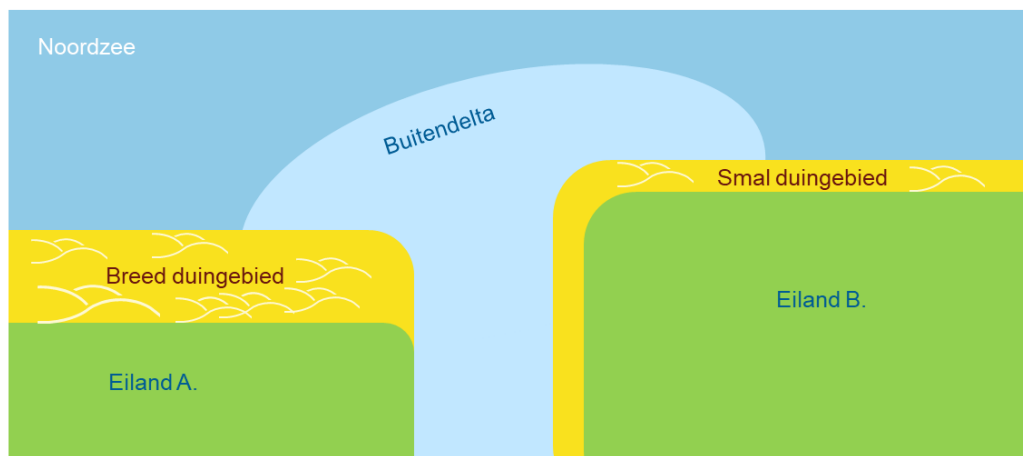
Hieronder worden deze stappen toegelicht.

Stap 1 Geometrie kust en duinen voor het kustgebied

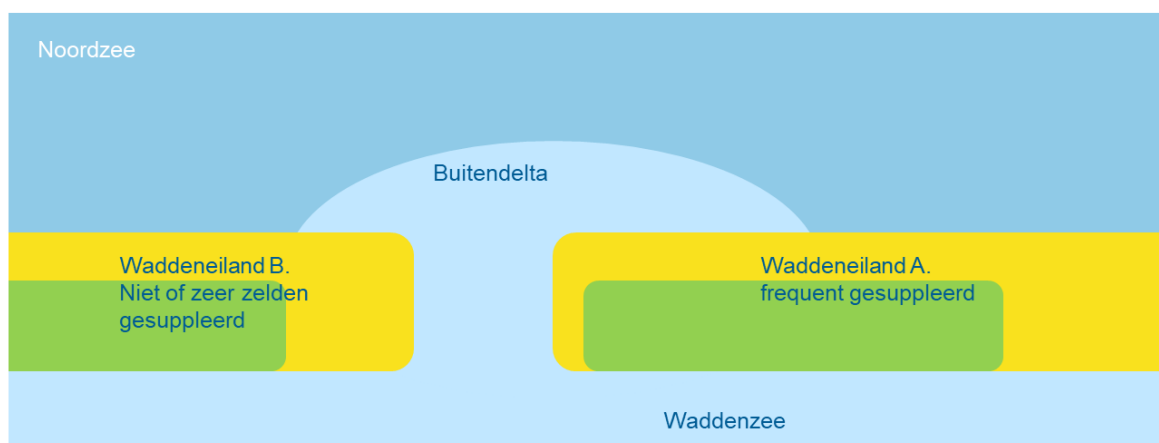
Per deelgebied is de kust teruggebracht tot kenmerkende gebieden. De afmetingen van deze schematische kustgebieden zijn gebaseerd op de gebieden van de Nederlandse kust die gebruikt zijn om het huidige suppletieprogramma te projecteren op de schematische kusten (Stap 2). De precieze geometrie is te vinden in paragraaf 0.



Figuur 6-1 Kaart van de geschematiseerde Hollandse kust.



Figuur 6-2 Kaart van de geschematiseerde Deltakust.



Figuur 6-3 Kaart van de geschematiseerde Waddenkust.

Voor de Hollandse kust, weergegeven in Figuur 6-1, is dit een breed duingebied en een smal duingebied met een kustplaats. De Deltakust is teruggebracht tot twee eilanden (zie Figuur 6-2), waarvan eiland A een breed en eiland B een smal duingebied heeft. Tussen de eilanden ligt een (afgesloten) zeearm met geulen en buitendelta. Ook de Waddenkust (Figuur 6-3) is geschematiseerd aan de hand van twee eilanden met daartussen een geul en buitendelta. Hierin wordt eiland A zeer frequent gesuppleerd en eiland B zelden/nooit.

Stap 2 Huidige suppletievolumes onderverdeeld in vormen

Per deelgebied is het huidige suppletieprogramma geschematiseerd aan de hand van voorbeeldgebieden. Hierbij is voor een bepaalde periode aan de hand van de suppletiedatabase een overzicht gemaakt van strand-, vooroever-, geulwand en systeemsuppleties. De relevante gegevens hierin zijn het jaar en locatie van de uitgevoerde suppletie, het totale suppletievolume en het volume per strekkende meter.

Voor de Hollandse kust is de suppletiehistorie gebruikt van het brede duingebied Meijndel in de periode 1993-2022 (in totaal ongeveer 8 Mm³) en het smalle duingebied Callantsoog-Donkere Duinen in de periode 2003-2022 (>20 Mm³).

Voor de Deltakust zijn de suppleties van Schouwen-Duivenland (2014-2023, <3 Mm³) en Walcheren (2014-2023, >14 Mm³) gebruikt voor respectievelijk het brede duingebied (Eiland A) en het smalle duingebied (Eiland B).

Voor de Wadden is gekeken naar Terschelling en Ameland. Terschelling is nooit gesuppleerd en staat daarmee model voor Waddeneiland B. De suppletiegeschiedenis van Ameland tussen 2003 en 2022 (in totaal ruim 28 Mm³) is gebruikt voor Waddeneiland A. De buitendelta van de schematische Waddenkust is gebaseerd op de buitendelta van het Amelandse Zeegat, maar de uitgevoerde buitendeltasuppletie is niet meegenomen in de huidige suppletievolumes aangezien dit een pilot betrof en geen onderdeel is van strategie 1.

Een overzicht van de huidige suppletievolumes per deelgebied is opgenomen in paragraaf 0.

Stap 3 Maximaliseren verlengende maatregelen

Bij het oprekken van de huidige suppletie strategie zijn de volgende verlengende maatregelen beschouwd:

1. Uitbreiding volume op één locatie
2. Verhogen suppletiefrequentie
3. Uitbreiden van aantal suppletielocaties langs de kustlijn

Hierbij worden de verlengende maatregelen in genoemde volgorde eerst maximaal benut voordat de volgende maatregel gebruikt wordt. In andere woorden: eerst wordt het suppletievolume op één locatie maximaal uitgebreid (maatregel 1) voordat de suppletiefrequentie wordt verhoogd (maatregel 2). En pas als de suppletiefrequentie maximaal is verhoogd worden meer suppletielocaties toegevoegd aan het schematische model (maatregel 3).

In de basis is ervoor gekozen dat elke verlengende maatregel het suppletievolume met maximaal 25% laat toenemen. Voor maatregel 1 betekent dit 25% meer volume op elke suppletielocatie, voor maatregel 2 een 25% hogere suppletiefrequentie, en bij maatregel 3 wordt het aantal locaties met maximaal 25% uitgebreid. De maximale suppletievolumes zijn door de verlengende maatregelen (cumulatief) dus grofweg het dubbele van de huidige suppletievolumes ($1.25 \times 1.25 \times 1.25 = 1.95$). In paragraaf 0 wordt de gevoeligheid van de uitkomsten voor deze 25% beschouwd.

Bij sommige deelgebieden is van deze 25% afgeweken. Een voorbeeld hiervan is Waddeneiland B, waar nu niet gesuppleerd wordt en waar een 25% verhoging dus geen extra volume oplevert. Deze en alle andere uitzonderingen worden in paragraaf 0 toegelicht.

Stap 4 Uitbreiden systeemsuppleties

Na het maximaliseren van alle verlengende maatregelen worden, indien nodig, systeemsuppleties ingepast voor de schematische kustgebieden. Voor de Waddenkust is de enige vorm van systeemsuppletie een buitendeltasuppletie. Hier is voor gekozen omdat voor de Waddenkust een buitendeltasuppletie eerder succesvol is getest en bij Waddenkust (onder andere vanwege de afstand tussen zandwin- en suppletielocatie) waarschijnlijk eenvoudiger uit te voeren is dan een zandmotorconcept. Voor de Deltakust zijn in de uitwerking beide type systeemsuppletie mogelijk, omdat voor dit kustgebied geen ervaring is met systeemsuppleties. Logischerwijs wordt voor de Hollandse kust enkel een zandmotorconcept beschouwd.

Het zandmotorconcept voor de schematische kusten is gebaseerd op de daadwerkelijke uitgevoerde Zandmotor, namelijk met een volume van 20 Mm^3 en een oppervlak van 128 ha (Stive, 2013). De terugkeertijd/frequentie is locatiespecifiek en getoond in paragraaf 0. Voor de buitendeltasuppleties is uitgegaan van 10 Mm^3 met locatiespecifieke oppervlaktes en terugkeertijd (paragraaf 0).

Een belangrijke notitie bij de terugkeertijd van systeemsuppleties is de conversie naar de gehele kust. Bij de volgende stap wordt per eiland of duingebied een conversiefactor bepaald van de schematische kust naar het gehele kustgebied. Als voorbeeld vertegenwoordigt de buitendelta in de schematische Waddenkust 4 buitendelta's van de daadwerkelijke Waddenkust. Hoe tot deze conversiefactor is gekomen wordt bij stap 5 toegelicht. De conversiefactor werkt als volgt door in de terugkeertijd van systeemsuppleties: in het voorbeeld van de buitendelta's van de schematische Waddenkust betekent een terugkeertijd van buitendeltasuppletie van 5 jaar dat voor de gehele Waddenkust elke buitendelta om de 5 jaar gesuppleerd wordt. Dat betekent dat gemiddeld elke 1,25 jaar (5 jaar delen met conversiefactor van 4) een buitendeltasuppletie van 10 Mm^3 bij de Waddenkust plaatsvindt. Kortom: de terugkeertijd geldt voor de schematische kust en niet als gezamenlijk voor de gehele kust. Dit betekent dat een conversiefactor (altijd groter dan 1) de terugkeertijd voor de gehele kust vermindert.

Stap 5 Conversie bepalen naar gehele kust

Zoals benoemd vindt bij deze stap de conversie plaats van de schematische naar de echte kustgebieden. Dit is nodig om bij de volgende stappen de gesuppleerde volumes in de schematische kustgebieden te vergelijken met de scenario's voor de kustgebieden en om tot varianten te komen. De conversie bestaat per kenmerkende gebied in het schematische kustgebied uit een conversiefactor. Een overzicht van de conversiefactoren is opgenomen in paragraaf 0. Hieronder wordt uiteengezet hoe de conversiefactoren zijn bepaald.

Deze conversiefactor is in eerste instantie tot stand gekomen door te kalibreren op 2 parameters, namelijk kustlijn lengte en suppletievolumen. Ten eerste is gepoogd de lengte van de kustlijn (BKL) van het kenmerkende gebied (eiland of duingebied) maal conversiefactor overeen te laten komen met de gezamenlijke lengte van dit onderdeel in het echte kustgebied (alle vergelijkbare eilanden of duingebieden). Ten tweede was het doel om het totale huidige suppletievolumen van kenmerkende gebied (zie stap 2) maal conversiefactor grofweg gelijk te krijgen met het totale cumulatieve suppletievolumen bij de vertegenwoordigde gebieden in het echte kustgebied. Hierin is een vergelijkbare verhouding tussen suppletievormen aangehouden.

Omdat de kenmerkende gebieden in schematische kustgebieden (zie stap 1) nooit perfect gemiddeld zijn voor het type gebied wat ze vertegenwoordigen is het inherent onmogelijk om voor beide parameters perfect te kalibreren. Door middel van trial-and-error is het gelukt om de verschillen zo klein mogelijk te houden en is in ieder geval gezorgd dat de totale kustlengte en het cumulatieve suppletievolumen van het gehele kustgebied hetzelfde is bij het schematische kustgebied (maal conversiefactoren) en het echte kustgebied.

Bovenstaande methode is toegepast op de beide Waddeneilanden, beide eilanden in de Deltakust en beide duingebieden in de Hollandse kust. Voor de conversiefactoren van de buitendelta's in de Waddenkust en Deltakust was een andere aanpak vereist aangezien deze geen kustlijn lengte hebben en er geen historisch suppletievolumen is. Daarom is de conversiefactor bepaald aan de hand van de buitendelta-volumes en -oppervlaktes.

Stap 6 Vergelijken met scenario's

De scenario's zijn suppletievolumes per gebied voor verschillende niveaus van zeespiegelstijging (zie paragraaf 2.2.1). Aan de hand van de conversiefactoren wordt ten eerste het huidige suppletieprogramma van de schematische kusten vertaald naar de kustgebieden. Vervolgens wordt hetzelfde gedaan voor het suppletievolumen met de verlengende maatregelen binnen strategie 1 en tot slot worden de systeemsuppleties geconverteerd naar het kustgebied.

Zoals bij stap 3 benoemd wordt eerst verlengende maatregel 1 gemaximaliseerd, daarna verlengende maatregel 2 en tot slot maatregel 3. Dit geeft dus stapsgewijs weer welk (cumulatief) effect welke maatregel op de suppletievolumes per kustgebied heeft en hoe dat zich verhoudt tot de scenario's. In werkelijkheid kan en zal een combinatie van de drie verlengende maatregelen waarschijnlijker zijn voordat één van de maatregelen maximaal wordt benut. Deze "uitwisselbaarheid" van de maatregelen is verder in dit project niet beschouwd, maar doordat de resultaten een indicatie geven van de effecten van elke maatregel kunnen de resultaten wel gebruikt worden om de gewenste combinatie van maatregelen te bepalen. Deze kanttekening geldt ook voor de systeemsuppleties, welke in werkelijkheid natuurlijk ook plaats kunnen vinden voordat alle verlengende maatregelen maximaal zijn opgerekt.

Stap 7 Uitkomsten interpoleren naar scenario's → varianten

De vergelijking uit de vorige stap geeft per kustgebied en per scenario weer hoe het benodigde volume gesuppleerd kan worden. Dit resulteert in de varianten, waarbij duidelijk wordt of het suppletievolumen binnen strategie 1 past of dat moet worden overgeschakeld naar strategie 2.

Als de verlengende maatregelen cumulatief niet voldoende volume opleveren komen we uit bij strategie 2. In dat geval worden alle verlengende maatregelen op 100% gezet en bepaald in hoeverre de systeemsuppleties nodig zijn. Dit resulteert in een variant met strategie 2 en een percentage voor de systeemsuppleties.

Als systeemsuppleties niet nodig zijn omdat de verlengende maatregelen afdoende zijn, dan staan de systeemsuppleties op 0%. Zoals eerder benoemd worden de maatregelen stapsgewijs toegepast.

In sommige gevallen zijn er geen verlengende maatregelen nodig en is het huidige suppletievolumen hoger dan het volume van het beschouwde scenario. In dat geval staan alle verlengende maatregelen op 0% en wordt in de variant een percentage van het huidige suppletievolumen weergegeven.

De varianten die resulteren uit de eerste 7 stappen worden getoond in hoofdstuk 0.

Stap 8 Per scenario schematisch oppervlakte + frequentie berekenen

Per scenario is aan de hand van de bijbehorende variant en de geometrie (stap 1) de impact op het strand, de vooroever, de geulwand en de buitendelta bepaald. Deze impact bestaat bij deze stap uit het totale oppervlakte en frequentie van een verstoring. Hierin werkt een strandsuppletie alleen door het verstoorte strandoppervlakte en de daarbij horende frequentie, en hetzelfde geldt voor vooroever-, geulwand en buitendeltasuppleties. Een

zandmotorconcept heeft daarentegen impact op zowel strand (extra oppervlakte) als op de vooroever (oppervlakteverlies).

Input voor de schematisatie

De volgende input is gelijk voor de drie kustgebieden. Gedeeltelijk zijn deze in de vorige paragraaf al behandeld:

- Het gedeelte van het strand waar gesuppleerd wordt is 0.25 km breed (kustdwars). Voor de vooroever is dit 0.50 km en voor de geulwand 0.20 km;
- Elke verlengende maatregel verhoogt in principe het suppletievolume met maximaal 25%. In de volgende paragrafen worden de uitzonderingen gegeven;
- Een zandmotorconcept heeft een suppletievolume van 20 Mm³ en een oppervlak van 128 ha. Het volume van een buitendeltasuppletie is 10 Mm³.

In de volgende paragrafen wordt de input die specifiek is per kustgebied weergegeven.

Waddenkust

Stap 1 Geometrie duingebieden

De volgende input is gebaseerd op de lengte van de BKL (kustlijn) van Ameland (Waddeneiland A) en Terschelling (Waddeneiland B). De geometrie van de buitendelta is gebaseerd op de buitendelta van het Amelandse Zeegat (Stuart G. Pearson, 2022) en wordt enkel gebruikt voor het bepalen van de conversiefactor in stap 5.

Buitendelta	Volume buitendelta [Mm ³]	440
Waddeneiland A	Lengte inletgeul [km]	4
	Lengte BKL [km]	25
Waddeneiland B	Lengte inletgeul [km]	4
	Lengte BKL [km]	25

Stap 2 Huidige suppletievolumes onderverdeeld in vormen

Waddeneiland A	Strand [Mm ³ /yr]	0,51
	Geulwand [Mm ³ /yr]	0,13
	Vooroever [Mm ³ /yr]	0,76

Waddeneiland B en de buitendelta zijn niet gesuppleerd. Bovenstaande totalen zijn gebaseerd op het huidige suppletieprogramma van Ameland (2003-2022, Bijlage C).

Stap 3 Maximaliseren verlengende maatregelen

Bij deze stap is voor de Waddenkust op enkele punten afgeweken van de 25% die als basis wordt aangehouden:

- De frequentie van een geulwandsuppletie is in het huidige programma 1/20 jaar. Dit is relatief laag. Bij de tweede verlengende maatregel (verhogen suppletiefrequentie) is daarom voor dit type suppletie aangehouden dat dit een factor 2 (100%) hoger kan, waarmee de maximale frequentie 1/10 jaar is.
- Ondanks dat het totale suppletievolume van Waddeneiland A (Ameland) relatief hoog is, vinden deze suppleties in een relatief klein stuk van de kust plaats. Er is voldoende ruimte om dit met meer dan 25% te verhogen omdat er ook gedeeltes van de Amelandse duinwaterkering zijn waar nu niet gesuppleerd is of waar alleen strand of vooroeversuppleties plaats hebben gevonden (maar niet beide). Dit is ook bij delen die bij stijgende zeespiegel relatief zwak zijn. Deze duinwaterkeringen hebben een waterkerende functie langs een groot deel van het eiland. Daarom is voor de derde verlengende maatregel (uitbreiden van aantal suppletielocaties) specifiek naar Ameland gekeken welk gedeelte van de kust suppleties doelmatig kunnen zijn bij zeespiegelstijging. Hier komt uit dat 30% van de kust in potentie baat heeft bij strandsuppleties (is nu 17%). Voor vooroeversuppleties is dat 45% (nu 30%). Nu wordt 50% van de geulwand gesuppleerd en dit is maximaal 75%.

- Waddeneiland B (Terschelling) wordt nu niet gesuppleerd waardoor de verlengende maatregelen geen extra volume opleveren. Ook hier hebben de duinwaterkeringen een waterkerende functie langs een groot deel van het eiland. Daarom is, vergelijkbaar met Ameland, indicatief beschouwd welk gedeelte van de kust welke suppletievorm doelmatig is. Dit betekent dat dit Waddeneiland niet gesuppleerd wordt na de eerste en tweede verlengende maatregelen, maar wel bij de derde (uitbreiden van aantal suppletielocaties). Hierbij wordt bij maximaal 22% en 30% van de kust respectievelijk strandsuppleties en vooroeversuppleties uitgevoerd en 29% van de geulwand gesuppleerd.

Stap 4 Uitbreiden systeemsuppleties

De buitendeltasuppletie van 10 Mm³ heeft een maximale terugkeertijd van 5 jaar en een oppervlakte van 5 km². Hiermee bedekt de suppletie grofweg 10% van de buitendelta met een zanddikte van 2 m.

Stap 5 Conversie bepalen naar gehele Waddenkust

Conversiefactor	Buitendelta	4
	Waddeneiland A	3
	Waddeneiland B	1,5

Hollandse kust

Stap 1 Geometrie duingebieden

De volgende input is gebaseerd op de lengte van de BKL (kustlijn) van het brede duingebied Meijendel en het smalle duingebied Callantsoog-Donkere Duinen.

Breed duingebied	Lengte BKL [km]	10
Smal duingebied	Lengte BKL [km]	20

Stap 2 Huidige suppletievolumes onderverdeeld in vormen

Breed duingebied	Strand [Mm ³ /yr]	0,06
	Vooroever [Mm ³ /yr]	0,21
Smal duingebied	Strand [Mm ³ /yr]	0,35
	Vooroever [Mm ³ /yr]	0,67

Deze totalen zijn gebaseerd op het huidige suppletieprogramma van de hierboven genoemde duingebieden (Bijlage A).

Stap 3 Maximaliseren verlengende maatregelen

Bij deze stap is voor de Hollandse kust niet uitgeweken van de 25% die als basis wordt aangehouden.

Stap 4 Uitbreiden systeemsuppleties

De zandmotorconcepten (suppletievolume van 20 Mm³ en oppervlak van 128 ha) hebben een terugkeertijd van 20 jaar voor zowel het brede als het smalle duingebied. Deze frequentie is gebaseerd op de oorspronkelijke verwachte levensduur van de zandmotor.

Stap 5 Conversie bepalen naar gehele Hollandse kust

Conversiefactor	Breed duingebied	7,7
	Smal duingebied	2

Op het eerste oog lijkt de conversiefactor van het smalle duingebied relatief laag, maar deze lage factor komt doordat het schematische smalle duingebied met 20 km relatief lang is.

Deltakust

Stap 1 Geometrie duingebieden

De volgende input is gebaseerd op de lengte van de BKL (kustlijn) van Schouwen-Duivenland (Breed duingebied (Eiland A)) en Walcheren (Smal duingebied (Eiland B)).

Breed duingebied (Eiland A)	Lengte BKL [km]	17
	Lengte Geul [km]	8
Smal duingebied (Eiland B)	Lengte BKL [km]	30
	Lengte Geul [km]	15

Stap 2 Huidige suppletievolumes onderverdeeld in vormen

Breed duingebied (Eiland A)	Strand [Mm ³ /yr]	0,27
	Vooroever [Mm ³ /yr]	0,00
	Geulwand [Mm ³ /yr]	0,00
Smal duingebied (Eiland B)	Strand [Mm ³ /yr]	0,67
	Vooroever [Mm ³ /yr]	0,47
	Geulwand [Mm ³ /yr]	0,29

Deze totalen zijn gebaseerd op het huidige suppletieprogramma van de hierboven genoemde eilanden (Bijlage A).

Stap 3 Maximaliseren verlengende maatregelen

Bij deze stap is voor de Deltakust slechts op één punt afgeweken van de 25% die als basis wordt aangehouden:

- Bij het Eiland A (Breed duingebied) worden nu geen vooroever en geulwandsuppleties uitgevoerd, waardoor de verlengende maatregelen alleen via strandsuppleties extra volume opleveren. Op basis van expert judgement is ingeschat dat 10% van de kust en geulwand in potentie doelmatig gesuppleerd kan worden door middel van een vooroeversuppletie respectievelijk geulwandsuppletie. Dit komt dus terug in de derde verlengende maatregel (uitbreiden van aantal suppletielocaties)

Stap 4 Uitbreiden systeemsuppleties

De terugkeertijd van zandmotorconcepten (suppletievolume van 20 Mm³ en oppervlak van 128 ha) is voor beide eilanden op 40 jaar gezet. Dit is een factor 2 lager dan bij het smalle duingebied van de Hollandse kust omdat de eilanden van de Deltakust ook gevoed wordt door buitendeltasuppleties, wat de levensduur vergroot. Buitendeltasuppleties van 10 Mm³ vinden elke 30 jaar plaats en hebben een oppervlakte van 15 km². Dit is groter dan bij de Waddenkust omdat deze buitendelta's ook een aanzienlijk groter oppervlakte hebben.

Stap 5 Conversie bepalen naar gehele Deltakust

Breed duingebied (Eiland A)	2
Smal duingebied (Eiland B)	1,2
Buitendelta	3,5

Bijlage B Methode: Gevoeligheidsanalyse (stap 2)

Gevoeligheidsanalyse

De resultaten van de schematische kustgebieden worden primair bepaald door de invoer, welke in Bijlage A is besproken. Deze afhankelijkheid geldt zowel voor de varianten als de verstoringsparameters. Hier wordt uiteengezet hoe gevoelig deze resultaten zijn voor de invoer. Hiervoor wordt de gevoeligheid besproken voor de invoerparameters aan de hand van de eerste vijf uitgevoerde stappen in Bijlage A. De laatste 3 stappen omvatten het genereren van de resultaten en bevatten geen nieuwe invoerparameters.

Stap 1 Geometrie kust en duinen voor het kustgebied

In deze stap worden o.a. de breedtes van het strand, de vooroever en de geulwand bepaald. Deze parameters werken enkel door op het verstoorde oppervlak en niet op de suppletievolumes, varianten of op de verstoringsfrequentie. Binnen strategie 1 is het oppervlak lineair afhankelijk van de breedtes, wat bijvoorbeeld betekent dat een verdubbeling van de breedte van het strand een verdubbeling van het verstoorde strandoppervlak tot gevolg heeft. Hierbij is de aanname dat de volledige breedte gesuppleerd wordt. Voor de varianten met strategie 2 bepalen de systeemsuppleties ook deels het verstoorde oppervlak, waardoor de afhankelijk voor het strand en de vooroever in dit geval niet geheel lineair is.

De uitvoer is relatief ongevoelig voor de (BKL)lengte van de diverse kustonderdelen. Dat komt omdat elke verandering direct ook een tegengestelde verandering tot gevolg heeft in de conversiefactor (zie stap 5).

Het gekozen volume van de buitendelta's werkt niet door in de resultaten en is daarmee slechts een hulpmiddel geweest voor het bepalen van het volume en oppervlak van een buitendeltasuppletie (stap 4).

Stap 2 Huidige suppletievolumes onderverdeeld in vormen

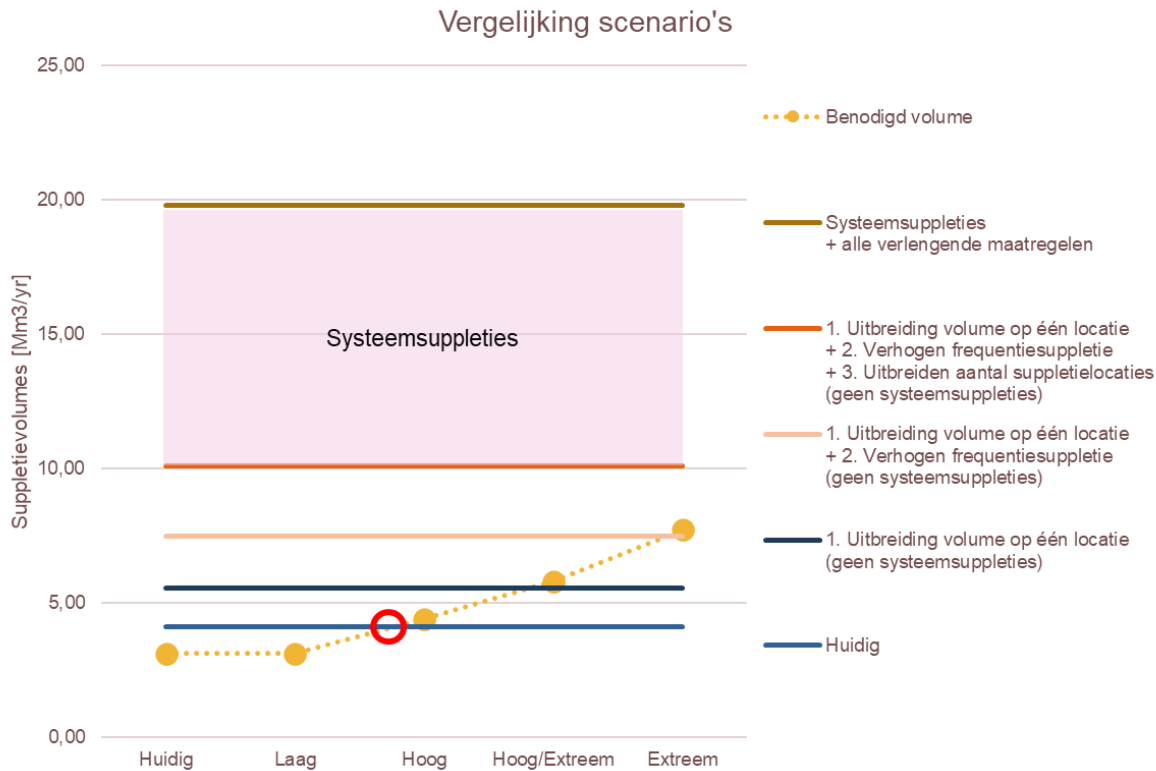
De impact van de wijzigingen in de invoer bij stap 2 op de resultaten zijn niet eenvoudig te duiden aangezien deze direct doorwerken op de conversie bij stap 5. Een gevoeligheidsanalyse waarbij een ander representatief kustgebied was gekozen voor de schematische kust is buiten de scope van dit project. Bovendien is dit niet eenduidig te bepalen omdat bij stap 5 het huidige suppletieprogramma na conversie vergeleken wordt met de daadwerkelijke kustgebieden.

Wel is duidelijk dat de huidige suppletiestrategie impact heeft op de resultaten, vooral de suppletievolumes per strekkende meter. Deze suppletievolumes per strekkende meter zijn gebaseerd op de gekozen gebieden en zijn dus per kustgebied verschillend. Zo zijn volumes per strekkende meter van de strand- en vooroeversuppleties bij de Waddenkust hoger dan bij de Hollandse kust. Op basis van expert judgement is bepaald dat deze verschillen logisch en verklaarbaar zijn. Een wijziging in volumes per strekkende meter zorgt ook voor een verandering in de extra volumes die de derde verlengende maatregel oplevert, wat doorwerkt in de varianten en dus ook in de oppervlaktes. Bovendien verandert in alle gevallen het verstoorde oppervlak direct. Daarentegen is deze gevoeligheid relatief klein ten opzichte van veel andere invoerparameters.

Stap 3 Maximaliseren verlengende maatregelen

Deze invoerparameters hebben het meeste impact op de resultaten. In de basis was er in het vorige hoofdstuk voor gekozen dat elke verlengende maatregel het suppletievolume met maximaal 25% laat toenemen. Een hoger (lager) percentage zou bij de eerste verlengende maatregel wel meer (minder) suppletievolume opleveren, maar geen impact hebben op de verstoorde oppervlaktes en frequenties. Bij verlengende maatregel 2 is deze impact op de verstoringsfrequentie er wel en bij maatregel 3 geldt dit voor het verstoringsoppervlak.

Een voorbeeld van hoe de resultaten er bij 35% i.p.v. 25% uitzien voor de Hollandse kust is te zien in Figuur 6-4, Tabel 6-1 Tabel 6-2. Vergelijking met Figuur 3-2, Tabel 3-4 en Tabel 3-3 laat zien dat de varianten inderdaad opschuiven, waarbij logischerwijs de verlengende maatregelen minder volledig nodig zijn. In dit geval is verlengende maatregel 3 amper nodig is (en alleen bij scenario *extreem*), waardoor het verstoorde oppervlak afneemt. Maar omdat de verlengende maatregel 2 wel volledig benut is bij dit scenario en omdat deze meer impact heeft, neemt de verstoringsterkteertijd af.



Figuur 6-4 Als Figuur 3-2, maar dan met een 35% i.p.v. 25% volume toename per verlengende maatregel.

Tabel 6-1 Als Tabel 3-3, maar dan met een 35% i.p.v. 25% volume toename per verlengende maatregel.

	Variant [Mm3/yr]					
	Strategie 1			Strategie 2		
	Huidig	+1. Uitbreiding volume op één locatie	+2. Verhogen frequentiesuppletie	+3. Uitbreiden aantal suppletielocaties	+Systeemsuppleties	
Huidig	3,10 (76%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	
Laag	3,10 (76%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	
Hoog	4,09 (100%)	+0,31 (21%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	
Hoog/Extreem	4,09 (100%)	+1,43 (100%)	+0,28 (14%)	+0,00 (0%)	+0,00 (0%)	
Extreem	4,09 (100%)	+1,43 (100%)	+1,93 (100%)	+0,24 (9%)	+0,00 (0%)	

Tabel 6-2 Als Tabel 3-4, maar dan met een 35% i.p.v. 25% volume toename per verlengende maatregel.

	Strand		Vooroever	
	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]	Oppervlak [km2]	Terugkeertijd [yr]
Huidig	7,47	7,22	26,40	7,50
Laag	7,47	7,22	26,40	7,50
Hoog	7,47	7,22	26,40	7,50
Hoog/Extreem	7,47	6,37	26,40	6,61
Extreem	9,00	5,78	31,79	6,00

Stap 4 Uitbreiden systeemsuppleties

De gekozen oppervlakte van een buitendeltasuppletie (maal conversiefactor in stap 5) bepaalt direct het verstoorde buitendelta-oppervlak. Het gekozen suppletievolume bepaalt voor de Waddenkust lineair de toename in

suppletievolume en afname in terugkeertijd bij strategie 2, bij de Deltakust is deze afhankelijkheid slechts gedeeltelijk aangezien daar ook zandmotorconcepten mogelijk zijn.

Op een vergelijkbare manier werken de parameters van de zandmotorconcepten door in de resultaten bij de varianten met strategie 2. Dit is enkel relevant voor de Deltakust. Indien het gekozen oppervlak van een zandmotorconcept wijzigt, verandert ook het verstoorde strand- en vooroeveroppervlak. Hierbij zorgt een verdubbeling van het suppletieoppervlak voor grofweg een toename van 30% bij het verstoorde oppervlak bij scenario *extreem*. Een toename in suppletievolume heeft geen relevante impact op de bereikte volumes aangezien het benodigde volumes in alle gevallen behaald worden voor de Deltakust, daarentegen doet dit wel de terugkeertijd van de verstoring toenemen.

Stap 5 Conversie bepalen naar gehele kust

De conversiefactoren die bij deze stap zijn gebruikt zijn niet vrij te kiezen, maar zijn bepaald aan de hand van de geometrie (kustlengte, stap 1) en huidig suppletieprogramma (stap 2). Daarom is een geïsoleerde gevoeligheidsanalyse van deze kalibratieparameters niet mogelijk. Een gevoeligheidsanalyse waarbij een ander representatief kustgebied was gekozen bij stap 2 die resulteert in andere conversiefactoren voor de schematische kust is buiten de scope van dit project.

Conclusie gevoeligheid

In de bovenstaande beschouwing is duidelijk geworden in hoeverre de resultaten van de schematische kustgebieden gevoelig zijn voor de keuzes die gemaakt zijn bij de invoer. Ten aanzien van de varianten per scenario kan worden geconcludeerd dat deze vooral gevoelig zijn voor de oprekbaarheid van de verlengende maatregelen, i.e., hoeveel extra suppletievolume elke maatregel maximaal tot gevolg kan hebben. Desondanks blijkt dat de knikpunten in suppletie strategie relatief ongevoelig zijn voor de gemaakte aannames en keuzes in invoer. Dat wil zeggen dat de geïdentificeerde knikpunten robuust zijn bij andere invoer, alleen wellicht bij een andere mate van zeespiegelstijging/scenario.

De gevonden verstoorte oppervlaktes en terugkeertijd van de verstoring is afhankelijk van meerdere invoerparameters. Zoals bij bovenstaande stappen uiteengezet is het bij een deel hiervan niet doelmatig om deze parameters in isolatie te beschouwen. Dit komt omdat de geometrie, het huidige suppletieprogramma en de conversie naar de gehele kust direct samenhangen en van elkaar afhankelijk zijn. Bovendien zijn deze invoerparameters gekalibreerd aan de hand van 1) de lengte van de kustlijn (BKL) en; 2) het totale huidige suppletievolume. Hierin is een vergelijkbare verhouding tussen suppletievormen aangehouden. Een gevoeligheidsanalyse waarbij een ander gebied was gekozen voor de schematische modellen is niet uitgevoerd, maar had met een zekerheid grenzende waarschijnlijkheid niet tot significant andere resultaten geleid.

Van de parameters waarvan een geïsoleerde gevoeligheidsanalyse wel mogelijk is, zijn de belangrijkste de breedtes van het strand, de vooroever en de geulwand bepaald. De verstoorte oppervlaktes zijn binnen strategie 1 lineair afhankelijk van deze breedtes.

Bijlage C Suppletievolumes huidige situatie t.b.v. schematisatie

Waddenkust

Bron: Beheerbibliotheek Kust Ameland (Deltares, Beheerbibliotheek Kust Ameland, 2023).

Ameland (2003-2022)		Strand [Mm3]	Geulwand [Mm3]	Vooroever [Mm3]	per strekkende meter [m3/m]
2003	Midden			1,43	333
2004	West	0,40			336
2006	Midden			1,50	300
2006	Midden	1,00			200
2007	West	0,30			252
2007	West			1,20	1122
2010	Midden			1,94	539
2010	Midden			1,12	561
2010-2011	West	1,89			944
2010-2011	Midden	0,93			201
2011	Oost	0,91			239
2011	Oost			1,63	544
2015	West	1,30			496
2015	Midden	1,00			217
2019	West	2,54			847
2015	Midden			2,00	434
2019-2020	Midden			4,46	446
2017-2018	Zuidwest		2,50		1250
Totaal [Mm3]		10,27	2,50	15,29	
Per jaar [Mm3/yr]		0,51	0,13	0,76	

Hollandse Kust

Bronnen: Beheerbibliotheek Rijnland (Deltares, Beheerbibliotheek Rijnland, 2019) aangevuld met recente data en Beheerbibliotheek Kust Noord-Holland (Deltares, Beheerbibliotheek Kust Noord-Holland, 2024).

Meijendel (1993-2022)	Strand [m3]	Vooroever [m3]	per strekkende meter [m3/m]
1994	700000		350
1997	552800		221
1996	500000		200
2002		2508887	418
2006		800400	100
2021		3000000	500
Totaal [Mm3]	1,75	6,31	
Per jaar [Mm3/yr]	0,06	0,21	
Callantsoog-Donkere Duinen (2003-2022)	Strand [m3]	Vooroever [m3]	per strekkende meter [m3/m]
2003		2315360	385
2003	438155		165
2003		12243	40
2003	1305458		298

2004	263972		99
2006		1651965	317
2007		3239103	635
2007	1350447		306
2009		1301565	433
2011	652020		192
2013		2000000	475
2015	1000000		209
2017	400000		192
2017		1000000	531
2019	400000		192
2019		1800000	473
2021	1100000		220
Totaal [Mm3]	6,91	13,32	
Per jaar [Mm3/yr]	0,35	0,67	

Deltakust

Bronnen: Beheerbibliotheek Walcheren en Noord-Beveland/Veerse Dam (Deltares, Beheerbibliotheek Walcheren en Noord-Beveland/Veerse Dam, 2018) en Beheerbibliotheek Kust Schouwen (Deltares, Beheerbibliotheek Kust Schouwen, 2022) aangevuld met recente data.

Schouwen-Duivenland (2014-2023)	Strand [m3]	Vooroever [m3]	Geulwand [m3]	per strekkende meter [m3/m]
2016	246750			164
2017	370000			201
2017	800000			232
2019	418660			279
2019	81500			194
2021	760000			197
2021	40000			173
Totaal [Mm3]	2,72	0,00	0,00	
Per jaar [Mm3/yr]	0,27	0,00	0,00	
Walcheren (2014-2023)	Strand [m3]	Vooroever [m3]	Geulwand [m3]	per strekkende meter [m3/m]
2014	350000			244
2015	600000			310
2016	805000			161
2016	650000			127
2017-2018		1500000		461
2017		800000		434
2017		2400000		500
2019	500000			271
2019	600000			281
2020	210000			283
2022	500000			357
2021	900000			168
2021-2022	1065293			201
2023			2865943	988
2023	550000			474
Totaal [Mm3]	6,73	4,70	2,87	
Per jaar [Mm3/yr]	0,67	0,47	0,29	

Colofon

EFFECT VAN ZANDSUPPLETIES OP FUNCTIES IN DE KUSTZONE BIJ TOENEMENDE ZEESPIEGELSTIJGING

KLANT

Rijkswaterstaat

AUTEUR

Klaas Lenstra, Jelmer Cleveringa, Nanne van Hoytema, Belinda Kater, Liselore Geerlings

PROJECTNUMMER

30233076

ONZE REFERENTIE

YNAZZ7T4N37D-1129855941-175:1

DATUM

25 november 2024

STATUS

Definitief

GECONTROLEERD DOOR

Jelmer Cleveringa
Senior Advisor Coastal Morphodynamics

VRIJGEGEVEN DOOR

Jelmer Cleveringa
Senior Advisor Coastal Morphodynamics

Over Arcadis

Arcadis is de leidende wereldwijd opererende datagedreven duurzame ontwerp-, advies- en consultancyorganisatie op het gebied van de natuurlijke en gebouwde omgeving. Wij zijn met 36.000 architecten, data-analisten, ingenieurs, projectplanners, water- en duurzaamheidexperts. Onze gedeelde passie is: Improving quality of life. Toewijding aan de strategie 'accelerating a planet positive future' onderschrijft onze wereldwijde samenwerking met klanten en hoe we hen helpen met duurzame projectkeuzes. We combineren digitale met mensgerichte innovaties en omarmen toekomstgerichte vaardigheden op het gebied van milieu, energie, water, gebouwen, transport en infrastructuur. We werken vanuit meer dan dertig landen en rapporteerden in 2023 een bruto omzet van 5 miljard euro. www.arcadis.com

www.arcadis.com

Arcadis Nederland B.V.

Postbus 137
8000 AC Zwolle
Nederland

T +31 (0)88 4261 261

Arcadis. Improving quality of life

Volg ons op



[Arcadis](https://www.linkedin.com/company/arcadis)

