

## Dutch Coastline Challenge

Uitvoeringsmethoden (werkpakket 3)



### Colofon

Uitgegeven door	Vereniging van Waterbouwers
Auteur(s)	Guido Akster, Govert-Jan de Bruin, Thomas Hamer, Chris Harrewijn, Coen Spelt, Helene Spiering
Uitgevoerd door	Werkpakket 3 - Uitvoeringsmethoden
Datum	08-03-23
Versie	1.0
Document ID	DCC_Eindrapportage_WP3_Uitvoeringsmethoden_V1.0
Pagina's	56
Status	Definitief

### Versiebeheer

Versie	Datum	Omschrijving
<b>0.1</b>	30-08-2022	1 <sup>e</sup> concept versie opgesteld
<b>0.2</b>	01-10-2022	V0.2 intern gereviewd door: Coen Spelt, Guido Akster, Thomas Hamer, Helene Spiering en Chris Harrewijn Verwerkt tot V0.3
<b>0.3</b>	23-12-2022	V0.3 gereviewd door: Jeroen Terlingen, Johan van Dam, Claudia Knijnenburg, Kees Koejemans, Annika Trignol, Etienne Koman, Bennie van den Hazel
<b>1.0</b>	08-03-2023	Reviewcommentaar verwerkt tot definitieve versie 1.0

## Inhoud

Inhoud .....	3
1 Samenvatting .....	4
2 Inleiding en vraagstelling .....	6
3 Alternatieven (suppletieconcepten) .....	7
3.1 Reguliere onderhoudssuppleties .....	7
3.2 Megasuppleties .....	10
3.3 Continue suppleties .....	12
4 Uitvoeringsmethoden .....	14
4.1 Huidige uitvoeringsmethode(n) .....	14
4.2 Innovatieve Uitvoeringsmethoden .....	17
5 Combinaties van uitvoeringsmethoden en suppletieconcepten .....	22
5.1 Mogelijke combinaties .....	22
5.2 Uitgangspunten afweging combinaties .....	23
5.3 Expert Judgement Analyse: Impact combinaties .....	24
5.4 Trechtering .....	26
6 Methodisch kader .....	27
6.1 Methodisch Kader Uitvoering .....	27
6.2 Methodisch Kader Kosten .....	29
6.3 Methodisch Kader Milieukostenindicator (MKI) .....	30
7 Resultaten op indicatoren .....	39
7.1 Kansrijke megasuppletieconcepten .....	39
7.2 Resultaten over megasuppletieconcepten .....	41
7.3 Vergelijking megasuppletie met de reguliere suppletie .....	43
7.4 Kansrijke continue suppletieconcepten .....	44
8 Gevoeligheidsanalyses .....	45
8.1 CO <sub>2</sub> prijs .....	45
8.2 Brandstofprijzen .....	45
8.3 MKW-weging .....	46
8.4 Zandwinstrategie (vaarafstanden) .....	47
9 Conclusie .....	49
9.1 Belangrijkste conclusies .....	49
9.2 Conclusies gevoeligheidsanalyse .....	49
9.3 Kennisleemte en limitaties .....	50
10 Aanbevelingen .....	52
11 Afkortingen .....	53
12 Referenties .....	54
13 Bijlagen .....	56

### 1 Samenvatting

Voor u ligt het onderzoeksrapport van Werkpakket 3 (WP3) van Topconsortia Kennis & Innovatie project Dutch Coastline Challenge (TKI-DCC). In dit onderzoek is onderzocht welke (innovatie en duurzame) uitvoeringsmethoden mogelijk zijn voor diverse suppletieconcepten en de impact op kosten en milieukosten (MKI). In deze rapportage zijn de uitvoeringsmethode uitgewerkt de onderdelen systeemkennis (WP1), suppletieconcepten (WP2) en het afwegingskader (WP4) zijn uitgewerkt in andere werkpakketten. De uitkomsten over de werkpakketten zijn gebundeld in het Syntheserapport. De overige rapportages zijn beschikbaar op de DCC wiki pagina.

#### *Toelichting scope onderzoek*

Allereerst zijn verschillende uitvoeringsmethoden voor het kustonderhoud verzameld o.a. vanuit lopende ontwikkelingen binnen het innovatiepartnerschap traject Innovaties in de Kustlijn zorg (IKZ), het Maritiem Masterplan en de Zero Emission Dredging Hub (ZEDHub). Daarna is op basis van de aangedragen suppletieconcepten vanuit WP2 onderzocht welke uitvoeringsmethoden haalbaar/ technisch uitvoerbaar zijn voor desbetreffend suppletieconcept. Daaruit blijkt dat sommige uitvoeringsmethoden in hun huidige ontwikkelingsfase technisch niet ver genoeg ontwikkeld zijn of dat er (nog) te weinig informatie beschikbaar is om conclusies te kunnen trekken. De focus van de uitvoeringsmethode is daarmee verschoven naar varianten van suppleren met de slephopperzuiger.

Voor de slephopperzuiger varianten blijken megasuppletie en continue suppletieconcepten kansrijk om ontwikkeling op kosten en duurzaamheid te creëren. In samenwerking met WP2 zijn een aantal kansrijke megasuppletieconcepten nader onderzocht, namelijk: Drie varianten van een megasuppletie van 7.5 MIO m<sup>3</sup>: Onderwater, Eiland en een Schiereiland. Voor de continue suppletieconcepten zijn uitvoeringsmethode die zand daadwerkelijk van de winlocatie naar de kustlijn brengen nog niet vergenog ontwikkeld om hier als onderzoeksgroep conclusies over te trekken.

De impact van de megasuppletieconcepten op kosten en duurzaamheid zijn bepaald aan de hand van varianten van suppleren met de slephopperzuiger. Hierin is er gekeken naar verschillende suppletie methode, hopper typen en verschillende aandrijvingsvormen. Voor de aandrijvingsvormen is het spectrum van huidige brandstoffen Marine Diesel Oil (MDO) tot aan toekomstige alternatieve brandstoffen beschouwd.

De combinaties van deze suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden zijn verder kwantitatief en herleidbaar uitgewerkt op de indicatoren kosten en duurzaamheid (milieukosten indicator (MKI)) incl. gevoeligheidsanalyses op de mogelijk bepalende draaiknoppen. Deze draaiknoppen zijn: MKI factor, CO<sub>2</sub> prijs, brandstofprijs en vaarafstand.

#### *Conclusies*

Op basis van deze kwantitatieve uitwerking zijn de volgend belangrijkste conclusies getrokken: de megasuppletieconcepten waarbij de uitvoeringsmethode een lagere energievraag heeft, scoren het best op zowel kosten als duurzaamheid. De onderwater suppletie scoort het beste, omdat hier door de slephopperzuiger minder energie hoeft te worden aangesproken om het zand op de juiste plek te krijgen. Ook zijn de eenmalige kosten bij dit suppletieconcept het laagst.

Als gekeken wordt naar de uitvoeringsmethoden met verschillende type brandstoffen is de conclusie dat de uitvoering van een suppletieconcept met een duurzamere brandstof ook een stuk duurder is ten opzichte van MDO (33%-40%). Dit levert wel een vermindering op van de milieukosten (met +- een factor 10). Als voorbeeld de uitvoering van het Eiland: bij gebruik van MDO zijn de kosten 28,1 Mio euro t.o.v. 41,6 Mio (+13,5 Mio) met een alternatieve brandstof. De MKI gaat hier respectievelijk van 4,3 Mio naar 0,4 Mio (-3,9 Mio). In de huidige manier van het waarderen van MKI in aanbestedingen is het gebruik van een alternatieve brandstof momenteel niet competitief.

Uit de gevoeligheidsanalyses is gebleken dat de resultaten sterk onderhevig zijn aan de brandstofprijzen (prijspeil januari 2021) en welke waardering er aan duurzaamheid wordt gehangen. Het voorbeeld hierboven laat zien dat er op dit moment een hogere duurzaamheidswaardering nodig is om duurzame brandstoffen competitief te maken. Een ander kantelpunt kan zijn dat in de toekomst duurzamere brandstoffen mogelijk goedkoper worden en hierdoor wel competitief.

Daarnaast is uit de gevoeligheidsanalyses gebleken dat bij een vergroting van de vaarafstand (bijvoorbeeld door een andere zandwinstrategie) goed moet worden gekeken naar de uit te voeren suppletieconcepten. Bij een grotere vaarafstand wordt het gebruik van grotere schepen namelijk efficiënter door schaalvoordelen (meer zand meenemen per trip). Dat betekent dat suppletieconcepten die alleen gemaakt kunnen worden met kleinere schepen (door de aanlegdiepte en diepgang van het schip) minder efficiënt (in kosten en MKI) worden.

### **Aanbevelingen**

Het bepalen van de kosten en MKI van duurzame alternatieve brandstoffen zoals waterstof en methanol is nog niet zover dat hier een eenduidige rekenmethode voor is vastgelegd. Dit komt door het ontbreken van informatie over bijvoorbeeld te hanteren brandstofprijzen voor schepen of onvolledige uitgewerkte Life Cycle Analyses (LCA's). Het is daarom zaak dit soort informatie met de waterbouwsector verder te ontwikkelen en te hanteren, bijvoorbeeld door MKI-waarden voor alternatieve brandstoffen te berekenen en dit aan te houden als branchegemiddelde. Megasuppletieconcepten bieden de zekerheid voor marktpartijen en overheden om grotere investeringen op het gebied van duurzaamheid te doen. Met het vooruit trekken van megasuppletieconcepten kan een sprong in de verduurzaming van het kustonderhoud worden gemaakt die later weer toepasbaar kan zijn binnen het reguliere van handhaven van de Nederlandse kust. Overheid, Kennisinstituten en Markt moeten de handen ineenslaan om binnen en transparante samenwerking een dergelijke stap ook op fysiek uit te werken.

## 2 Inleiding en vraagstelling

Het algemene doel van het Topconsortia Kennis & Innovatie project Dutch Coastline Challenge (TKI-DCC) is om bouwstenen aan te leveren aan klimaatneutraal en opschaalbaar kustonderhoud door het ontwerpen en evalueren van concrete alternatieven voor het kustvak IJmuiden- Texel tot 2035. Hierbij richt het project zich op (1) duurzame en opschaalbare onderhoudsconcepten en uitvoeringsmethoden voor het kustonderhoud en daarbij passend (2) duurzaam samenwerken in de driehoek (overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen) op basis van slimme samenwerkings- en contractvormen.

Binnen werkpakket 3 (WP3) staan de volgende vragen centraal:

- Welke (innovatieve en duurzame) uitvoeringsmethoden zijn mogelijk voor de verschillende suppletieconcepten volgend uit WP2?
- Welke kosten hangen hier mee samen?
- Welke milieukosten (MKI) hangen hier mee samen?

### Leeswijzer

Om antwoord te geven op bovenstaande vragen zijn in dit deelrapport de volgende zaken beschreven:

- **Hoofdstuk 3 Alternatieven (suppletieconcepten).** Geeft een beschrijving van de mogelijke **alternatieven (suppletieconcepten)** volgend uit WP2.
- **Hoofdstuk 4 Uitvoeringsmethoden.** Geeft een beschrijving van huidige en toekomstige **uitvoeringsmethoden**.
- **Hoofdstuk 5 Combinaties van uitvoeringsmethoden en suppletieconcepten.** Hierin worden voor de alternatieven (suppletieconcepten) en uitvoeringsmethoden logische combinaties gemaakt.
- **Hoofdstuk 6 Methodische kader.** Beschrijft op welke wijze kosten en milieukosten zijn berekend.
- **Hoofdstuk 7: Resultaten.** Beschrijft de resultaten (kosten en milieukosten)
- **Hoofdstuk 8: Gevoeligheidsanalyses.** Beschrijft aanvullende berekeningen om de gevoeligheid van factoren op de resultaten te controleren.
- **Hoofdstuk 9: Conclusie.** Beschrijft de conclusie(s) van het gedane onderzoek.
- **Hoofdstuk 10: Aanbevelingen.** Beschrijft welke aanbevelingen er vanuit WP3 worden gedaan.
- **Hoofdstuk 11: Opschaalbaarheid.** Beschrijft hoe de resultaten/aanbevelingen etc. op grotere schaal kunnen worden toegepast.
- **Hoofdstuk 12: Afkortingen.** Hier staat een lijst met gehanteerde afkortingen in de rapportage.
- **Hoofdstuk 13: Referenties.** Hier staat een lijst met gehanteerde referenties in de rapportage.

### 3 Alternatieven (suppletieconcepten)

Voor het identificeren van kustonderhoudsconcepten is uitgegaan van het huidige adagium “zacht waar het kan, hard waar het moet”. Dit wil zeggen dat we ons richten op suppletieconcepten en niet op “harde”, infrastructurele maatregelen zoals zeeweringen. Specifieker kijken we naar verschillende wijzen van het suppleren van zand om de basiskustlijn<sup>1</sup> en het kustfundament<sup>2</sup> te onderhouden.

De onderhoudsconcepten zijn geïdentificeerd op basis van literatuurstudie, praktijkervaringen uit het verleden en brainstormsessies. Voor het overzicht classificeren we de onderhoudsconcepten naar de locatie in het dwarsprofiel en het suppletietype:

- **“Reguliere” onderhoudssuppleties** met een volume van 0,1-5 Mm<sup>3</sup> en een terugkeertijd van 1-10 jaar;
- **Megasuppleties** met een groter volume en een terugkeertijd van orde 20-30 jaar;
- **Continue suppleties** met beperkte hoeveelheden per tijdseenheid op één punt, die een (semi-)continue voeding van de kust leveren.

De verschillende suppletietypen brengen dus alle drie op een andere manier zand in het ‘systeem’ om de basiskustlijn en het kustfundament te onderhouden.

De suppletietypes kunnen op verschillende plekken in het dwarsprofiel worden aangebracht, zoals op de vooroever, het strand, een buitendelta of een geulwand. Binnen deze (hoofd)categorieën zijn nog talloze varianten denkbaar op basis van onder andere de exacte locatie in het dwarsprofiel, de aanleghoogte, de laagdikte en het aangebrachte patroon.

De hoofdtekst van deze memo is onderverdeeld op basis van de drie gedefinieerde onderhoudsconcepten: reguliere onderhoudssuppleties (§3.1), megasuppleties (§3.2) en continue suppleties (§3.3). Deze paragrafen zijn verder onderverdeeld op basis van suppletielocatie in het dwarsprofiel.

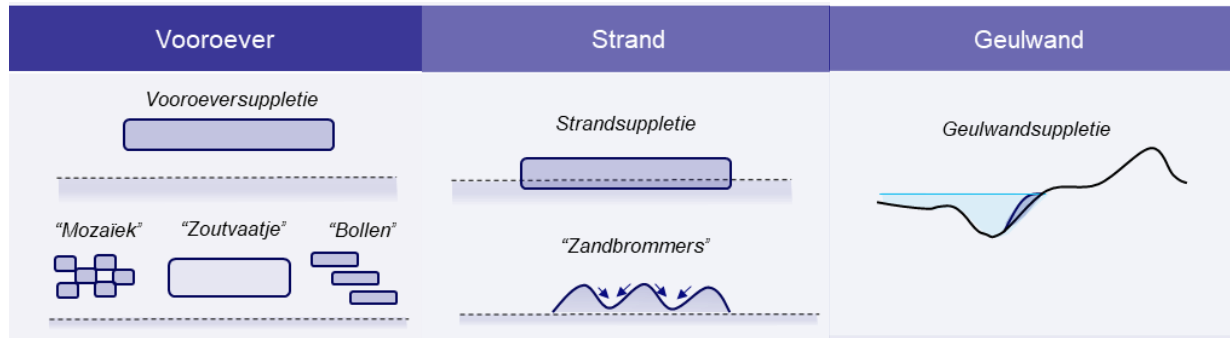
#### 3.1 Reguliere onderhoudssuppleties

Reguliere onderhoudssuppleties zijn de “standaard” voor het onderhouden van de Nederlandse kust binnen Kustlijn­zorg (het kustonderhoudsprogramma van Rijkswaterstaat). Er is in de afgelopen decennia veel ervaring opgebouwd met dit suppletietype. Bij reguliere suppleties wordt regelmatig, met een tussenliggende periode van 1 tot 10 jaar een zandvolume van 0,1-5 miljoen m<sup>3</sup> aangebracht op de vooroever, op het strand of op een geulwand (zie Figuur 3-1). Deze concepten worden hieronder kort toegelicht.

---

<sup>1</sup> De basiskustlijn, of BKL, is de kustlijn van 1 januari 1990. Binnen het Nederlandse kustbeleid wordt jaarlijks aan de hand van de MKL (momentane kustlijn) de TKL (te toetsen kustlijn) bepaald. Suppleties worden uitgevoerd wanneer de TKL landwaarts dreigt te komen van de BKL.

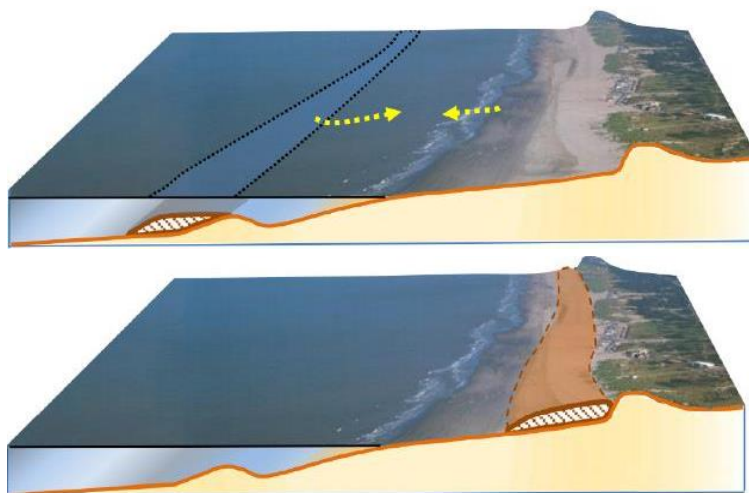
<sup>2</sup> Het kustfundament wordt gedefinieerd als het actieve kustgebied, dat zich uitstrekt van de landzijde van de duinen tot de 20 m-dieptelijn.



Figuur 3-1 Overzicht van reguliere onderhoudssuppleties. De eerste 2 kolommen tonen bovenaanzichten, laatste kolom een geulwandoppletie in zijaanzicht.

### 3.1.1 Vooroeveroppletie

Vooroeveroppleties worden onderwater, zeewaarts van het strand aangelegd, op de vooroever (zie Figuur 3-2 bovenste 2 afbeeldingen). Het zand wordt door de sleepopperzuigers op de zeebodem aangebracht door de bodemkleppen te openen. Wanneer locaties niet bereikbaar zijn door ondiepte wordt incidenteel gebruik gemaakt van rainbowen. Met rainbowen wordt het zand vanaf de boeg van de sleepopperzuiger met een grote boog door de lucht gespoten. Uit zowel theoretische studies als ervaring in het veld komt naar voren dat vooroeveroppleties niet alleen net zo effectief waren als strandoppleties (zie § 3.1.2), maar dat deze manier van suppleren ook goedkoper is, minder invasief voor het strand en acceptabeler voor het grote publiek (B. J. A. Huisman et al., 2019; van Duin et al., 2004). De levensduur van vooroeveroppleties is ca. 5 jaar. Ze hebben een kustlangse grootte van ca. 350-500 m<sup>3</sup>/m, een lengte variërend van 2 tot 7 km en een aanleghoogte variërend van -7 tot -4 m NAP (WL | Delft hydraulics et al., 2006). De bijdrage van vooroeveroppleties op de momentane kustlijn (MKL)-zone en strandbreedte is lastig in universele getallen te vatten. Op lange tijdschaal is waargenomen dat de Basis Kustlijn (BKL) volumes in stand worden gehouden door vooroeveroppleties (van Koningsveld & Mulder, 2004), echter een directe link tussen de aanleg en uitbreiding van MKL in het volgende jaar is niet altijd zichtbaar.



Figuur 3-2 Grafische weergave van vooroeveroppleties waarbij het zandpakket voor de kust op de vooroever wordt gesuppleerd (boven) en van strandoppleties waarbij het zandpakket tegen de duinvoet aan wordt gesuppleerd (onder). Aangepast van (Stive et al., 2013)

### 3.1.2 Strandoppletie

De conventionele manier van het suppleren van zand is doormiddel van strandoppleties (de Schipper et al., 2021). Hierbij wordt zand direct op het strand of tegen de duinvoet aangelegd (zie Figuur 3-2 onderste afbeelding). Het aanleggen van een strandoppletie betekent dat het zand vanuit het schip naar het strand wordt gepompt via een grote pijpleiding. Op het strand wordt het zand verdeeld (en verdicht) met bulldozers. Door de buisleiding op het strand te verleggen wordt geleidelijk een kustlangse sectie van het kustvak gesuppleerd. Strandoppleties langs de



Nederlandse kust hebben een kustlangse omvang volume van ca. 200 m<sup>3</sup>/m en een levensduur van ca. 3 jaar (Brand et al., 2022). Ze hebben een direct effect op de breedte van het strand. Daarmee is het gesuppleerde zand (bijna) volledig aangebracht in de basiskustlijnzone waarmee de doelstelling van Rijkswaterstaat wordt getoetst.



*Figuur 3-3 Foto's van de aanleg van een strandsuppletie (links) en het opspuiten, of rainbowen, van een vooroeversuppletie (rechts). Bron: natuurlijkveilig.nl*

### 3.1.3 Geulwandsuppletie

Geulwandsuppleties worden uitgevoerd op die plekken bij de kust waar een getijdegeul direct voor de kust aanwezig is, in de Zeeuwse delta en bij de Wadden. Een geulwandsuppletie wordt zeewaarts onder water aangebracht op de geulwand tegen de landwaartse oever van de getijdegeul. De eerste geulwandsuppleties stammen uit 1952 en 1966 (Baptist, 2011). Vervolgens zijn geen geulwandsuppleties uitgevoerd tot 1987. Sinds 2003 zijn er dertien geulwand suppleties uitgevoerd, met een gemiddeld volume van 2.4 Mm<sup>3</sup> en een kustlangse omvang variërend van 400-2000 m<sup>3</sup>/m (Brand et al., 2022).

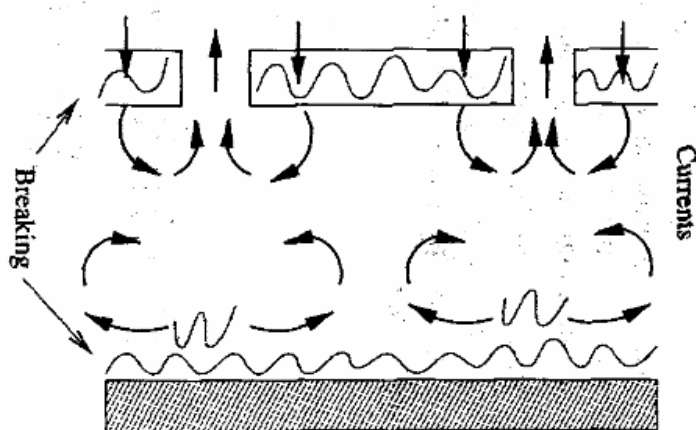
### 3.1.4 Overige varianten op strand- en vooroeversuppleties

Op de bovenstaande reguliere strand-, vooroever- en geulwandsuppleties zijn varianten denkbaar. Anders dan de reguliere suppletietypes is met deze varianten weinig tot geen ervaring opgedaan. Hieronder volgen een paar voorbeelden.

Zandbrommers zijn een concept waarbij meerdere geconcentreerde strandsuppleties lokaal naast elkaar op het strand worden uitgevoerd (Hoekstra et al., 2012). Zo worden kleine zandige “strandhoofden” aangelegd op een vooraf bepaalde afstand van elkaar. Het zijdelings transport van zand tussen de zandbrommers komt na aanleg op gang door natuurlijke processen. De verwachting is dat getij- en golfstroming de zandbrommers binnen enkele maanden (lokaal) verdelen over de kust. Door deze wijze van uitvoering zijn er minder werkzaamheden nodig op het strand om het zand te verdelen ten opzichte van reguliere strandsuppleties. Het aanleggen van zandbrommers is daarom een alternatief voor strandsuppleties.

Ook op de vooroever is er een variant voorgesteld met enkele geconcentreerde suppleties (de zgn. ‘bollen’ of ‘humplike’ suppletie). Hierbij is de hypothese dat een horizontale circulatie in de waterbeweging (de mui-bank stroming) de morfodynamische verspreiding versnelt (Koster, 2006). Een eerste pilot hiervan is uitgevoerd in Heemskerk in 2009 waarbij dit versnelde verspreidingseffect nauwelijks is waargenomen.

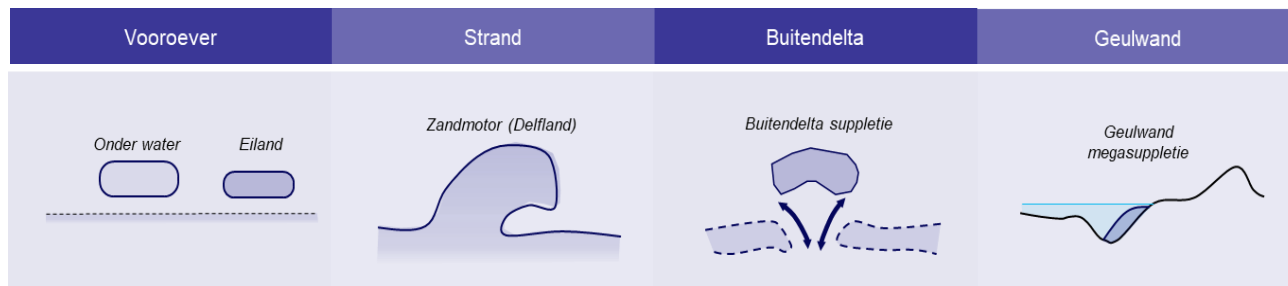
Daarnaast zijn er varianten bedacht voor suppleties op de vooroever waarvan de intentie is om de gevolgen voor het bodemleven te beperken. Een voorbeeld hiervan is de “mozaïeksuppletie” waarbij gebieden met bedelving worden afgewisseld met delen zonder bedelving (Schlacher et al., 2012). Een ander voorbeeld is een concept waarbij de suppletie wordt aangebracht in dunne lagen om de ecologie kans te geven om mee te groeien (de Schipper et al., 2021), voor nu “het zoutvaatje” genoemd.



Figuur 3-4 Bovenaanzicht van de Bollen suppletieconcept (suppleties in de rechthoeken aan de bovenzijde) en de stromingen met de zwarte pijlen. Het droge strand is aangegeven met de gearceerde rechthoek. Bron: (Koster, 2006)

### 3.2 Megasuppleties

Bij een megasuppletie wordt een grote hoeveelheid zand opgespoten langs de kust, waarmee in één keer het benodigde zandvolume voor een periode van 20 tot 30 jaar wordt aangebracht. Hierdoor hoeft men minder vaak terug te komen voor kustonderhoud. De megasuppletie kan, net als bij reguliere suppleties, worden aangebracht op de vooroever, tegen het stranden op de geulwand en daarnaast ook op de buitendelta (zie Figuur 3-5). Daarnaast kan het zand in geconcentreerde vorm worden aangebracht (feeder mega nourishments), zoals bij de Zandmotor bij Kijkduin (Stive, 2013), of kustlangs uitgespreid.

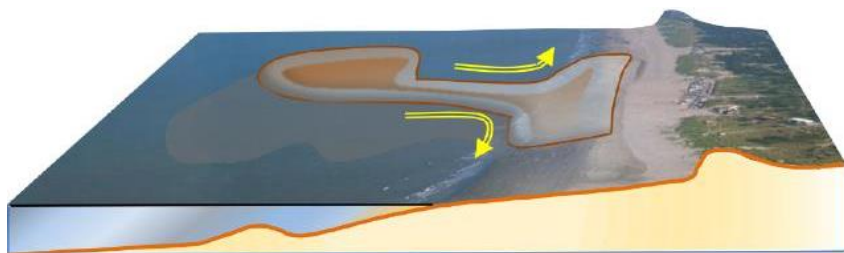


Figuur 3-5 Overzicht van alternatieve megasuppleties

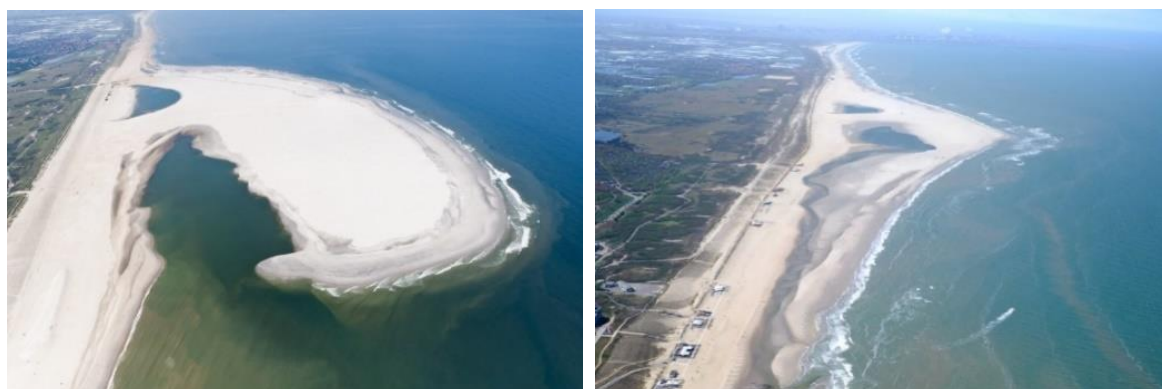
#### 3.2.1 Op het strand

In 2011 is de Zandmotor aangelegd op het strand tussen Kijkduin en Ter Heijde (Stive, 2013). Bij deze megasuppletie is een grote hoeveelheid zand opgespoten tegen het bestaande strand aan waardoor een kunstmatig schiereiland is gevormd (zie Figuur 3-6 en Figuur 3-7). De vorm en omvang van megasuppleties op het strand kan ook afwijken van de Zandmotor. Naast de geleverde bijdrage aan de kustveiligheid, hebben megasuppleties op het strand ook de potentie om andere functies te bedienen, zoals natuur, recreatie en kennisontwikkeling.

De verschillende aanlegtechnieken (zand naar de kust pompen via een buisleiding, lossen onder het schip (klappen) en rainbowen) zijn gecombineerd voor de aanleg van de zandmotor. Door de stroming langs de kust wordt dit zand vervolgens langs de kust verplaatst. Deze verspreiding wordt voorzien voor over een periode van meer dan 20 jaar (Stive, 2013; B. Huisman, 2021).



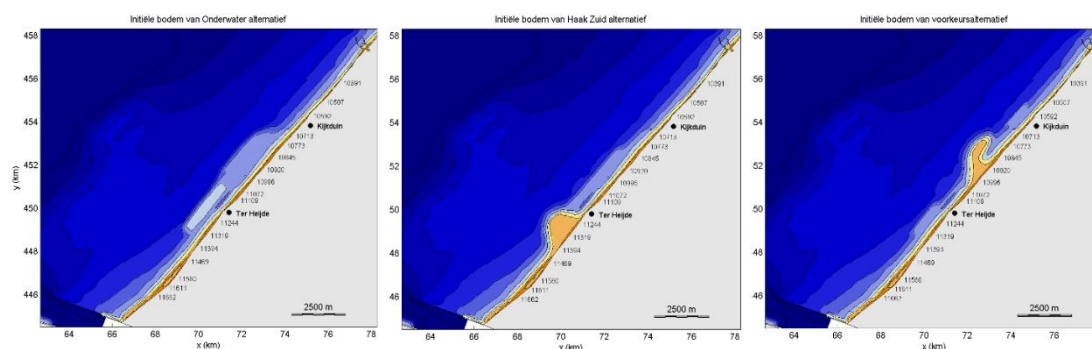
Figuur 3-6 Grafische weergave van zandmotorsuppleties waarbij een grote hoeveelheid zand voor de kust wordt gesuppleerd.  
Bron: (Stive et al., 2013).



Figuur 3-7 De Zandmotor direct na aanleg (2011, links) en na 4 jaar morfologische ontwikkeling (2015, rechts). Bron: [www.flickr.com/photos/zandmotor/](http://www.flickr.com/photos/zandmotor/)

### 3.2.2 Op de vooroever

Concepten voor megasuppleties die zeewaarts en los van het strand op de vooroever worden aangelegd zijn zeer grote zandbanken die volledig onder water liggen of die een eiland vormen voor de kust. Alhoewel er met deze concepten voor megasuppleties geen praktijkervaringen zijn opgedaan, is er tijdens de ontwerpfase van de Zandmotor wel numeriek geëxperimenteerd met verschillende alternatieven (Mulder & Tonnon, 2011). Eventuele voordelen van een dergelijke aanpak zijn kortere vaarafstanden en de mogelijkheid om het zand meer direct aan te kunnen brengen (rainbowen en klappen in plaats van persen). Hier tegenover staat dat veel van de toegevoegde kustfuncties bij een mega suppletie op het strand in dit geval kunnen komen te vervallen. Zo is de uitbreiding van het strandoppervlak niet direct en is dus de toegevoegde waarde voor recreatie en natuur wellicht minder.

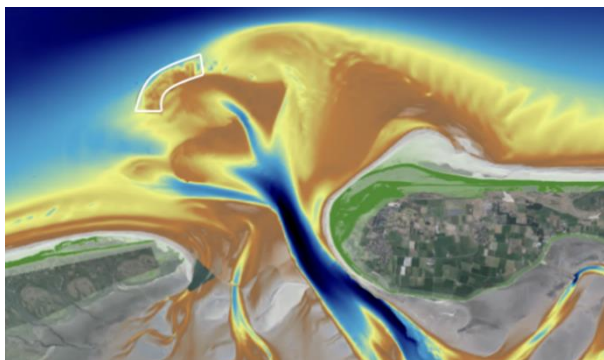


Figuur 3-8 Megasuppletie alternatieven op de vooroever (links), belevormig (midden) en haakvorming (rechts). Bron: (Mulder & Tonnon, 2011)

### 3.2.3 Op de buitendelta of geulwand

De buitendelta's zijn de gebieden zeewaarts van de zeegaten, die uit zowel ondieptes (zandbanken) als getijdegeulen bestaan. De aanwezigheid van buitendelta's is verbonden met de zeegaten van de Wadden. Ook de mondingsgebieden van de Ooster- en Westerschelde worden beschouwd als buitendelta's. Bij een buitendeltasuppletie wordt een groot volume zand onder water aangebracht op de geulwanden en ondiepere

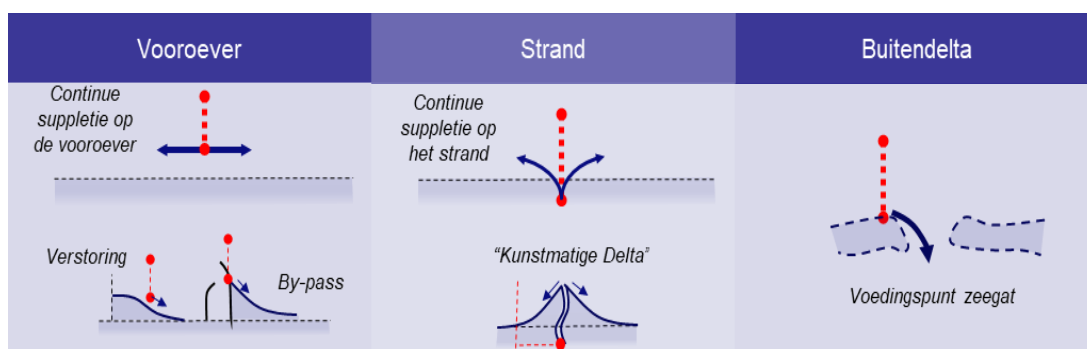
delen, waarna het zand door de transportprocessen (getij, golven) wordt verdeeld over de buitendelta. Met het aanbrengen van suppleties op de buitendelta zouden zandverliezen in het kustfundament al kunnen worden aangevuld voordat ze een probleem vormen voor het kustonderhoud van de eilanden. Hierbij speelt ook mee dat de buitendelta's extra ruimte bieden om suppleties uit te voeren, op de plek waar de sedimentbehoefte het grootst is (Rijkswaterstaat, 2020). De eerste pilot voor een buitendeltasuppletie is uitgevoerd tussen maart 2018 en februari 2019 in het Amelander Zeegat (zie Figuur 3-9)(Ebbens & Litjens, 2019).



Figuur 3-9 Weergave van buitendelta megasuppletie bij het Amelander Zeegat. Bron: Ebbens & Litjens (2019).

### 3.3 Continue suppleties

Continue suppleties omvatten alle concepten waarbij (semi-)continue kleine volumes zand per tijdseenheid worden aangevoerd naar één locatie. Vanwege de aanvoer van zand op één locatie wordt ook wel over "puntsuppleties" gesproken. Die "punt" kan zowel op het strand als onderwater liggen. Continue suppleties zijn ook denkbaar nabij zeegaten (zie Figuur 3-10). Op dit moment is in Nederland nog geen praktijkervaring met dit type suppleties.



Figuur 3-10 Overzicht van alternatieven van continue suppleties

De vorm van continue suppleties waarmee internationaal ervaring is opgedaan zijn *sediment bypasses*. Hierbij wordt continu zand van de bovenstroomse zijde van een obstructie (havendam) naar de benedenstroomse zijde getransporteerd, zoals de Tweed River sediment bypass in Australië in Figuur 3-11 (Dyson et al., 2001).



Figuur 3-11 Weergave van de Tweed River sediment bypass in Australië, met de layout van het persleidingsysteem (links) en de voedingslocatie op het strand (rechts). Bron: <https://www.tweedsandbypass.nsw.gov.au/>

Waar een sediment bypass systeem een oplossing kan zijn voor situaties met een verstoring van kustlangse sedimenttransporten, is het ook denkbaar om continue suppleties in te zetten aan de open kust. Bij toepassing van een dergelijke continue suppletie zal de kust zich in eerste instantie lokaal snel uitbouwen. Na verloop van tijd zal deze snelheid afnemen en neemt het gebied wat bereikt wordt door het kustlangs verspreide zand toe.

Uiteindelijk wordt een morfologisch evenwicht bereikt. Daarmee kan een continue suppletie ook de vorm van “kunstmatige delta” hebben. Afhankelijk van het suppletievolume wordt het morfologisch evenwicht naar verwachting na jaren tot decennia bereikt. Het toepassen van een kunstmatige delta zou in combinatie kunnen worden gedaan met een megasuppletie. Met zo’n megasuppletie wordt initieel de ‘evenwichtssituatie’ geforceerd en kan de invloedzone sneller vergroot worden. De kunstmatige delta heeft als onderhoudsmethode een meer permanent karakter dan bijvoorbeeld de zandmotor, omdat continue zand wordt aangevoerd, tot dat suppletie wordt stopgezet.

## 4 Uitvoeringsmethoden

In dit hoofdstuk wordt toegelicht welke uitvoeringsmethoden nu worden gehanteerd zijn en welke (innovatieve) uitvoeringsmethoden er mogelijk zijn. In dit hoofdstuk wordt het volgende behandeld:

- § 4.1: De huidige uitvoeringsmethode(n);
- § 4.2:4.2 Innovatieve uitvoeringsmethoden.

### 4.1 Huidige uitvoeringsmethode(n)

De huidige uitvoeringsmethode bij suppleties aan de kust is het inzetten van sleepopperzuigers die materiaal (zand) winnen, transporteren en vervolgens suppleren. Bij het winnen, transporteren of suppleren zijn verschillende zaken van invloed op de uitvoeringsmethode. Enkele voorbeelden zijn:

- Winnen: korrelgrootte van het materiaal, aanwezigheid kabels en leidingen, aanwezigheid explosieven, diepte van het wingebied en/of de pompcapaciteit.
- Transporteren: vaarafstand, weersinvloeden en/of de grootte van de sleepopperzuiger.
- Suppleren: diepgang van de sleepopperzuiger en de aanleghoogte van het materiaal.

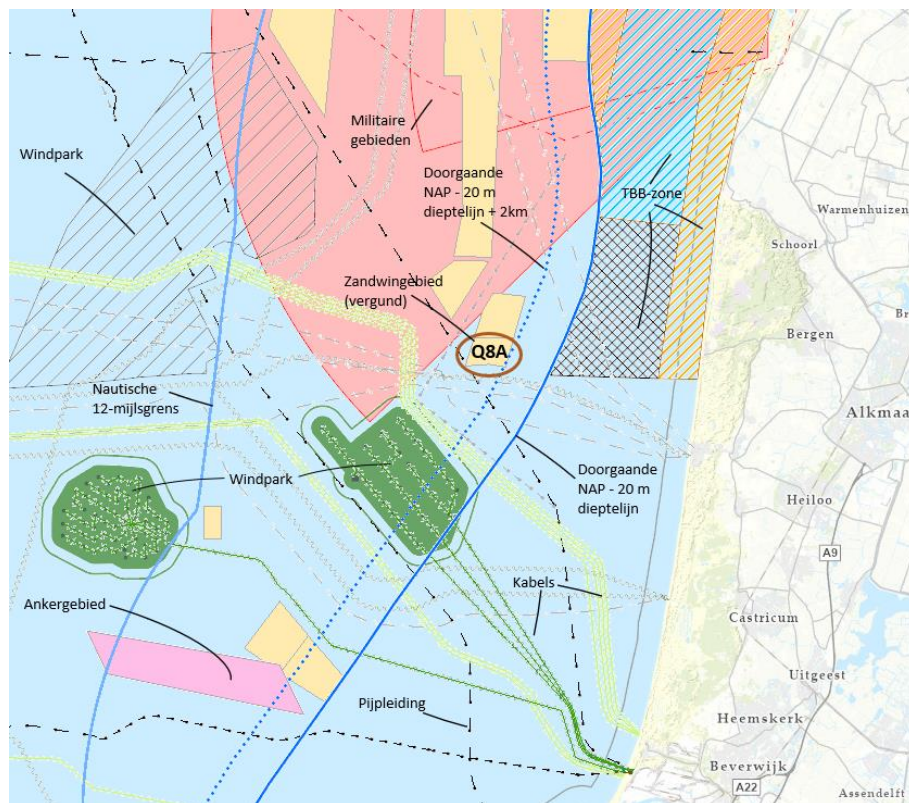
In de volgende paragrafen worden de huidige reguliere uitvoeringsmethoden van het winnen, transporteren en suppleren verder toegelicht.

#### 4.1.1 Winnen

De reguliere manier van winning van zand op de Noordzee voor het uitvoeren van de suppletieconcepten is door middel van het varend zuigen met behulp van een sleepopperzuiger. Hierbij wordt het zand losgemaakt en opgezogen en in het schip opgeslagen. De mate en snelheid waarmee het zand kan worden gewonnen is afhankelijk van o.a. de diepte van het zandwinkvak, de pompcapaciteit van het schip en de korrelgrootte van het zand. Daarnaast zijn weersinvloeden van belang omdat sleepopperzuigers, afhankelijk van de grootte, zand winnen bij golfhoogtes tot maximaal 3 meter.

De zandwinning vindt plaats in een zandwinkvak. Om de zandwinning op de Noordzee in goede banen te leiden is een zandwinstrategie opgesteld om voor de korte en lange termijn voldoende zandvoorraad op zee te reserveren voor kustsuppletie- en ophoogdoeleinden (voor bouw en infrastructuur) tegen aanneembare en redelijke kosten. De uitgangspunten hiervoor zijn: een ecologisch verantwoorde, economisch voordelige, voorraad-technisch slimme, duurzame en ruimtelijk goed afgestemde zandwinning. Voor zandwinning op de Noordzee is een gebied gereserveerd buiten het kustfundament, zeewaarts tussen de doorgaande NAP -20 meter dieptelijn en de 12-mijlsgrens. Grootschalige zandwinning, met windiepten van meer dan 2 meter, is toegestaan vanaf 2 kilometer zeewaarts van de doorgaande NAP -20 meter dieptelijn. Binnen dit gereserveerde gebied worden zoekgebieden aangewezen waarbinnen het zand wordt gewonnen. Voor het uitvoeren van een suppletie wordt, in overleg met de beheerder van de Noordzee, een definitief zandwinkvak vastgesteld.

Zandwinning is één van de gebruiksfuncties die ruimte beslaat over een relatief groot oppervlak. Ondanks dat de Noordzee groot is zijn er gebieden waar zandwinning niet of nauwelijks mogelijk is. Dit zijn gebieden waar rekening moet worden gehouden met andere gebruiksfuncties en overige ruimtelijk relevante aspecten zoals: visserij, scheepvaart, windenergie, kabels en leidingen, archeologie, niet gesprongen explosieven (NGE) en natuur.



Figuur 4-1: Voorbeeld zandwinvak Q8A en ruimtegebruik ter hoogte van Egmond aan Zee (NH).

In Figuur 4-1 is zichtbaar dat een toenemend ruimtebeslag van gebruikers en activiteiten op de Noordzee gevolgen heeft voor de beschikbaarheid van zand. Op dit moment loopt de verstrekte ontgrondingsvergunning met betrekking tot zandwinning in Noordzee van 2018 t/m 31-12-2027 voor het winnen van max. 161 miljoen m<sup>3</sup> zeezand in de aangewezen zandwingsgebieden. Voor de periode daarna is de verwachting dat het in een aantal regio's lastiger wordt om aan de zandbehoefte te voldoen. Als voorbeeld geldt dit voor de regio Egmond waar de ruimte voor zandwinning beperkt wordt door andere gebruikers en er een grote ruimtelijke claim ligt van windenergiegebieden met bijbehorende netaansluiting.

Rekening houdend met het afnemen van het voor zandwinning beschikbare oppervlak van de zeebodem heeft dit na 2027 mogelijk tot gevolg dat een deel van de zandwinning buiten het huidige reserveringsgebied zal gaan plaatsvinden. Door op grotere afstand van de kust zand te winnen zal, naast de vaarafstand, ook de zuigdiepte toenemen. Voor diepe winning zal waar nodig een deel van de vloot moeten worden aangepast. Dit kan bijvoorbeeld door het verlengen van de zuigbuis en het eventueel aanbrengen van een onderwaterpomp. Deze aanpassingen zijn ook van invloed op de kosten.

### 4.1.2 Transport

Een sleephopperzuiger slaat het gewonnen materiaal op in haar eigen beun om het vervolgens naar de suppletielocatie te transporteren. De grootte van een sleephopperzuiger wordt aangeduid met de inhoud van het laadruim en varieert van ongeveer 1.000 m<sup>3</sup> tot meer dan 36.000 m<sup>3</sup> (zie Tabel 4-1).

Type sleepopperzuiger	Laadvermogen
Klein	Variërend tussen 1.000 m <sup>3</sup> en 6.000 m <sup>3</sup>
Middelgroot	Variërend tussen 6.000 m <sup>3</sup> en 16.000 m <sup>3</sup>
Groot	Variërend tussen 16.000 m <sup>3</sup> en 26.000 m <sup>3</sup>
Jumbo	Groter dan 26.000 m <sup>3</sup>

Tabel 4-1: Type sleepopperzuiger en laadvermogen.

Het type sleepopperzuiger dat door de aannemer zal worden ingezet voor het uitvoeren van het werk is afhankelijk van de uit te voeren werkzaamheden, het beschikbaar materieel en de situatie op de suppletielocatie (bijvoorbeeld de waterdiepte). In de regel geldt bij het transporteren van zand dat grotere schepen, bij efficiënt gebruik, minder kosten en milieukosten per m<sup>3</sup> zand hebben. Naarmate de vaarafstand groter wordt zal de efficiëntie van grotere schepen t.o.v. kleinere schepen ook toenemen. Kleinere schepen bieden voordelen op andere vlakken als bijvoorbeeld mindere diepgang t.o.v. grotere schepen. Ook hier zijn weersinvloeden van belang: stormachtige omstandigheden kunnen het (veilig) transporteren beïnvloeden.

Bepalend voor de transportkosten zijn de afstanden van het zandwinkvak tot de suppletielocatie. Zoals in 4.1.1 al aangegeven neemt het voor zandwinning beschikbare oppervlak van de zeebodem af en heeft dit na 2027 mogelijk tot gevolg dat een deel van de zandwinning buiten het huidige reserveringsgebied zal vallen. Figuur 4-1 toont als voorbeeld het vergunde zandwingebed Q8A. Dit wingebed maakt deel uit van de huidig gereserveerde zandwingebeden. In Figuur 4-2 staan verder een drietal mogelijke gebieden voor zandwinning in de toekomst, waarbij rekening is gehouden met bestaand of toekomstig ruimtegebruik en leidt tot een toename in afstand tussen het zandwingebed en de suppletielocatie.



Figuur 4-2: Mogelijke extra gebieden voor zandwinning buiten het huidige reserveringsgebied en de toename in afstand van het zandwingebed tot de suppletielocatie.



Om een voorbeeld te geven van de toename in vaarafstand wordt de afstand tussen het zandwingebied en de kust genomen. De verwachte afstand tussen het zandwingebied en de suppletielocatie wordt dan met betrekking tot:

- het huidige voor zandwinning vergunde gebied Q8A ca. 10 km;
- het 1<sup>e</sup> extra zandwinningsgebied: ca. 29 km;
- het 2<sup>e</sup> extra zandwinningsgebied: ca. 41 km;
- het 3<sup>e</sup> extra zandwinningsgebied: ca. 76 km.

De bovenstaande toename in afstand heeft tot gevolg dat:

- logischerwijs de transport- en milieukosten zullen toenemen met de afstand van het zandwingebied tot de kust.
- Hiermee grotere sleepopperzuigers relatief meer economisch en minder milieubelastend worden t.o.v. hetzelfde volume transporteren met kleinere schepen;
- In het geval er mogelijk zandtransportleidingen beoogd zijn (zie ook par 4.2 met als voorbeelden de 'groene leiding' en 'zandwindmolen') het gebruik hiervan moeilijker overbrugbaar wordt; technisch gezien, maar ook door de toename in eventuele pompvermogens en bijhorende milieukosten;

### 4.1.3 Suppleren

In hoofdlijnen zijn er drie "traditionele" manieren om te suppleren met een sleepopperzuiger:

- 1) Onderlossen** – Bij onderlossen vaart de sleepopperzuiger naar een suppletielocatie vlak voor de kust. Het zand wordt uit het beun gelost door de kleppen/bodemdeuren onder in het schip te openen waarmee het zand uit de beun gaat door de zwaartekracht. Hierbij is de waterdiepte versus de diepgang van het schip dus van belang. Bij een beperkte waterdiepte kunnen kleinere sleepopperzuigers met een kleinere diepgang worden ingezet. Dit is de meest goedkope en duurzame wijze van suppleren, omdat hier geen pompen en/of leidingen nodig zijn.
- 2) Rainbowen** – Bij rainbowen wordt evenzo tot vlak voor de kust gevaren. Door via jetpompen en waterjets onder hoge druk water in het beun te pompen wordt het materiaal in het beun weer "vloeibaar" gemaakt. Het ontstane mengsel (zand en water) wordt uit de beun gepompt en weggespoten naar de suppletielocatie. Deze uitvoeringsmethode wordt vaak toegepast op delen waar het te ondiep is om te onderlossen. Wel kan afhankelijk van de suppletielocatie een grotere sleepopperzuiger worden ingezet daar het schip verder uit de kust blijft en daarmee het transport afneemt, omdat een grotere sleepopperzuiger meer m<sup>3</sup> zand kan meenemen. In het algemeen is deze methode duurder dan onderlossen vanwege de benodigde pompcapaciteit en langere uitvoeringsduur van het suppleren.
- 3) Gebruik van leidingen** – De derde methode is om gebruik te maken van leidingen. Dit wordt vaak toegepast bij een strandsuppletie, waar schepen logischerwijs niet kunnen komen, en het zand op het strand wordt aangebracht. De sleepopperzuiger vaart tot onder de kust waar, met behulp van een koppelvaartuig, een pijpleiding aan de sleepopperzuiger wordt gekoppeld. Hierbij wordt het mengsel (zand en water) uit het beun gepompt en via de pijpleiding op het strand gespoten. Vervolgens wordt het opgebrachte zand met behulp van bulldozers gelijkmatig over het strand verdeeld. Afhankelijk van de productie en het aan te brengen volume moet de pijpleiding verlegd en verlengd worden. Een strandsuppletie is arbeids- en tijdsintensiever dan een onderwatersuppletie. Het gevolg hiervan is hogere (milieu)kosten per aan te brengen m<sup>3</sup> zand.

## 4.2 Innovatieve Uitvoeringsmethoden

Om het zand vanuit de winlocaties duurzaam op de suppletielocatie te krijgen worden, naast het gebruik van verschillende (alternatieve) brandstoffen (zie §4.2.2), ook verschillende (nieuwe) uitvoeringsmethoden onderzocht. Binnen deze inventarisatie wordt er breed gekeken naar de verschillende mogelijkheden binnen de waterbouw. In dit onderzoeksproject nemen we de ontwikkelingen binnen andere trajecten mee. Dit zijn:

- de ontwikkelingen binnen het innovatiepartnerschap traject Innovaties in de Kustlijn zorg (IKZ);

- de ontwikkelingen binnen het Maritiem Masterplan;
- de ontwikkelingen binnen de Zero Emission Dredging Hub (ZEDHub).

Hieronder geven we een beknopte beschrijving van de uitvoeringsmethode die we nader onderzoeken. In bijlage 3 is voor een deel van deze uitvoeringsmethoden een productsheet toegevoegd met extra informatie.

Achtereenvolgens worden beschreven:

- de sleepopperzuiger op bestaande brandstoffen (o.a. MDO, HVO, LNG);
- de “Hopper van de Toekomst” op alternatieve brandstoffen (bijv. waterstof, methanol);
- de Zandwindmolen;
- de Groene (ver)Leiding;
- de Cablehopper;
- de AUMD 2.0;
- Een uitleg over het Technical Readiness Level (TRL) behorende bij de innovatie uitvoeringsmethoden.

### 4.2.1 Sleepopperzuiger (bestaande brandstoffen)

De sleepopperzuiger maakt traditioneel gebruik van Marine Diesel Oil (MDO) als brandstof. Sleephoppers op reguliere brandstoffen worden gemoderniseerd en energiezuiniger gemaakt. De grootste ontwikkeling vindt plaats binnen de motoren die het schip aandrijven. Het principe van de sleepopperzuiger verandert daarmee niet.

Naast het energiezuiniger maken van de motoren wordt er ook gebruik gemaakt van andere brandstoffen. Binnen de huidige kustlijn zorg contracten wordt veelvuldig gebruik gemaakt van biobrandstoffen. Denk aan verschillende blends van Hydrotreated Vegetable Oil (HVO), bijvoorbeeld 50% HVO of 100% HVO. HVO wordt, naast plantaardige oliën, ook geproduceerd uit afval, restoliën en vetten, zoals afgewerkt frituurvet. HVO vermindert de uitstoot van broeikasgassen (CO<sub>2</sub>) tijdens de levenscyclus van de brandstof. Uiteraard zijn er nog meer bestaande (bio)brandstoffen. Om dit onderzoek af te bakken hanteren we alleen veel gebruikte brandstoffen.

Het gebruik van andere typen brandstof leidt tot minder emissies ten opzichte van diesel als brandstof. Nabehandeling van emissies wordt ook toegepast, denk hierbij aan Selective Catalytic Reduction waarbij het inspuiten van een ureum-water oplossing stikstof bindt en de inzet van roetfilters om fijnstof af te vangen. Op een aantal sleepopperzuigers wordt momenteel LNG gebruikt als brandstof.

### 4.2.2 Hopper van de Toekomst

Richting 2030 gaan alternatieve brandstoffen zoals groene methanol, LNG en waterstof een grotere rol spelen naast de traditionele brandstoffen zoals MDO, HVO en LNG. Er zijn binnen de scheepvaart samenvattend drie probleempunten aan te wijzen voor verduurzaming met deze alternatieve brandstoffen, namelijk:

- 1) Energiedichtheid** – De energiedichtheid van alternatieve brandstoffen is een probleempunt waar oplossingen voor nodig zijn. Zo heeft de elektrificatie van de sleepopperzuigers zoveel invloed op de laadcapaciteit van de schepen dat dit (nog) niet gezien wordt als een haalbare oplossing voor duurzaam kustonderhoud.
- 2) Infrastructuur** – Andere brandstoffen vraagt ook om een andere infrastructuur. Om bijvoorbeeld waterstof te produceren, te transporteren en te kunnen tanken zijn (nieuwe) voorzieningen nodig.
- 3) Geschikte motoren** – Alternatieve brandstoffen zijn niet altijd geschikt voor de huidige motoren van de schepen. Daarvoor dienen de motoren geschikt gemaakt te worden of moeten deze motoren nog worden ontwikkeld.

Bovenstaande probleempunten brengen grote investeringen met zich mee waardoor een omslag niet direct is te maken. Bij bestaande schepen kan het nog jaren duren voor ze aan het einde van hun levensduur zijn en op deze

schepen wordt nog jaarlijks afgeschreven. Daarbij vinden ontwikkelingen en investeringen stap voor stap plaats, waarmee het verduurzamen en vervangen van schepen plaatsvindt in een tijdsplan van enkele (tientallen) jaren.

Vanuit verschillende trajecten wordt er momenteel gewerkt om deze probleempunten aan te pakken en de scheepvaart te verduurzamen, zoals het Maritiem Masterplan. De baggersector is maar een fractie van de gehele scheepvaart en kan meeliften op de successen uit de gehele sector. Vanuit de Zero Emissions Dredging Hub (ZEDHub) wordt er, door een consortium van scheepsbouwers en baggeraars, specifiek verduurzaming toegespit op de baggersector. Binnen dit onderzoekstraject wordt er gekeken wat er nodig is om emissie vrij baggeren technisch en economisch mogelijk te maken voor 2030. Voor de onderbouwing van de “Hopper van de Toekomst” wordt er gebruikt gemaakt van de kennis van de ZEDHub.

Er zit een globaal onderscheid in onderzoek naar verduurzaming van productieroutes van brandstoffen en verduurzaming in de toepassing van grijze varianten van deze duurzame brandstoffen in motoren van baggerschepen. Grijze variatie van waterstof, methanol, LNG en ammoniak, die zijn geproduceerd met behulp van fossiele brandstoffen, zijn immers chemisch hetzelfde als hun groene of blauwe varianten en grijze en “groenere” varianten zijn daarmee logischerwijs verwisselbaar. Dit onderzoek betreft alleen de toepassing van deze brandstoffen in baggerschepen. Hieronder volgt een korte beschrijving van alternatieve brandstoffen in onderzoek:

### **Waterstof**

Waterstof wordt wereldwijd en door allerlei industrieën gezien als brandstof van de toekomst (Qureshi, et al., 2022). Waterstof stoot geen CO<sub>2</sub> uit tijdens gebruik en heeft daarmee een positieve impact op de emissiereductie. De productieroute van waterstof daarentegen vraagt momenteel nog erg veel energie. Gezien de wereldwijde en cross-sectorale interesse en ontwikkeling is de verwachting dat beschikbaarheid, infrastructuur en prijs zich tegen 2030 positief ontwikkeld zullen hebben. Waterstof is een aantrekkelijke brandstof vanuit emissie perspectief, maar heeft een zeer lage energiedichtheid per volume-eenheid. Dit blijft een nadeel voor de kustlijn zorg. Er dus meer waterstof verbrand worden om dezelfde energieopbrengst te krijgen. Dat betekent voor een schip vaker bunkeren of meer meenemen.

### **Methanol**

De eerste generatie schepen die aangedreven kunnen worden op methanol zijn al beschikbaar. Methanol heeft een lage energiedichtheid, wordt voor industrieel gebruik op grote schaal geproduceerd, en de verwachtingen zijn dat het komende jaren op grotere schaal beschikbaar komt voor gebruik als scheepsbrandstof. De combinatie van Methanol en de energievraag van baggermotoren wordt de komende jaren verder onderzocht.

De productieroute van methanol en de daarvoor benodigde hoeveelheid energie is een belangrijk onderdeel in de emissie uitstoot van de levenscyclus van deze brandstof. De verwachting is dat in de komende jaren de stap van grijze methanol naar groene methanol plaats zal vinden.

### **Bio LNG en Ammoniak**

Bio LNG is relatief makkelijk te produceren en het netwerk voor LNG is grotendeels aanwezig. Bio LNG kan de volgende stap zijn om LNG te vervangen. Ammoniak wordt pas gezien als interessant na 2030. LNG (Liquefied Natural Gas) biedt perspectieven voor grotere zeeschepen, maar is minder toepasbaar voor kleinere schepen, vanwege het ruimtebeslag aan boord en de hoge investeringskosten.

Zoals hierboven blijkt heeft elke variant brandstof zijn eigen voor- en nadelen. Er spelen dus nogal wat factoren mee, die uiteindelijk de keuze voor een soort brandstof bepalen. Omdat schepen zomaar 30 jaar meegaan, moet de keuze voor een brandstof en bijbehorend aandrijfsysteem van een nieuw te bouwen schip ook voor de toekomst de juiste zijn. Ontwikkelingen zijn echter niet ver genoeg gevorderd om een dergelijke keuze met voldoende zekerheid te kunnen maken.

### 4.2.3 Zandwindmolen

Een van de eerste initiatieven die binnen het IKZ traject naar buiten is getreden is de Zandwindmolen. In dit idee wordt windenergie gekoppeld aan een statische opstelling waarmee het zand van de diepere gebieden (-20m NAP) naar de kust kan worden getransporteerd.

Een vaste buis met een lengte tussen de 8 en 12 km voorzien van meerdere pompstations zorgt voor het transport van het zand. De energievoorziening van de pompen komt van een windmolen of van een aansluiting op het land. Momenteel voorziet dit systeem enkel in het transport van zand uit diepere gebieden naar de kust, niet in het winnen van zand op de winlocatie. Een combinatie met andere uitvoeringsmethode is nodig om de eerste pomp van het systeem blijvend te voorzien van voldoende materiaal om te verpompen.

Door de inzet van verschillende pompstations over een lengte tot 12 km is er een aanzienlijke stroomvoorziening nodig in de orde grootte van 12,5 MWh. Hiervoor wordt een deel geleverd door windmolens op de installatie en een groter deel vanuit groene stroom vanaf het land. Daarnaast is er een terugtrekkende lijn in winlocaties waarvan zand kan worden gewonnen, zo moet de vaste buis over een langere afstand werken met meer pompsystemen en dus een grotere vermogensvraag. Aandachtspunt bij het gebruik van leidingen is het onderhoud om het verzanden van de leiding te voorkomen.

### 4.2.4 Groene (ver)Leiding

Het concept van de Groene (ver)Leiding bestaat uit een onbemande, afzinkbare zuigpomp gecombineerd met een "swirl flow" leiding. De "swirl flow" wordt bewerkstelligd door vinnen in de leiding. Hierdoor blijven de zandkorrels in suspensie bij lagere mengselsnelheden, waardoor de benodigde energie wordt verlaagd en de slijtage aan de leiding uniform over de gehele leiding is. Deze semi-stationaire oplossing is relatief makkelijker van duurzame energie te voorzien dan varend materieel. De pompstations worden vanaf het land gevoed door een kabel met groene stroom. Meerdere pompinstallaties langs het tracé zijn benodigd om het zand-watermengsel aan land te brengen. Aandachtspunt bij het gebruik van leidingen is het onderhoud om het verzanden van de leiding te voorkomen.

In het verleden is een vergelijkbaar principe toegepast bij diverse zandsuppleties. Deze onbemande zandzuiger, de zogenaamde "Punaise", is echter verder niet grootschalig gebruikt door tegengestelde belangen in patenten tussen producent en gebruikers.

### 4.2.5 Cablehopper

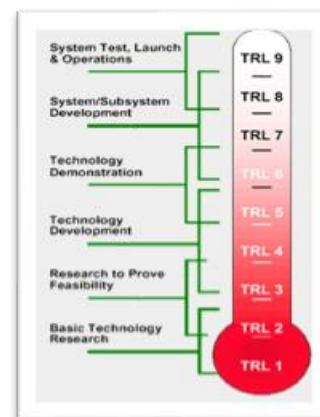
De Cablehopper is een onbemande sleephopperzuiger die zich door middel van een lier op het ponton voortbeweegt langs een draad. De draad is verankerd tussen het wingebied (-20m NAP) en dumplocatie (-5m NAP). De draad is stationair en ligt het grootste deel van de tijd stil op de bodem. Bij het langsvaren wordt de draad van de bodem getild, via de lier geleid en terug naar de bodem gebracht. De totale energievraag is zeer beperkt door deze directe mechanische kabelvoortstuwing in combinatie met een lage voortgangssnelheid. Aandachtspunten bij deze methode zijn het verplaatsen van het anker in het geval een andere suppletielocatie nodig is en de invloed van stroming en weer op de lier, ankers en de cablehopper.

### 4.2.6 AUMD 2.0

De Autonomous Underwater Maintenance Dredger (AUMD) is een sleephopperzuiger die autonoom en onder water kan suppleren, met als voordeel dat er minder weerstand op het schip en de baggerpomp staat. Het is een volledig elektrisch aangedreven sleephopperzuiger die zich onder water voortbeweegt. Dat betekent wel dat hierbij extra rekening moet worden gehouden met de diepgang en de aanlegdiepte van de suppletie.

### 4.2.7 TRL-niveaus

De bovenstaande uitvoeringsmethoden zijn niet allemaal bewezen technieken en bevinden zich niet op hetzelfde niveau in technologische ontwikkeling. De door NASA ontwikkelde methode van Technical Readiness Level (TRL) bepaalt de volwassenheid van een technologie. TRL maakt gebruik van negen verschillende niveaus die de fase van ontwikkeling weergeven, dit maakt het mogelijk om verschillende type technologieën met elkaar te vergelijken (zie Figuur 4-3). In Tabel 4-2 is het TRL-niveau voor elke uitvoeringsmethode verder toegelicht.



Figuur 4-3 – TRL Niveau's

Uitvoeringsmethode	TRL-niveau	Redenering
Sleephopperzuiger (MDO)	9	Vrijwel alle zandsuppleties worden momenteel uitgevoerd door de sleephopperzuiger met Marine Diesel Olie.
Sleephopperzuiger (Groene brandstof)	9	In West-Europa wordt biobrandstof op basis van Hydrotreated Vegetable Oil veelvuldig toegepast om de milieu impact te verkleinen.
Hopper van de Toekomst	6/4	Het toepassen van Waterstof/Methanol voor het vaarbedrijf van een schip wordt op kleine schaal al toegepast. Het toepassen van de brandstoffen van de toekomst op het baggerbedrijf wordt momenteel enkel getest op prototype schaal.
AUMD 2.0	2	Afzonderlijk zijn de technieken getest onder operationele omstandigheden maar het concept van een onderwater hopperzuiger is enkel geformuleerd. Binnen het IKZ traject is de uitvoeringsmethode niet verder ontwikkeld.
Cablehopper	4	Afzonderlijk zijn de technieken getest onder operationele omstandigheden maar het concept van een autonome hopper is enkel geformuleerd. Omdat de uitvoeringsmethode binnen het IKZ traject wel verder wordt ontwikkeld, wordt de uitvoeringsmethode wel meegenomen in de resultaten.
Groene Leiding	3	Op kleinere lengte/schaal is het uitvoeringsconcept van transport van zand/water door een leiding een beproeft concept. Echter de extreme transportafstand en het stationaire karakter bevindt zich nog in experimentele fase.
Zandwindmolen	3	Op kleinere lengte/schaal is het uitvoeringsconcept van transport van zand/water door een leiding een beproeft concept. Echter de extreme transportafstand en het stationaire karakter bevindt zich nog in experimentele fase.

Tabel 4-2: TRL-uitvoeringsmethode.

## 5 Combinaties van uitvoeringsmethoden en suppletieconcepten

In dit hoofdstuk wordt dieper ingegaan op de combinatie tussen suppletieconcepten uit H3 en mogelijke uitvoeringsmethoden uit H4. Er wordt uitgezocht welke suppletieconcepten met welke uitvoeringsmethode kunnen worden uitgevoerd (§5.25.1). Op basis van enkele uitgangspunten (§5.2) is vervolgens op basis van expert judgement gekeken welke impact de mogelijke combinaties hebben op zowel kosten als MKI (§5.3). Doel hiervan is om het onderzoek te trechteren naar combinaties die realistisch, haalbaar en kansrijk worden geacht. Hoe dit is getrechterd is beschreven in §5.4.

### 5.1 Mogelijke combinaties

Op basis van de kenmerken van de uitvoeringsmethoden zijn logische combinaties met de onderhoudsconcepten gemaakt. In de tabel hieronder is een overzicht gegeven van deze logische combinaties. Zo zijn bijvoorbeeld de continue suppleties gekoppeld aan de statische varianten (Cablehopper, Groene (ver)leiding en zandwindmolen. Dat betekent niet dat continue suppleties niet kunnen worden uitgevoerd door sleephoppers. Voor de megasuppleties zijn de hoppervarianten het meest logische vanwege de productiecapaciteit in relatie tot de te leveren volumes bij een megasuppletie. A, B en C betekenen het volgende: A = toepasbaar, technisch haalbaar B = beperkt toepasbaar, technisch haalbaar, C = niet toepasbaar, technisch niet haalbaar.

	Suppletie	Uitvoeringsmethode (inzet toepasbaar/haalbaar)						
	Variant	Sleephopper (MDO)	Sleephopper (Biobrandstof)	Sleephopper (Hopper van de toekomst)	AUMD2.0	Cablehopper	Groene Leiding	Zandwindmolen
<b>Onderhoudssuppletie</b>	Strandsuppletie	A	A	A	C	C		
	Vooroeversuppletie	A	A	A	B Diepgang	B Anker verplaatsen		
	Geulwand	A	A	A	C	C		
	Buitendelta	A	A	A	C	C		
<b>Mega-suppletie</b>	Strand (zandmotor)	A	A	A				
	Vooroever (onderwater)	A	A	A				
	Vooroever (eiland)	A	A	A				
	Buitendelta	A	A	A				
<b>Continue suppletie</b>	Strand puntsuppletie						A	A
	Vooroever					A	A	A
	Zeegat						B Navigatie	B Navigatie
	Bypass						A	A

Tabel 5-1: Toepasbaarheid uitvoeringsmethode.

### Onderhoudssuppleties

Alleen voor de varianten met de sleepopperzuiger zijn alle onderhoudssuppleties toepasbaar en technisch haalbaar. Wanneer de suppletievariant hogere vermogens vraagt om het zand op het strand te persen (over langere afstanden persen) is de techniek bij alternatieve brandstoffen momenteel nog niet vergenog ontwikkeld om deze vermogens te behalen. Bij alternatieve brandstoffen moet er onderzocht worden of de gevraagde piekvermogens haalbaar zijn of op een andere manier kunnen worden ondervangen.

De AUMD 2.0 en Cablehopper hebben enkel de mogelijkheid om zand te dumpen onder het vlak van het schip. Vanwege de manoeuvreerbaarheid van de AUMD 2.0 en de Cablehopper is niet op voorhand te zeggen of de uitvoeringsmethode altijd toepasbaar is voor de onderwatervarianten. Meest voor de hand liggend bij deze twee uitvoeringsmethoden is de vooroeversuppletie. Voor de AUMD 2.0 dient per locatie de benodigde diepgang te worden beschouwd. Voor de Cablehopper is het verplaatsen van het anker en de impact op scheepvaart van belang.

### *Megasuppleties*

Bij megasuppletie varianten wordt als uitgangspunt genomen dat er een groot volume aan zand in beperkte tijd moet worden verplaatst en gedeponereerd volgens een vooraf bepaald ontwerp. Om dit ontwerp te realiseren is een uitvoeringsmethode nodig die grote hoeveelheden kan winnen en lossen in beperkte tijd. Deze aspecten maakt dat de megasuppleties enkel met sleepopper varianten kan worden gecombineerd. Voor het gebruik van alternatieve brandstoffen als methanol, ammoniak en waterstof speelt ook hier de doorontwikkeling bij het leveren van de persvermogens.

### *Continue suppleties*

Afhankelijk van de suppletielocatie is het voor alle uitvoeringsmethoden technisch haalbaar om een continue suppletie uit te voeren. Dit onderhoudsconcept lijkt echter het meest geschikt om de meer statische uitvoeringsmethoden toe te passen. Uitzondering hierop zijn de continue suppleties rondom nauwkeurige dumplocaties zoals bij een zeegat. De beperkte manoeuvreerbaarheid en impact op de scheepvaart beperkt hier de inzet van statische uitvoeringsmethoden.

## **5.2 Uitgangspunten afweging combinaties**

Voor de combinaties die A = toepasbaar, technisch haalbaar en B = beperkt toepasbaar is een inschatting gemaakt van de kosten en de milieukostenindicator (MKI). Hieronder volgt welke uitgangspunten hierbij zijn gehanteerd.

### **5.2.1 Uitvoeringswijze en -kosten**

Voor de gestelde logische combinaties is een inschatting van de kosten gemaakt. Deze inschatting geeft een eerste inzicht in de verhoudingen qua kosten tussen de verschillende onderhoudsconcepten en onderhoudsmethoden.

### *Baseline sleepopperzuiger*

Als baseline is de uitvoeringsmethode met de branchegemiddelde sleepopperzuiger (de SHZ Strandway) met brandstof Marine Diesel Oil (MDO) gebruikt. Meer informatie over dit schip is te vinden in bijlage 4 'Equipment sheet Strandway'.

### *Sleepopperzuiger biobrandstof*

Dit betreft dezelfde sleepopperzuiger alleen dan aangedreven op biobrandstof (100% HVO).

### *Hopper van de Toekomst*

De "Hopper van de Toekomst" is feitelijk een sleepopper met een aandrijving op een andere brandstof (bijvoorbeeld methanol of waterstof) in plaats van op MDO. Daarom is aangenomen dat de kostencomponenten van de "Hopper van de Toekomst" in de gebruiksfase gelijk zijn aan die van de branchegemiddelde sleepopperzuiger (de SHZ Strandway). Het verschil in de kosten tijdens de gebruiksfase wordt alleen bepaald door

een andere brandstof en komt dus tot uitdrukking in het verschil in brandstofverbruik en -kosten. Het gebruik van een (duurzame) andere brandstof heeft een positieve impact op de MKI.

### *Overige uitvoeringsmethoden (Groene leiding, Zandwindmolen, Cablehopper en AUMD 2.0)*

Voor de overige uitvoeringsmethoden (innovaties) zijn de opgegeven kosten per m<sup>3</sup> van de IKZ initiatiefnemers gebruikt (zie bijlage 3 productsheets). Op basis hiervan is voor de suppletieconcepten een inschatting gemaakt van de kosten ten opzichte van de baseline.

#### **5.2.2 Milieukosten**

Een inschatting van de milieukosten (MKI) is gemaakt voor de gestelde logische combinaties (zie § 5.1). Hieronder zijn de gehanteerde uitgangspunten per uitvoeringsmethode beschreven.

#### *Sleehopper*

De MKI van de sleehopperzuiger gaat uit van de brandstof MDO (100%).

#### *Sleehopper biobrandstof*

De MKI van de sleehopperzuiger op biobrandstof gaat uit van 100% HVO.

#### *Hopper van de Toekomst*

Als uitgangspunt hanteren we waterstof als brandstof voor de “Hopper van de Toekomst”. Hierbij gaan we uit van waterstof dat is geproduceerd op basis van groene stroom. Met groene stroom wordt bedoeld dat het productieproces van de stroom plaatsvindt op basis van 100% natuurlijk bronnen zoals zon- en/of windenergie.

#### *Zandwindmolen*

Als uitgangspunt is gekozen dat er 5 pompen benodigd zijn om het zand door de leiding te pompen met dezelfde energiebehoefte als de baggerpompen op een sleehopperzuiger. Een baggerpomp aan boord van een sleehopperzuiger is 2500 kW en heeft een energiebehoefte van 12,5 MW. Als uitgangspunt geldt dat alle elektriciteit wordt opgewekt met groene stroom (van de windmolens). De Zandwindmolen is een stationair systeem (24 uur per dag en 7 dagen per week operationeel). Verder geldt als uitgangspunt dat er geen rekening is gehouden met de energiebehoefte van eventuele hulpwerktuigen.

#### *Groene Leiding*

Er zijn nog veel onduidelijkheden omtrent de benodigde energievoorziening van de groene leiding. Als uitgangspunt voor dit onderzoek is daarom gekozen dat de energievraag gelijk is als de Zandwindmolen.

#### *Cablehopper*

De initiatiefnemers van de cablehopper heeft zelf een MKI-berekening uitgevoerd in de productsheet (zie bijlage 3) Deze waarde van 0,071 MKI/m<sup>3</sup> is aangehouden als uitgangspunt.

#### *AUMD 2.0*

Voor de AUMD 2.0 is op basis van de productsheet (zie bijlage 3) uitgegaan van 50% vermogen van de branche gemiddelde sleehopperzuiger, met een full electric (groene) accu en vergelijkbare producties als de sleehopperzuiger. De AUMD 2.0 werkt op 80% van zijn totale vermogen, waarbij gerekend is met groene stroom.

### **5.3 Expert Judgement Analyse: Impact combinaties**

In een brainstormsessie met specialisten vanuit het uitvoeringsproces is op basis van ‘expert judgement’ de impact op kosten en MKI bepaald voor de combinaties (suppletievarianten en uitvoeringswijze) uit §5.1. In onderstaande tabel hebben we de uitkomsten van deze sessie samengevat. De baseline-situatie is het uitvoeren van een onderhoudssuppletie op de voorover door een sleehopper op MDO. Een ‘0’ betekent dat de kosten/MKI geen



grote verschillen kent met deze baseline-situatie. Een “-” betekent dat de kosten/MKI negatief zijn ten opzichte van de baseline (ofwel de kosten/MKI hoger wordt). Een “+” betekent dat de kosten/MKI positief zijn ten opzichte van de baseline (ofwel de kosten/MKI lager wordt). Een ‘-/-’ of ‘+/+’ laat zien dat de negatieve danwel positieve effecten op kosten/MKI ten opzichte van de baseline nog sterker zijn dan de ‘-’ of ‘+’.

	Suppletie	Uitvoeringsmethode (inzet toepasbaar/haalbaar)													
		Variant		Sleephopper (MDO)		Sleephopper (Biobrandstof)		Sleephopper (Hopper van de toekomst)		AUMD2.0		Cablehopper		Groene Leiding	
		€	MKI	€	MKI	€	MKI	€	MKI	€	MKI	€	MKI	€	MKI
<b>Onderhoudssuppletie</b>	Strand	-	-	-	+	-/-	+								
	Vooroever	0	0	0	+	0	+/+	0	+/+	-	+/+				
	Geulwand	0	0	0	+	0	+/+								
	Buitendelta	0	0	0	+	0	+/+								
<b>Megasuppletie</b>	Strand (zandmotor)	-	-	-	+	-	+								
	Vooroever (onderwater)	0	0	0	+	0	+/+								
	Vooroever (eiland)	-	-	-	+	-	+								
	Buitendelta	0	0	0	+	0	+/+								
<b>Continue suppletie</b>	Strand puntsuppletie											-/-	+	-/-	+
	Vooroever									0	+/+	-	+/+	-	+/+
	Zeegat											-/-	+	-/-	+
	Bypass											-	+/+	-	+/+

Tabel 5-2: Resultaten combinaties.

### Onderhoudssuppleties

Bij de onderhoudssuppleties is te zien dat er qua kosten in de gebruiksfase niet veel verschil zit tussen de sleephopper op MDO, de hopper op biobrandstof en de hopper van de toekomst, maar dat de hopper op biobrandstof en de hopper van de toekomst op milieukosten wel positiever scoren aangezien hier duurzamere brandstoffen worden toegepast met o.a. minder CO<sub>2</sub> uitstoot.

De Cablehopper heeft hogere kosten ten opzichte van de sleephopperzuiger. Dit wordt veroorzaakt door de langere uitvoeringstijd en de geringe werkbaarheid richting de winterperiode. De AUMD 2.0 is qua kosten ongeveer gelijk aan de sleephopperzuiger, met als aandachtspunt de benodigde diepgang die nodig is voor de AUMD 2.0. De Cablehopper en AUMD 2.0 zijn beide positief op milieukosten ten opzichte van het gebruik van de sleephopperzuiger.

### Megasuppleties

Bij de megasuppleties is te zien dat er qua kosten niet veel verschil zit tussen de sleephopper en de hopper van de toekomst, maar dat de hopper van de toekomst op milieukosten wel positiever scoort aangezien hier duurzamere brandstoffen worden toegepast met o.a. minder CO<sub>2</sub> uitstoot.

### *Continue suppleties*

Bij de continue suppleties is de conclusie dat de statische uitvoeringsmethoden qua kosten hoger uitvallen dan het gebruik van sleephoppers met leidingen. De oorzaak hiervan is dat voor de Groene (ver)Leiding en zandwindmolen ook pompen (met hoge vermogens) benodigd zijn om het zand op te pompen. Op milieukosten scoren deze echter wel beter, omdat hierbij uit is gegaan van het gebruik van groen opgewekte stroom.

## 5.4 Trechtering

In de volgende hoofdstukken van dit rapport worden een aantal kansrijke suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden op een verdiepende kwantitatieve wijze uitgewerkt. De keuze voor de door te rekenen combinaties is de uitkomst van een trechtering gemaakt op basis van de volgende factoren: de kansrijke suppletieconcepten vanuit Werkpakket 2, de expert judgement analyse uit §5.3 en het Technology Readiness Level (TRL) van de uitvoeringsmethoden.

### 5.4.1 Kansrijke suppletieconcepten

In de volgende fase van het DCC-onderzoek is er op basis van drie factoren een trechtering gemaakt en een aantal punten verder doorgerekend:

- 1) Kansrijke suppletieconcepten** – De eerste factor betreft de kansrijke suppletieconcepten. Vanuit Werkpakket 2 (zie rapport WP2) zijn een aantal kansrijke suppletieconcepten doorgerekend en hieruit is de keuze gemaakt om een drietal vormen van megasuppleties (een schiereiland, een eiland en een onderwater suppletie) en één continue suppletie (1,6 miljoen m<sup>3</sup> op Texel) verder uit te werken.
- 2) Technical Readiness Level (TRL)** – Voor de verdiepende kwantitatieve uitwerking in kosten en MKI is er een selectie gemaakt op basis het Technical Readiness Level (TRL). Sommige innovatieve uitvoeringsmethoden zijn nog in ontwikkeling en daarmee is de informatie van de uitvoeringsmethoden ook niet op hetzelfde detailniveau beschikbaar. Dat betekent dat er ook onvoldoende informatie (producties, kosten, milieu-impact) voorhanden is om een verdiepende kwantitatieve onderbouwing te geven. Daarom worden in dit onderzoek enkel uitvoeringsmethoden met een TRL van 4 of hoger verder kwantitatief onderbouwd met een som op kosten en MKI. De overgebleven uitvoeringsmethode zijn dan de varianten op de sleepopperzuiger en de Cablehopper.
- 3) Expert Judgement Analyse §5.3** – Op basis van de expert judgement analyse uit §5.3 blijkt ook dat niet alle uitvoeringsmethode logisch en toepasbaar zijn op de verschillende suppletieconcepten. De kansrijke megasuppleties zijn logisch en toepasbaar met de varianten op de sleepopperzuiger. De continue suppletie kan worden uitgevoerd met de Cablehopper.

## 6 Methodisch kader

In de vorige hoofdstukken is beschreven welke suppletieconcepten (H3) en uitvoeringsmethoden (H4) er zijn en hoe deze zijn te combineren (H5). Hieruit is een trechtering gekomen (§5.4). De combinaties uit deze trechtering onderzoeken we verder op twee factoren, namelijk;

- 1) de kosten en;
- 2) de impact op duurzaamheid (in MKI).

In dit hoofdstuk wordt de methodische aanpak om te komen tot zowel de kosten als de MKI toegelicht. Eerst wordt in §6.1 beschreven welke uitgangspunten gehanteerd worden omtrent de uitvoering wat geldt als basis voor de kosten en MKI. In §6.2 wordt verder ingegaan op de gehanteerde bouwstenen (uitgangspunten) om te komen tot een kostenindicatie. In §6.3 wordt hetzelfde gedaan voor de MKI.

### 6.1 Methodisch Kader Uitvoering

Bij het uitvoeren van een zandsuppletie zijn de belangrijkste factoren in het algemeen verbonden aan het winnen, transporteren of verwerken van een bepaalde hoeveelheid zand.

Voordat een raming wordt gemaakt van de (milieu)kosten, worden alle relevante gegevens bestudeerd, zodat een indruk kan worden verkregen welke uitvoeringsmethode het meest doelmatig lijkt. Een belangrijk aspect hierbij is de keuze van het materieel dat geschikt is voor het werk, waarbij de bouwstenen uit §6.1.1 van belang zijn om te komen tot de juiste keuze. Aan de hand van het beschikbare materieel wordt de meest efficiënte productieketen vastgesteld en de (milieu)kosten geraamd.

#### 6.1.1 Bouwstenen (milieu)kostenindicatie

In de uitvoeringsmethoden van alle suppletieconcepten zijn een aantal steeds terugkerende bouwstenen essentieel bij het berekenen van de kosten. In Tabel 6-1 worden de uitgangspunten per bouwsteen toegelicht. Daarnaast houden we ook de volgende drie algemene uitgangspunten aan:

- 1) De prijzen (inclusief brandstofprijzen) zijn een momentopname en kunnen door marktomstandigheden variëren. Voor dit onderzoek is als uitgangspunt het prijspeil van januari 2021 genomen.
- 2) Er zijn geen beperkende omstandigheden als gevolg van Flora & Fauna voorzien, daarom is dit buiten beschouwing gelaten.
- 3) In dit onderzoek is als uitgangspunt uitgegaan van een suppletielocatie voor de kust van Egmond aan Zee. Elke locatie heeft eigen kenmerken, dus moet hierbij gezegd worden dat de kosten en MKI door omstandigheden op locatie anders kunnen uitvallen.

Bouwsteen	Toelichting
1. De geometrie van het suppletieconcept	- suppleren onder of boven water - hoeveelheid zand te suppleren (m <sup>3</sup> in profiel) - aanleghoogte (+/- m NAP)
2. De zandwinlocatie/ -vak	- zandwinvak Q8A - gemiddelde korrelgrootte D50: 250 m - maximale winddiepte t.o.v. bodem: 4 m - maximale winddiepte: -25,0 m NAP - vaarafstand naar suppletielocatie: 10 km - het zandwinvak is vrij van objecten (archeologie, K&L, vermoedelijke NGE)
3. Het in te zetten materieel	- sleepopperzuiger (SHZ) type Klein/Groot - SHZ beuninhoud type Klein: ca. 4.500 m <sup>3</sup>

Bouwsteen	Toelichting
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- SHZ beuninhoud type Groot: ca. 16.100 m<sup>3</sup></li> <li>- persleidingen (land/drijvend/zinker)</li> <li>- koppelboot (koppelen drijvende leiding)</li> <li>- boot voor transport bemanning/peilen</li> <li>- stortmaterieel (o.a. bulldozer, shovel, kraan)</li> </ul>
4. De productie voor zowel winnen als verwerken	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cyclustijd (winnen, varen vol en leeg, dumpen, rainbowen, opspuiten)</li> <li>- operationele uren per week (inclusief 15% weersverlet) is 127,5 uur</li> <li>- in profiel (= in-situ) m<sup>3</sup> naar beun m<sup>3</sup> = x 1,15</li> <li>- productie per week (m<sup>3</sup> in profiel)</li> <li>- uitvoeringsduur in (sleehopper)weken</li> </ul>
5. Het brandstofverbruik en type brandstof	<ul style="list-style-type: none"> <li>- brandstofverbruik SHZ in liters per operationeel uur</li> <li>- type brandstof SHZ: MDO, mix MDO en HVO, HVO, GTL, LNG, Bio-LNG en een alternatieve brandstof (zijnde een samengevoegde inschatting van methanol en waterstof)</li> <li>- type brandstof stort (strand) en hulpmaterieel: MDO/diesel</li> </ul>
6. Mobilisatie en demobilisatie van materieel (aanvoer, inrichten, opruimen, afvoer)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sleehopperzuigers</li> <li>- persleidingen (land/drijvend/zinker)</li> <li>- koppelboot (koppelen drijvende leiding) (MDO)</li> <li>- boot voor transport bemanning/peilen (MDO)</li> <li>- stortmaterieel als bulldozers, shovels, kranen (MDO)</li> </ul>
7. Milieueffecten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- milieukosten indicator (MKI): CO<sub>2</sub>-103</li> <li>- uitgedrukt in: kg CO<sub>2</sub> equivalent</li> </ul>
8. De directe kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- zijn gebaseerd op de exploitatie van het materieel en op het productieproces en zijn als gevolg daarvan variabel</li> <li>- SHZ: alle operationele kosten</li> <li>- SHZ op LNG: een "sustainability factor" toegepast van 10% op de CIRIA waarde</li> <li>- SHZ op alternatieve brandstof: voor de berekening van de exploitatiekosten is de CIRIA waarde verhoogd met 15% dat gebaseerd is op de extra investerings- en exploitatiekosten. Dit is gebaseerd op het rapport "Green Marine Methanol" van TNO uit 2021 (Harmsen, 2021) (Boskalis case – SHZ Willem van Oranje)</li> <li>- overig materieel: persleidingen, stort (strand) materieel en personeel</li> <li>- overig: survey (peilen/landmeten)</li> </ul>
9. De indirecte kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hebben een vast karakter, zijn niet rechtstreeks verbonden aan de duur van de werkzaamheden</li> <li>- kosten: Eenmalig (bijv. mobilisatie- en demobilisatie, personeelskosten, etc.), Uitvoering, Algemeen (hoofdkantoor), Winst en Risico</li> <li>- uitvoeringskosten: 3 % van de directe- en eenmalige kosten</li> <li>- onvoorziene kosten: 5% van de directe-, eenmalige- en uitvoeringskosten</li> <li>- geen ontwerp- en engineeringkosten opgenomen</li> </ul>

Bouwsteen	Toelichting
	- opslagen AK, W&R is 19 % gerekend over alle kosten
10. Kostprijs (Totale indicatieve kosten per eenheid)	- EUR totaal hoeveelheid m <sup>3</sup> in profiel - EUR per m <sup>3</sup> in profiel - genoemde kosten zijn exclusief B.T.W. - rekening houdend met een bandbreedte van +/- 20% op de kosten - uitgangspunt kosten: prijspeil januari 2021
11. Milieukosten (Totale indicatieve milieukosten (MKI) per eenheid)	- EUR per m <sup>3</sup> in profiel - MKI = CO <sub>2</sub> -103 - MKI uitgaande van: TNO-rapport 2016 - met LNG wordt bedoeld: 78% LNG en 22% MDO

Tabel 6-1: Bouwstenen (milieu)kostenindicatie.

## 6.2 Methodisch Kader Kosten

Bij het inschatten van de kosten wordt rekening gehouden met de bouwstenen uit §6.1.1. Deze bouwstenen zijn ook te vinden in Bijlage 1 Kostenindicatie Megasuppletie Sleephopperzuiger (traditioneel). Onderstaand worden een aantal belangrijke bouwstenen uit Tabel 6-1 uitgebreider toegelicht.

### 6.2.1 Scheepsgrootte (bouwsteen nr. 3)

De grootte van de schepen die ingezet kunnen worden, hangt onder meer af van de wijze van suppleren (zie §4.1.3). De omvang van een werk en de omstandigheden waaronder moet worden gewerkt bepalen verder de keuze voor een schip. Bij een groot werk zal men uit oogpunt van kosten efficiëntie eerder kiezen voor een groot schip. In dit rapport is voor de (milieu)kostenindicatie berekeningen uitgegaan van twee scheepsgrootten (zie Tabel 6-2). De meeste werken op de Nederlandse Noordzee worden met schepen met dit bereik uitgevoerd.

Suppletie Type/grootte sleephopperzuiger	Onderwatersuppletie (klappen/rainbowen)	Strandsuppletie (opspuiten)
<b>Klein</b> Variërend tussen 1.000 m <sup>3</sup> en 6.000 m <sup>3</sup>	✓	✓
<b>Groot</b> Variërend tussen 16.000 m <sup>3</sup> en 26.000 m <sup>3</sup>	✗	✓

Tabel 6-2: Uitvoeringstechniek, type en scheepsgrootte sleephopperzuigers.

### 6.2.2 Productieraming (bouwsteen nr. 4)

De uitvoeringsmethode is de basis voor de productieraming. In de productieraming wordt berekend hoelang een cyclus duurt en wat de weekproductie van een schip is. Bij de cyclus van een schip wordt berekend hoeveel tijd gemoeid is met een cyclus van: zuigen, vol varen, klappen, rainbowen of opspuiten en leeg varen. Daarna wordt de weekproductie berekend door rekening te houden met mogelijke verletten (technisch-, operationeel-, weersverlet), de inhoud van het schip en de beladingsgraad. Aan de hand van de geraamde weekproductie en de totaal aan te brengen hoeveelheid zand (van in profiel (= in-situ) m<sup>3</sup> naar beun m<sup>3</sup> = x 1,15) wordt de uitvoeringsduur berekend.

### 6.2.3 Brandstofverbruik (bouwsteen nr. 5)

Het brandstofverbruik wordt uitgedrukt in liters per operationeel uur, waarbij het brandstofverbruik varieert per onderdeel van de productiecyclus (winnen, varen vol en leeg, dumpen, rainbowen, opspuiten) en is de grondslag voor de berekening van de milieu-effecten in de volgende paragraaf.

Hierbij dient opgemerkt te worden, dat de verbruiken indicatief zijn, vanwege:

- Het soort schip (relatief groot of klein geïnstalleerd vermogen ten opzichte van het laadvermogen, dieselelektrische aandrijving of direct aangedreven, wel of geen straalbuizen, vermogen van jetpompen, boegschroef).
- De weersomstandigheden (windsterkte, golfslag, getijstroming).
- De bekwaamheid/ bewustheid personeel.
- De diepte over het vaartraject (een geringe vaardiepte geeft grotere scheepsweerstandweerstand en dus een lagere vaarsnelheid)
- De gebruikte soort brandstof (die een hoger/lager verbruik kan geven).

### 6.2.4 Milieu-effecten (bouwsteen nr. 7)

Als uitgangspunt voor de (milieu)kostenindicatie berekeningen is genomen dat we alleen de productie-, transport- en gebruiksfase van de totale levenscyclus aanhouden. De overige fases (zoals sloop en hergebruik) van de levenscyclus worden in de berekeningen buiten beschouwing gelaten omdat deze niet van toepassing zijn op scheepsbrandstoffen.

### 6.2.5 Sleephopperzuiger (bouwsteen nr. 8)

De kosten van de sleephopperzuiger bestaan uit afschrijving en rente, onderhoud en reparatie, verzekering, brandstof en kosten voor de bemanning. Als bron hiervoor zijn onder andere de CIRIA-tabellen gebruikt. Deze tabellen zijn in de branche geaccepteerd als een goede bron voor de kostprijs van materieel (CIRIA, "a guide to cost standards for standard equipment, 2009"). De tabellen worden jaarlijks geïndexeerd ten opzichte van 2009. Alle kosten zijn uitgedrukt in kosten per week. De kosten per week worden gekoppeld aan de productieraming om tot een totale kostenschatting te komen (vermenigvuldigd met het aantal weken inzet).

### 6.2.6 Kostprijs (bouwsteen nr. 10)

De uiteindelijke kostprijs van een suppletie is de optelling van: productiekosten (uitvoeringsduur x weekkosten van al het materieel en personeel dat is ingezet), de eenmalige kosten, uitvoeringskosten, onvoorziene kosten en de opslag voor algemene kosten, winst en risico. Het delen van deze kostprijs door het volume in profiel resulteert in de indicatieve kosten per eenheid (EUR per m<sup>3</sup>) exclusief B.T.W..

De kostprijzen kunnen ook worden uitgedrukt in EUR per m<sup>3</sup> exclusief B.T.W. gemeten in het beun van het schip, hetgeen ca. 13% lager is.

### 6.2.7 Marktprijzen (bouwsteennr. 9)

In de praktijk spelen marktomstandigheden een zeer belangrijke rol in de prijsvorming op de markt. Zo is bij het berekenen van de kostprijs rekening gehouden met een opslagpercentage voor Algemene (hoofkantoor)kosten, Winst en Risico van 19% over de totale kostprijs. In de praktijk kan het risico van een werk hoger of lager worden ingeschat en daardoor op een andere kostprijs komen.

In dit rapport is gewerkt vanuit een zo goed mogelijk gemiddelde van de markt en het geeft daarom een goede indicatie van de werkelijke kosten.

## 6.3 Methodisch Kader Milieukostenindicator (MKI)

In deze rapportage wordt gebruik gemaakt van de Milieukostenindicator waarde (MKI). Deze methode voegt alle milieueffecten samen in één score indicator en drukt deze uit in euro's. Het weegt alle relevante milieueffecten die ontstaan tijdens de levenscyclus van een product of project en telt deze op tot één enkele score die vervolgens de milieu-schaduwprijs(/schaduwkosten) aantoont. De schaduwprijs hoeft niet daadwerkelijk te worden betaald, maar is een manier om de negatieve milieu-impact van producten of projecten te kunnen vergelijken en communiceren.

De milieueffecten zijn gecategoriseerd in elf categorieën. Deze staan vermeld in Tabel 6-3.

Milieueffectcategorie	Afkorting	Eenheid	MKI weging (MKI/kg equivalent)
Uitputting van abiotische grondstoffen (excl. fossiele energiedragers)	ADP-elementen	Kg Sb eq	0,16
Uitputting van fossiele energiedragers	ADP-brandstof	Kg Sb eq	0,16
<b>Klimaatverandering</b>	<b>GWP-100j</b>	<b>Kg CO<sub>2</sub> eq</b>	<b>0,103</b>
Aantasting van de ozonlaag	ODP	Kg CFC-11	30
Fotochemische oxidantvorming	POCP	Kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	2
Verzuring	AP	Kg SO <sub>2</sub>	4
Vermesting (eutrofiëring)	EP	Kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup>	9
Humane toxiciteit	HTP	Kg 1,4-DB	0,09
Zoetwater aquatische ecotoxiciteit	FAETP	Kg 1,4-DB	0,03
Mariene aquatische ecotoxiciteit	MAETP	Kg 1,4-DB	0,0001
Terrestrische ecotoxiciteit	TETP	Kg 1,4-DB	0,06

Tabel 6-3: Milieueffect categorieën voor de milieukostenindicatie, met klimaatverandering dikgedrukt vanwege een afwijkende weging die typisch is voor kustlijnzorgprojecten vanuit aanbestedingseisen.

Als de eenheden van deze milieueffectcategorieën vermenigvuldigd worden met de respectievelijke weging komt hier de uiteindelijke MKI-waarde uit. Voor dit onderzoek zijn met name de milieueffecten op klimaatverandering van belang. In Tabel 6-3 is te zien dat het effect van 1 kg CO<sub>2</sub> eq milieukosten met zich meebrengt van 0,103 op het Global Warming Potentieel (GWP) in de komende 100 jaar. De waarde van 0,103 per 1 kg CO<sub>2</sub> eq is dan ook gehanteerd als uitgangspunt voor deze rapportage.

Levenscycli	Stappen
<b>Productiefase (A1 t/m A3)</b>	A1 Grondstoffenwinning A2 Transport naar de producent A3 Productieprocessen
<b>Bouwfase (A4 t/m A5)</b>	A4 Transport naar de gebruikslocatie A5 Installatie op de gebruikslocatie
<b>Gebruiksfase (B1 t/m B7)</b>	B1 Gebruik product B2 Onderhoud B3 Reparatie B4 Vervanging, slijtage onderdelen B5 Renovatie B6 Energiegebruik product B7 Watergebruik product
<b>Sloop (C1 t/m C4)</b>	C1 Sloop C2 Transport naar afvalverwerking C3 Afvalverwerkingsprocessen C4 Stort
<b>Hergebruik (D)</b>	D Herwinning van de grondstoffen

Tabel 6-4 Levenscycli en stappen

Om de hoeveelheid milieueffecten te bepalen (bijvoorbeeld aantal kg CO<sub>2</sub> eq) wordt voor de hele levenscyclus van een product de milieukosten berekend (zie Tabel 6-4 voor de levenscycli en stappen hierbinnen). Per product zijn verschillende fasen en stappen van toepassing. De keuze voor een weging per levensfase vindt plaats binnen een levenscyclusanalyse of Life Cycle Assessment (LCA), de uitkomst van de LCA is dan de MKI-waarde. Binnen dit onderzoek zijn voor de berekening van de MKI van het brandstofverbruik bij sleepopperzuigers de volgende levensfasen van toepassing:

A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	X	Niet van toepassing										

Reden hiervoor is dat de brandstof bij verbruik wordt verbrand en er verder geen sprake is van onderhoud, reparatie, sloop of hergebruik.

### 6.3.1 Bouwstenen Milieukostenindicatie

In de uitvoeringsmethoden van alle suppletieconcepten zijn een aantal steeds terugkerende bouwstenen essentieel met betrekking tot de MKI. In de onderstaande tabel worden de uitgangspunten per bouwsteen toegelicht.

Bouwstenen MKI	Toelichting
1. Milieukostenindicator waarde (MKI) en Levenscyclusanalyse (LCA)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Indicatieve waardering van de milieukosten aan de hand van een Levenscyclusanalyse</li> <li>- Een Levenscyclusanalyse is een inventarisatie van milieueffecten als gevolg van de productie van brandstof (A1-A3), het transport van brandstof (A4), het gebruik van een sleepopperzuiger en de emissies uit de brandstof machine combinatie (B1) gedurende de levensduur van het schip vertaald naar een eenheid brandstof [ton of liter].</li> <li>- De milieueffecten zijn opgedeeld in 11 categorieën, waaronder aantasting van de ozonlaag, toxiciteit, en klimaatverwarming door broeikasgassen. Vooral de broeikasgassen zijn relevant, de rest is een gegeven vanuit Jochemsen-Verstraeten et al., (2016).</li> </ul>
2. MKI-Weging	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Alle milieueffect categorieën worden hetzelfde gewogen als in Jochemsen-Verstraeten et al., (2016), behalve broeikasgassen (CO<sub>2</sub> equivalenten) welke grofweg dubbel zo zwaar gewogen worden voor o.a. suppleties. Dit is een contractseis in vrijwel elk kustlijnzorg project, dus dat is hier ook aangenomen. Het aantal CO<sub>2</sub> equivalenten volgt ook uit Jochemsen-Verstraeten et al., (2016).</li> <li>- Normaliter wordt een kg CO<sub>2</sub> equivalenten (broeikasgassen) gewogen als 0,05 MKI per kg CO<sub>2</sub> eq., bij kustlijnzorgprojecten is dit 0,103 MKI per kg CO<sub>2</sub> eq.</li> </ul>
3. Het brandstofverbruik en type brandstof	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vanuit de eerder genoemde bouwstenen voor de kosten is er een brandstofverbruik uitgerekend, de eenheid is hiervan het aantal liters per m<sup>3</sup> verzette grond vanuit het aantal liters per operationeel uur.</li> <li>- Vanuit de eerder genoemde bouwstenen voor de MKI is bekend wat de MKI per ton brandstof is, dit wordt teruggerekend aan de hand van het soortelijk gewicht. De energie-inhoud van de brandstof is verrekend in de kosten.</li> <li>- type brandstof SHZ: MDO, mix MDO en HVO, HVO, GTL, LNG, Bio-LNG</li> <li>- Type brandstof stort (strand) en hulpmaterieel is buiten beschouwing gelaten voor de MKI. Dit komt overeen bij huidige kustlijnzorgprojecten wat betreft scope-bepaling.</li> </ul>



Bouwstenen MKI	Toelichting
4. Milieukosten per m <sup>3</sup> verzette grond	MKI per Liter is bekend, wordt vermenigvuldigd met het aantal liters brandstof per m <sup>3</sup> verzet zand.
5. Waterstof en methanol	Waterstof en methanol is ook berekend, zie hiervoor paragraaf 6.3.3. Dit wijkt af van bovenstaande methodologie voor wat betreft de onderbouwing van de data.

Tabel 6-5: Bouwstenen MKI.

### 6.3.2 Reguliere uitvoering en brandstoffen

Onderstaande tabel wordt aangehouden als basis voor de MKI-waarde per brandstof, met emissie gegevens van de SHZ Shoreway zoals is onderzocht in Jochemsen-Verstraeten et al., (2016). Deze emissies komen vrij per ton brandstof dat wordt verbrand in de gebruiksfase. De onderstaande waardes betreffen eenheden per ton brandstof verbrand in de SHZ Shoreway.

Emissie [kg] per brandstoftype	HFO [ton]	MDO [ton]	GTL [ton]	HVO (mix Dierlijk/Frituur) [ton]	LNG [ton]	Bio LNG [ton]	Waterstof (brandstofcellen productie niet duurzaam) [ton]
MKI [s€]	680,7	575,1	480,6	374,9	247,1	317,7	466,38
CO <sub>2</sub>	3206	3114	3124	3109,3 (bio)	2750	2750	-
CO <sub>2</sub> -eq (GWP)	3826,42	3749,2	4851,49	979,46	3987,11	3290,93	3594,29
CO	13,5	13,5	11,5	11,5 (bio)	14,8	14,8	Waterdamp 9 ton
NO <sub>x</sub>	63,3	56,8	51,1	51,1	4,5	4,5	
PM10	1,8	1,7	1,3	1,2	0,08	0,08	
SO <sub>x</sub>	2,0	2,0	0,2	0,2	0,1	0,1	

Tabel 6-6: Emissies per ton brandstof verbrand in de SHZ Shoreway (op basis van TNO (Jochemsen-Verstraeten et al., (2016)). Als uitgangspunt voor de berekeningen is aangenomen dat we alleen de productie- en gebruiksfase van de totale levenscyclus aanhouden.

### 6.3.3 Alternatieve brandstoffen

De ontwikkeling van de "Hopper van de Toekomst" gaat hand in hand gaat met de ontwikkeling van de infrastructuur van alternatieve brandstoffen zoals bijvoorbeeld methanol of waterstof. Voor de alternatieve brandstoffen wordt enkel uitgegaan van duurzaam geproduceerde brandstof.

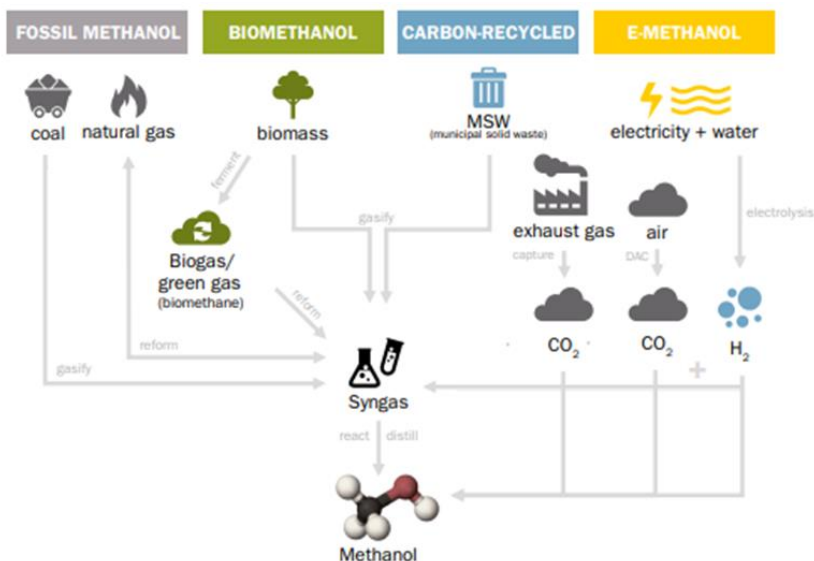
#### 6.3.3.1 Methanol

Methanol wordt gebunkerd op dezelfde manier als conventionele brandstoffen, het is een vloeistof bij kamertemperatuur. Het komt steeds meer in beeld als alternatieve – schonere – brandstof maar wordt vooralsnog gebruikt voor de productie van alledaagse producten zoals verf, bouwmaterialen, tapijt, etc. (Port of Rotterdam. (2021)).

Deze brandstof kan worden geproduceerd uit verschillende bronnen (zie ook Figuur 6-1):

- **Fossiele bronnen:** uit gas of kolen wordt synthesesgas geproduceerd (een mengsel van CO<sub>2</sub>, CO en H<sub>2</sub>). Vanuit het synthesesgas wordt methanol geproduceerd met een efficiëntie van ca. 80%.
- **Biomethanol:** hierbij is de feedstock biomassa (agrarisch en uit bosbeheer zoals houtsnippers, afvalproducten uit de papierproductie, mest, etc.). Uit biomassa wordt synthesesgas gemaakt door vergassing of het wordt gefermenteerd tot biomethaan.
- **Carbon recycled:** hierbij wordt huishoudelijk afval vergast tot synthesesgas. Dit lijkt op de productieprocessen uit biomethanol.
- **E-methanol (power-to-fuel methanol):** wordt geproduceerd uit H<sub>2</sub> door water elektrolyse, uit stroom van fossiele bron of uit hernieuwbare bronnen. CO<sub>2</sub> kan worden gevangen uit industriële emissies, biomassa of directe lucht afvang uit omgevingslucht. H<sub>2</sub> en CO<sub>2</sub> kan worden gecombineerd om synthesesgas te maken of voor de reactie tot methanol (Harmsen, 2021).

De oorsprong van de deze bronnen voor de productie van methanol is bepalend voor de duurzaamheid van de brandstof, Biomethanol en E-methanol zijn het meest duurzaam. Echter heeft de methanol productie vanuit fossiele bronnen een grotere beschikbaarheid en kan het werken met deze brandstof worden gezien als tussenoplossing naar methanol uit duurzamere bronnen, het is chemisch gezien immers hetzelfde.



Figuur 6-1 Schematisch overzicht van de verschillende productieroutes voor methanol (Harmsen, 2021)

### Kosten

Afhankelijk van de productieroute zijn de kosten als volgt:

Table 2: Cost range for fossil, bio- and e-methanol, and their dependencies on feedstock costs

Methanol type	Cost range	Cost dependent on
Fossil methanol	€ 9-22/GJ	Policy, Natural gas price
Biomethanol	€ 11-33/GJ	Policy, Biomass & green gas price
E-methanol	€ 27-68/GJ	Sustainable electricity and CO <sub>2</sub> costs

Figuur 6.3: Indicatief kostenoverzicht voor methanol (Harmsen, 2021).

De energie-inhoud van diesel is 43 MJ per kg (Aronietis, SYS, van Hassel & Van Elslander, 2016). En dat van methanol is 19,9 MJ/kg (Energiecijfers en -tabellen (isso.nl)). Soortelijk gewicht van methanol is 0.79 kg/m<sup>3</sup>. Uitgaande van een tussenliggend bedrag is er dan voor methanol uit fossiele brandstof een prijs gemoeid van €308,45/ton, voor biomethanol €437,80/ton en voor E-methanol €945,25/ton. De beschikbaarheid van fossiele methanol is groter, dit wordt namelijk ook voor andere doeleinden geproduceerd, de beschikbaarheid van biomethanol is nog lager.

	Energie-inhoud [MJ/kg]	Soortelijk gewicht [kg/m <sup>3</sup> ]	Prijs [€/ton]
Diesel	43	0,85	-
Methanol	19,9	0,79	onderstaand
- Fossiel	„	„	308,45
- Biomethanol	„	„	437,80
- E-methanol	„	„	945,25

Tabel 6-7 – Energie-inhoud diesel en methanol

### Broeikasgassen

De voornaamste reden om brandstoffen uit andere bronnen te gebruiken dan fossiel zit in de reductie van emissies in de productiefase. Methanol uit houtsnippers is minder vervuilend dan uit kolen. Onderstaand is een overzicht weergegeven afkomstig uit Harmsen (2021), met ter referentie MGO als eerste.

- MGO heeft in de productiefase een emissie van broeikasgassen van 13,5 g/MJ, en in de gebruiksfase 76,5 g/MJ, dus in totaal 90 g CO<sub>2</sub> equivalenten/MJ. Dit komt neer op 3870 kg/ton brandstof.
- Methanol uit fossiele bronnen heeft een emissie tussen 26,5 g en 34 g CO<sub>2</sub> equivalenten/MJ in de productiefase. In de gebruiksfase is er een emissie van 72 g CO<sub>2</sub> equivalenten/MJ. Per kg methanol er dus een emissie tussen 1960,15 g en 2109,4 g broeikasgassen, per ton is dat 1960,15 kg en 2109,4 kg.
- Bio methanol heeft tussen de 3 en de 6,5 g CO<sub>2</sub> equivalenten/MJ in de productiefase en geen emissies in de gebruiksfase, die zijn namelijk biogeen. Per kg methanol er dus een emissie tussen 59,7 g en 129,35 g broeikasgassen, per ton is dat 59,7 kg – 129,35 kg.
- Emissies van methanol uit huishoudelijk afval zijn onbekend. Dit is daarom buiten beschouwing gelaten.
- E-methanol heeft ca. 4 g CO<sub>2</sub> equivalenten/MJ in de productiefase en geen emissies in de gebruiksfase. Per kg methanol er dus een emissie van 79,6 g broeikasgassen, per ton is dat 79,6 kg. Hierbij is wel uitgegaan van stroom uit hernieuwbare bronnen.

Methanol uit fossiele brandstoffen is dus 45,49% duurzamer dan MGO, bio methanol 96,65% en E-methanol 97,94%.

	Emissies van broeikasgassen [g CO <sub>2</sub> eq/MJ]			[Kg CO <sub>2</sub> eq/ton]	
	Productiefase	Gebruiksfase	Totaal (excl. Transport)	Totaal (excl. Transport)	
MGO	13,5	76,5	90	3870	
Methanol fossiel	26,5 - 34	72	98,5 - 106	1960,15 – 2109,4	
Bio-methanol	3 – 6,5	0	3 – 6,5	59,7 – 129,35	
Methanol uit afval	-	-	-	-	
E-methanol	4	0	4	79,6	

Tabel 6-8 - Emissies van broeikasgassen

### NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub> emissies

Uitgaande van een Tier III motor is met de inzet van MDO (laagzwavelige brandstof) en met een SCR-installatie een emissie gemoeid van 2-3 g NO<sub>x</sub>/kWh, 0,36 g SO<sub>x</sub>/kWh en 0,23 g PM<sub>10</sub>/kWh. Bij het gebruik van methanol moet ook SCR worden ingezet, de NO<sub>x</sub> uitstoot is vergelijkbaar. De uitstoot van SO<sub>x</sub> is 98% lager, en dat van PM<sub>10</sub> is 85,21% lager.

Table 3: Tank-to-propeller pollutant emissions for MGO, methanol and LNG in gram per kWh mechanical work (engine output).

g/kWh	HFO 0.5% S	MGO 0.1% S Tier II	MGO 0.1% S Tier III	Methanol Tier II	Methanol Tier III	LNG Tier III
NO <sub>x</sub>	12.8	9	2-3	5	2.2	2
SO <sub>x</sub>	2.0	0.36	0.36	0.007	0.007	0.009
PM <sub>10</sub>	0.74	0.23	0.23	0.034	0.034	0.02

Figuur 6.4: Emissie vergelijk tussen HFO, MGO, LNG en methanol (Harmsen, 2021).

### 6.3.3.2 Waterstof

Waterstof wordt gebunkerd door het onder een druk van 350 bar naar de wateropslag aan boord te pompen. Productieroutes zijn als volgt.

- **Grijze waterstof:** dit kan worden opgewekt d.m.v. elektrolyse en door Steam Methane Reforming (SMR) uit aardgas.
- **Blauwe waterstof:** bij het SMR-proces of opwekking van grijze elektriciteit wordt vrijkomende CO<sub>2</sub> afgevangen en opgeslagen.
- **Groene waterstof:** hierbij wordt alleen groene stroom gebruikt voor elektrolyse of biomassa voor SMR.

Productie	Emissies [g CO <sub>2</sub> eq/MJ]	Transport	Emissies [g CO <sub>2</sub> eq/MJ]	Totaal	Emissies [g CO <sub>2</sub> eq/MJ]	Emissies [kg CO <sub>2</sub> eq/ton]	Verduurzaming t.o.v. grijze waterstof
SMR met wegtransport		108,1		SMR groen incl. transport	19,4		~ 90%
SMR-pijpleiding		104,4		Groene elektrolyse incl. transport	16,7		~ 90%
Blauwe productie	43,2	Verskil (ofwel alleen wegtransport excl. Productie)	3,7	Grijze waterstof 50% SMR en 50% elektrolyse Volgens TNO 2016		175	-
Groene productie	15,7			Gemiddeld SMR en electrolyse (groen), - zoals in TNO 2016	18,05		89,32%
Elektrolyse grijs	226,3			Gemiddeld grijs	169,05		-
Elektrolyse blauw	126,5			Gemiddeld blauw	88,55		47,62%
Elektrolyse groen	13,0						

Tabel 6-9 - Productie waterstof

Waterstof wordt voor bunkeren altijd onder druk worden gehouden, dit gebeurt middels tubetrailers, tankwagens met daarin waterstof gecompriemd tot 50 bar. Aangenomen is dat dit voor een bunkerschip ongeveer dezelfde milieu impact zal geven. De emissies van SMR met wegtransport is 108,1 g CO<sub>2</sub> eq/MJ voor grijze waterstof, en de emissies van SMR met transport door een pijpleiding is 104,4 g CO<sub>2</sub> eq/MJ. Wanneer gebruik gemaakt wordt van

een blauwe productieroute met transport door een pijpleiding is er een broeikasgasemissie van 43,2 g CO<sub>2</sub> eq/MJ, bij een groene productieroute is dit 15,7 g CO<sub>2</sub> eq/MJ.

Voor elektrolyse is het grijs 226,3 g CO<sub>2</sub> eq/MJ, blauw 126,5 g CO<sub>2</sub> eq/MJ en groen 13,0 g CO<sub>2</sub> eq/MJ, allemaal met vervoer door een pijpleiding. Het verschil tussen SMR mét en zonder wegtransport is 3,7 g CO<sub>2</sub> eq/MJ. (van Zyl, Verbeek, Roeien & Mentink, 2020). De meest groene productieroutes, incl. transport, is daarmee groene SMR 15,7 g CO<sub>2</sub> eq/MJ + 3,7 g CO<sub>2</sub> eq/MJ en groene elektrolyse 13,0 g CO<sub>2</sub> eq/MJ + 3,7 g CO<sub>2</sub> eq/MJ, ofwel 19,4 en 16,7 CO<sub>2</sub> eq/MJ.

In onderzoek naar milieuprofielen in een sleepopperzuiger door Jochemsen-Verstraeten et al., (2016), is uitgegaan van een milieu impact van ca. 175 kg CO<sub>2</sub> eq/ton waterstof in de productiefase, hierbij is er gemodelleerd op basis van 50% SMR en 50% elektrolyse. In dat onderzoek is uitgegaan van waterstofcellen en is de productie van die cellen meegenomen. Door bovenstaande resultaten te middelen voor de meest groene productiemethodes komen we uit op 18,05 g CO<sub>2</sub> eq/MJ. Voor de meest grijze productiemethodes komen we uit op 169,05 g CO<sub>2</sub> eq/MJ. Bij blauwe waterstof is dit 88,55 g CO<sub>2</sub> eq/MJ. Groene productie verduurzaamd waterstof dus met 89,32% op het vlak van broeikasgasreductie, blauwe waterstof verduurzaamd met 47,62%.

Waterstof heeft als emissie waterdamp, de MKI daarvan is onbekend net als de MKI van de gebruiksfase. Daarom wordt de verduurzaming percentueel verrekend met de in 2016 (door TNO) berekende milieu impact. Met de in TNO 2016 berekende milieu impact van ca. 175 kg CO<sub>2</sub> eq/ton waterstof is er dus een impact van 18,69 kg CO<sub>2</sub> eq/ton waterstof op het gebied van broeikasgassen tijdens de productiefase.

De soortelijke massa van waterstof is 0,09 kg/m<sup>3</sup>. Waterstof heeft volgens Jochemsen-Verstraeten et al., (2016) een MKI van 466,38 en 3594,29 kg CO<sub>2</sub> eq./ton, op basis van een CO<sub>2</sub> weging van 50/ton, op basis van 103/ton is het als volgt:

MKI grijze waterstof =  $466,38 - (3594,29 * 0,05) + (3594,29 * 0,103) = 656,88/\text{ton}$ , ofwel 0,06/L ( $656,88/1000 * 0,09$ )

De verduurzaming door blauwe of groene waterstof is:

MKI blauwe waterstof =  $466,38 - (3594,29 * 0,05) + ((3594,29 * 0,103) * (1 - 47,62\%)) = 480,58/\text{ton}$ , ofwel 0,04/L ( $480,58/1000 * 0,09$ )

MKI groene waterstof =  $466,38 - (3594,29 * 0,05) + ((3594,29 * 0,103) * (1 - 89,32\%)) = 326,20/\text{ton}$ , ofwel 0,03/L ( $326,20/1000 * 0,09$ )

Dat komt dan neer op:

Waterstof	MKI/ton (CO <sub>2</sub> 0,103)	MKI/L (CO <sub>2</sub> 0,103)
Grijze waterstof	656,88	0,06
Blauwe waterstof	480,58	0,04
Groene waterstof	326,20	0,03

Tabel 6.6: Berekende MKI voor verschillende vormen van waterstof.

### 6.3.4 Uitgangspunten brandstoffen van de toekomst

De resultaten (en bijbehorend kostenbestand) gaan uit van een brandstof van de toekomst, dit is een samengepakte waarde bestaande uit zowel methanol als waterstof. Deze keus is gemaakt omdat de MKI van de productie van methanol onbekend is, er is geen literatuur over te vinden. Literatuur gaat voornamelijk over de uitstoot van broeikasgassen per variant van methanol, zonder dat er een referentie bekend is wat betreft de rest van de uitstoot en MKI in zwaar materieel. Bij waterstof is dit wel het geval. .

Bij zowel groene waterstof als bij e-methanol zien we een reductie van in de orde grootte van 90%, (Blauwe waterstof is 89,32% en E-methanol is 97,94% duurzamer). Groene waterstof heeft een broeikasgasemissie van 16,7 g CO<sub>2</sub> eq/MJ en E-methanol ca. 4 g CO<sub>2</sub> eq/MJ. Methanol is een waterstofdrager en kan worden gebruikt om waterstof te maken.

De samengevoegde MKI-waarde van waterstof en methanol wordt 'Alternatieve brandstof genoemd'. De waarde voor waterstof uit tabel 6.6 wordt ook aangehouden voor methanol. In het volgende hoofdstuk worden de resultaten op de indicatoren voor elk van de suppletieconcepten beschreven, waar bestaande reguliere scheepsbrandstof (MDO) vergeleken wordt met brandstof op dierlijke vetten en afgewerkte frituurvetten (HVO) en met bovenstaande uitleg van methanol en waterstof (Alternatieve brandstof).

## 7 Resultaten op indicatoren

Met het volgen van de stappen uit het methodologisch kader uit hoofdstuk 6 zijn de resultaten op de indicatoren kosten en MKI voor de kansrijke combinaties tussen suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden uit hoofdstuk 5 verder uitgewerkt. De suppletieconcepten zijn te verdelen in megasuppleties en continue suppleties.

### 7.1 Kansrijke megasuppletieconcepten

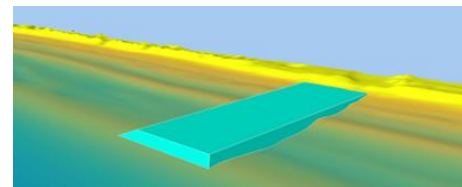
Vanuit WP2 blijken megasuppleties morfologisch een kansrijk alternatief voor de kustverdediging van Noord-Holland. Het volume van de megasuppletie is gebaseerd op het verwacht te suppleren volume voor de komende 10 jaar en komt op 7.500.000 m<sup>3</sup> zand (WP1). De manier en locatie in het dwarsprofiel van de kust waar dit volume wordt aangelegd is van invloed op het resultaat op de indicatoren kosten en MKI.

In een brainstormsessie vanuit het uitvoeringsproces is er bepaald welke varianten van een megasuppletie een verwacht lage impact hebben op kosten en MKI. Uit deze brainstormsessie zijn drie varianten gedetailleerd uitgewerkt. Om de vergelijking op te kunnen stellen zijn alle varianten op dezelfde locatie geprojecteerd; de kust bij Egmond aan zee waar het zandwinkvak Q8A zich op 10km van de suppletielocatie bevindt.

De volledige tabel met resultaten is weergegeven in bijlage 1&2, in onderstaande hoofdstukken worden de resultaten op hoofdlijnen toegelicht. In totaal zijn er vijf varianten doorgerekend: Het schiereiland met de kleine en grote hopper, het eiland met de kleine en grote hopper en de onderwatersuppletie met de kleine hopper. Voor ieder van deze vijf varianten zijn de kosten en MKI voor zeven brandstof varianten uitgerekend.

#### 7.1.1 Schiereiland

Het schiereiland is een megasuppletie die aan de strandzijde aansluit op het bestaande strand (NAP+3m) en aan de zeezijde start op de buitenste brekerbank (NAP-3m). Het zand wordt vanuit de hopper door een leidingsysteem geperst en opgebouwd doormiddel van een nat stort met hydraulische kranen en bulldozers. Omdat er gebruik wordt gemaakt van een leidingsysteem kan de suppletie met een klein (4.500m<sup>3</sup>) en groot type (16.000m<sup>3</sup>) sleephopperzuiger worden gerealiseerd.



Figuur 7-1: Megasuppletie: schiereiland

Voor beide types sleephopperzuigers zijn de resultaten voor de drie meeste bepalende brandstofftypes weergegeven in onderstaande tabel. Op de indicator kosten is de grote SHZ op MDO het laagst en op de indicator MKI scoort de kleine SHZ het laagst op de alternatieve brandstof.

#### SHZ type Groot

Brandstofftype	Kosten	MKI
MDO	4.00 euro/m <sup>3</sup>	0.67 euro/m <sup>3</sup>
HVO 100%	5,70 euro/m <sup>3</sup>	0,36 euro/m <sup>3</sup>
Alternatieve brandstof	6.00 euro/m <sup>3</sup>	0.07 euro/m <sup>3</sup>

Tabel 7-1: Aanleg schiereiland: drie meest bepalende brandstofftypes SHZ type Groot.

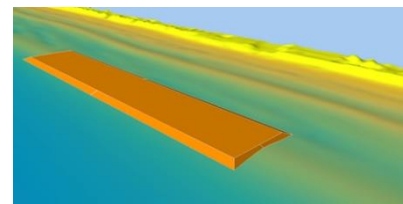
#### SHZ type Klein

Brandstofftype	Kosten	MKI
MDO	4.50 euro/ m <sup>3</sup>	0,60 euro/m <sup>3</sup>
HVO 100%	6.10 euro/m <sup>3</sup>	0.33 euro/m <sup>3</sup>
Alternatieve brandstof	6.50 euro/m <sup>3</sup>	0.06 euro/m <sup>3</sup>

Tabel 7-2: Aanleg schiereiland: drie meest bepalende brandstofftypes SHZ type Klein.

### 7.1.2 Eiland

Het eiland is een megasuppletie die op de buitenste brekerbank is gepositioneerd. De suppletie sluit bij aanleg niet aan op het bestaande strand. De kruin van het eiland wordt aangelegd op NAP+3 m. Het suppletieconcept wordt uitgevoerd met een combinatie van sleepopperzuigers. Tot aan de laagwaterlijn wordt het zand deels gedumpt en gerainbowd tot er een stabiel plateau boven water ligt waarop het natte stort kan worden opgebouwd. Het natte stort wordt voorzien van zand vanuit transport door een leidingsysteem. Voor de productieberekening is de verdeling tussen de suppletie methode: 20% van het materiaal wordt gedumpt, 20% gerainbowd en 60% geperst door een leidingsysteem.



Figuur 7-2: Megasuppletie: Eiland

Vanwege de diepgang rondom de buitenste brekerbank kan voor het zand dat gedumpt en gerainbowd wordt enkel het kleine type sleepopperzuiger worden ingezet. Voor het gedeelte dat geperst wordt door een leidingsysteem zijn berekeningen met een klein en groot type sleepopperzuiger uitgewerkt.

Voor beide combinaties zijn de resultaten voor de drie meeste bepalende brandstoftypes weergegeven in onderstaande tabel. De kosten zijn het laagst bij de kleine SHZ in combinatie met de grote SHZ op MDO. De MKI is het laagst bij de alternatieve brandstof.

#### Combinatie SHZ type Klein: dumpen en rainbowen, SHZ type Groot: persen

Brandstoftype	Kosten	MKI
MDO	3.75 euro/m <sup>3</sup>	0.57 euro/m <sup>3</sup>
HVO 100%	5.30 euro/m <sup>3</sup>	0.31 euro/m <sup>3</sup>
Alternatieve brandstof	5.55 euro/m <sup>3</sup>	0.06 euro/m <sup>3</sup>

Tabel 7-3: Aanleg eiland: drie meest bepalende brandstoftypes combinatie SHZ type Klein en SHZ type Groot.

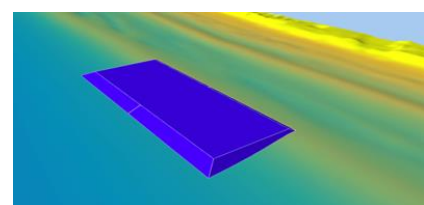
#### SHZ type Klein: dumpen, rainbowen en persen

Brandstoftype	Kosten	MKI
MDO	4.10 euro/m <sup>3</sup>	0.53 euro/m <sup>3</sup>
HVO 100%	5.50 euro/m <sup>3</sup>	0.29 euro/m <sup>3</sup>
Alternatieve brandstof	5.8 euro/m <sup>3</sup>	0.05 euro/m <sup>3</sup>

Tabel 7-4: Aanleg eiland: drie meest bepalende brandstoftypes SHZ type Klein.

### 7.1.3 Onderwater

De onderwater suppletie is een megasuppletie gesitueerd tegen de buitenste brekerbank aan. Bij het ontwerp van de suppletie is het uitgangspunt dat het materiaal met een zo laag mogelijk energieverbruik uit de SHZ komt, dus dat zoveel mogelijk materiaal gedumpt of gerainbowd kan worden. Aan de zeezijde wordt de suppletie opgebouwd vanuit de NAP-8lijn tot een kruinhoogte van ca. NAP-1m. Bij het gebruik van kleine sleepopperzuigers kan 40% van het materiaal gedumpt worden en 60% gerainbowd. Vanwege de beperkte diepgang is het gebruik van grote sleepopperzuigers is niet mogelijk.



Figuur 7-3: Megasuppletie: Onderwater eiland

Voor deze uitvoeringsmethode zijn de resultaten voor de drie meeste bepalende brandstoftypes weergegeven in onderstaande tabel. De kosten zijn het laagst bij de kleine SHZ op MDO en op MKI scoort de kleine SHZ op alternatieve brandstof het best.



### SHZ type Klein: dumpen en rainbowen

Brandstoftype	Kosten	MKI
MDO	3.00 euro/m <sup>3</sup>	0.44 euro/m <sup>3</sup>
HVO 100%	4.20 euro/m <sup>3</sup>	0.24 euro/m <sup>3</sup>
Alternatieve brandstof	4.50 euro/m <sup>3</sup>	0.04 euro/m <sup>3</sup>

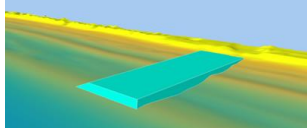
Tabel 7-5: Onderwater: drie meest bepalende brandstoftypes SHZ type Klein.

## 7.2 Resultaten over megasuppletieconcepten

In deze paragraaf wordt tussen de suppletieconcepten vergeleken hoe ze scoren op de indicatoren kosten en duurzaamheid. Door de totale kosten en de totale MKI-waardering met elkaar te vergelijken zijn de suppletieconcepten onderling gerangschikt. Voor de totale waardering wordt uitgegaan van 7,5 miljoen m<sup>3</sup>.

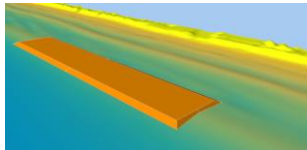
### 7.2.1 Megasuppletie

Voor de megasuppletieconcepten zijn de hoogste en laagste waarde voor kosten en MKI in deze paragraaf beschreven. De uitkomsten voor de overige varianten zijn toegevoegd in bijlage 1&2.

Schiereiland	Brandstoftype	Kosten	MKI
	MDO	29,6 MIO	5 Mio
	HVO100%	42,7 MIO	2,7 Mio
	Alternatieve brandstof	45 MIO	0.5 Mio

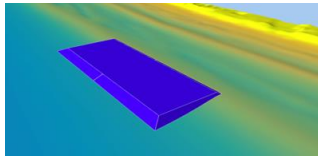
Tabel 7-6: Schiereiland: totale kosten en MKI

Bij de realisatie van het Schiereiland scoort de grote hopper het beste op kosten. De traditioneel aangedreven hopper op MDO is het goedkoopst. Als deze hopper wordt aangedreven op duurzame alternatieve brandstof stijgen de kosten met ca. 40%. Voor dit suppletieconcept wordt er 100% gebruik gemaakt van walpersen om het zand op de suppletielocatie te krijgen. Op duurzaamheid is er een klein verschil tussen de grote of kleine hopper. Wordt het schiereiland aangelegd met alternatieve brandstof dan worden de milieukosten gereduceerd met ca. 90%.

Eiland	Brandstoftype	Kosten		MKI	
		Combi	Klein	Combi	Klein
	MDO	28,1 Mio	30,6 Mio	4,3 Mio	4,0 Mio
	HVO100%	39,5 Mio	41,0 Mio	2,3 Mio	2,2 Mio
	Alternatieve brandstof	41.6 Mio	43,3 Mio	0,4 Mio	0.4 Mio

Tabel 7-7: Eiland: totale kosten en MKI

Bij de realisatie van het Eiland zijn de verschillen tussen geheel met de kleine hopper en de combinatie van een grote en kleine hopper beperkt. Beide opties zijn uitgewerkt in bovenstaande tabel. De traditioneel aangedreven hopper op MDO is het goedkoopst. Als deze hopper wordt aangedreven op Alternatieve brandstof stijgen de kosten met 155%. Wordt het eiland aangelegd met duurzame brandstof dan worden de milieukosten gereduceerd met 90%.

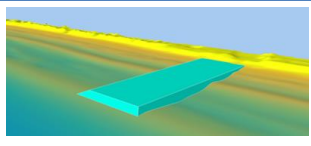
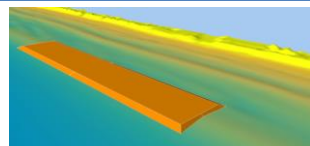
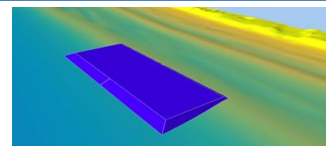
Onderwater	Brandstoftype	Kosten	MKI
	MDO	22,7 MIO	3,3 Mio
	HVO100%	31,4 MIO	1,8 Mio
	Alternatieve brandstof	33,3 MIO	0,33 Mio

Tabel 7-8: Onderwater: totale kosten en MKI

Bij de realisatie van de onderwater suppletie wordt 100% van het volume gedumpt of gerainbowd, om zo dicht mogelijk bij de suppletie locatie te komen wordt dit suppletieconcept uitgevoerd met een klein hopper type. De traditioneel aangedreven hopper op MDO is het goedkoopst. Als deze hopper wordt aangedreven op Alternatieve brandstof stijgen de kosten met 30%. Wordt de onderwater suppletie aangelegd met Alternatieve brandstof dan worden de milieukosten gereduceerd met 90%.

### Vergelijking megasuppletie varianten

Als de drie suppletieconcepten met elkaar worden vergeleken, blijkt dat op de indicatoren kosten en duurzaamheid de onderwatersuppletie het beste scoort. Bij de onderwatersuppletie worden de kosten en MKI met gemiddeld ca. 20% gereduceerd t.o.v. het tweede suppletieconcept het eiland. Als de keuze wordt gemaakt om de onderwater suppletie met HVO100 uit te voeren dan wordt ca. de helft van de MKI bespaard en zijn de kosten gelijk aan het Schiereiland. Als de concepten met een Alternatieve brandstof wordt toegepast is de milieu impact gelijk.

		Schiereiland	Eiland	Onderwater
				
MDO	Kosten	€ 29,6 Mio	€ 28,1 Mio	€ 22,7 Mio
	MKI	€ 5,0 Mio	€ 4 Mio	€ 3,3 Mio
Alternatief	Kosten	€ 44,9 Mio	€ 41,6 Mio	€ 33,5 Mio
	MKI	€ 0,49 Mio	€ 0,42 Mio	€ 0,33 Mio
Uitvoeringstijd		21 weken	35 weken	56 weken

Tabel 7-9: Vergelijking megasuppleties: totale kosten en MKI

### 7.3 Vergelijking megasuppletie met de reguliere suppletie

De meest gangbare reguliere suppletieconcepten zijn een strand en vooroeversuppletie. Om de vergelijking tussen de regulieren en de megasuppletieconcepten te maken is het suppletievolume van de reguliere suppletie vastgesteld op 1,5mio m<sup>3</sup> met enkel uitgevoerd door het kleine hopper type. De overige variabelen, zoals locatie en vaarafstand, zijn gelijk gehouden met de megasuppletieconcepten. De uitkomsten van de reguliere suppletie zijn in onderstaande tabellen vergeleken met de uitkomsten van de megasuppletie.

Op MKI zijn de verschillen tussen de regulieren suppletie en de megasuppletie beperkt, met dezelfde brandstoftype kan eenzelfde MKI voordeel worden behaald. De verschillen in de kosten zijn te verklaren doordat de eenmalige kosten van een reguliere suppletie en een megasuppletie grotendeels gelijk zijn. Echter worden deze kosten bij een megasuppletie gedeeld door een groter volume. Hierdoor zijn de kosten per m<sup>3</sup> relatief lager. Let op dat bij de vergelijking rekening wordt gehouden met enkel een vergelijking met hetzelfde hopper type.

Brandstoftype	Strandsuppletie		Vooroeversuppletie	
	Kosten (€/m <sup>3</sup> )	MKI (€/m <sup>3</sup> )	Kosten (€/m <sup>3</sup> )	MKI (€/m <sup>3</sup> )
MDO	4,70	0,60	3,40	0,50
HVO 100%	6,50	0,30	4,70	0,25
Alternatieve	6,80	0,06	5,00	0,05

Tabel 7-10: Reguliere suppleties kosten en MKI

Alternatief	Megasuppletie met hopper			
	Kosten (€/m <sup>3</sup> )		MKI (€/m <sup>3</sup> )	
	Grote hopper (MDO- HVO-alt.)	Kleine hopper (MDO- HVO-alt.)	Grote hopper (MDO- HVO-alt.)	Kleine hopper (MDO- HVO-alt.)
Schiereiland	4,00 – 5,70 – 6,00	4,50 – 6,10 – 6,50	0,67 – 0,36 – 0,07	0,60 – 0,33 – 0,06
Eiland	3,75 – 5,30 – 5,55	4,10 – 5,50 – 5,80	0,57 – 0,31 – 0,06	0,53 – 0,29 – 0,05
Vooroever	–	3,00 – 4,20 – 4,50	–	0,44 – 0,24 – 0,04

Tabel 7-11: Megasuppleties kosten en MKI

### 7.4 Kansrijke continue suppletieconcepten

Het uitgangspunt van continue suppletieconcepten is dat het zand in een continu proces op dezelfde locatie wordt aangebracht. In hoofdstuk 5 is een selectie gemaakt van de uitvoeringsmethodes die in een continu proces zand op de suppletielocatie brengen. Dit zijn bijvoorbeeld de zandwindmolen en de cablehopper. Deze concepten worden binnen het IKZ programma verder uitgewerkt. Beide concepten bevinden zich binnen het traject: ontwikkelen. Omdat de uitvoeringsmethodes zich nog in een ontwikkeltraject bevinden en er gebruik wordt gemaakt van bedrijfsspecifieke informatie zijn er voor het DCC-consortium nog veel onbekende variabelen. Hierdoor is de keuze gemaakt om voor de stationaire uitvoeringsmethode van continue suppletieconcepten de getallen van de initiatiefnemer over te nemen.

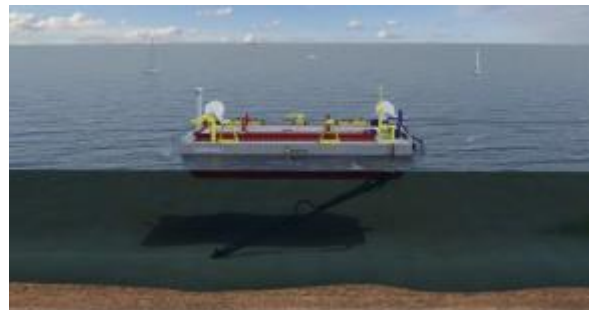
Voor deze resultaten zijn de volgende uitgangspunten gebruikt:

- 1.6 miljoen m<sup>3</sup> per jaar
- Vaarafstand van winvak naar suppletielocatie: 12km
- Suppletielocatie: Texel
- Prijspeil 2018
- CO<sub>2</sub> eq €50/ton

Doordat de uitgangspunten binnen het IKZ traject verschillen van de uitgangspunten binnen de DCC kunnen de megasuppletie en continue suppletieconcepten niet 1 op 1 met elkaar worden vergeleken. Dit komt met name doordat het prijspeil en de CO<sub>2</sub> weging niet gelijk is aan de suppletieconcepten. Er is gezien het verschil in ontwikkeling tussen de IKZ alternatieven bewust gekozen om deze uitgangspunten niet te updaten.

#### Cablehopper

De getallen voor de Cablehopper zijn aangeleverd door de initiatiefnemer. De Cablehopper is een innovatief concept dat nog volop in ontwikkeling is. Zie voor meer informatie de Bijlage 3: productsheet cablehopper.



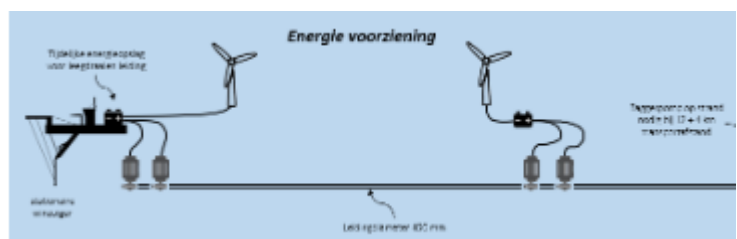
Figuur 7-4: Cable hopper [Boskalis]

Kosten	MKI
2.74 euro/m <sup>3</sup>	0.06 euro/m <sup>3</sup> (CO <sub>2</sub> eq €50/ton)

Tabel 7-12: Continuesuppletie Cablehopper [Bijlage 3 Productsheet Cablehopper, Boskalis]

#### Zandwindmolen

De getallen voor de Zandwindmolen zijn aangeleverd door de initiatiefnemer. De zandwindmolen is een innovatief concept dat nog volop in ontwikkeling is. Zie voor meer informatie de Bijlage 3: productsheet zandwindmolen.



Figuur 7-5 Zandwindmolen

Kosten	MKI
4 tot 6 euro/m <sup>3</sup>	0.2 euro/m <sup>3</sup> (CO <sub>2</sub> eq €50/ton)

Tabel 7-13: Continuesuppletie Cablehopper [Bijlage 3 Productsheet Zandwindmolen, Sweco]

## 8 Gevoeligheidsanalyses

Voor de berekeningen zijn aannames gedaan voor de CO<sub>2</sub>prijs, brandstofprijzen, milieukostenwaardering en de vaarafstand. Het is aannemelijk dat deze aannames in de toekomst kunnen veranderen door politieke keuzes, geopolitieke veranderingen of marktwerking. In de volgende paragrafen wordt inzicht gegeven in de mogelijke impact van deze veranderingen. Om de variabelen te beperken wordt er in de gevoeligheidsanalyse gekeken naar het verschil in de som van de kosten/m<sup>3</sup> en MKI/m<sup>3</sup>. In het geval van het schiereiland met MDO is dit: 3,95 euro/m<sup>3</sup> en 0,67 MKI euro/m<sup>3</sup>. Bij het aanpassen van een van de variabelen in de gevoeligheidsanalyse blijven de andere variabelen op het niveau van de uitgangspunten uit hoofdstuk 6.

### 8.1 CO<sub>2</sub> prijs

In de MKI-berekening wordt voor de weging van CO<sub>2</sub> een waarde van 103 euro/kg gehanteerd. De waarde van CO<sub>2</sub> is de afgelopen jaren gestegen en de verwachting is dat deze stijging zich de komende jaren door zal zetten. Voor de gevoeligheidsanalyse wordt de CO<sub>2</sub> prijs verhoogd van 103 euro/kg naar 206 euro/kg naar 412 euro/kg.

- 103 euro/ton: Het verschil tussen MDO en de duurzame alternatieve brandstof is 1,8 euro/m<sup>3</sup> bij het schiereiland tot 1,3 euro/m<sup>3</sup> bij de onderwater suppletie.
- 206 euro/ton: Het verschil tussen MDO en de duurzame alternatieve brandstof is 1,5 euro/m<sup>3</sup> bij het schiereiland tot 1,0 euro/m<sup>3</sup> bij de onderwater suppletie.
- 412 euro/ton: Het verschil tussen MDO en de duurzame alternatieve brandstof is 0,8 euro/m<sup>3</sup> bij het schiereiland tot 0,6 euro/m<sup>3</sup> bij de onderwater suppletie.

MKI-weging per ton CO <sub>2</sub> eq.	Schiereiland [€/m <sup>3</sup> ]	Onderwatersuppletie [€/m <sup>3</sup> ]
103	1,8	1,3
206	1,5	1,0
412	0,8	0,6

Figuur 8-1 Invloed CO<sub>2</sub> prijs

Bij een verviervoudiging van de CO<sub>2</sub> prijs wordt het verschil tussen MDO en de duurzame brandstof gehalveerd. Enkel het verhogen van de CO<sub>2</sub> prijs is niet voldoende om het verschil in kosten tussen de traditionele en duurzame brandstoffen te overbruggen.

### 8.2 Brandstofprijzen

Voor de berekening van dit rapport is voor het prijspeil van de brandstoffen het niveau aangehouden van januari 2021. Sindsdien is er het nodige veranderd in de wereld en hebben we prijsstijgingen gezien, in extreme gevallen, tot wel 350% als het huidige prijsniveau. Daarnaast is het de verwachting dat met de opschaling van alternatieve brandstoffen hier een efficiëntieslag zal plaatsvinden wat resulteert in een 25% reductie van de kosten.

Als we kijken naar wat het prijspeil doet in de loop van de tijd zien we het volgende:

- Prijspeil januari 2021: Het verschil tussen MDO en de alternatieve brandstof is 1,8 euro/m<sup>3</sup> bij het schiereiland tot 1,3 euro/m<sup>3</sup> bij de onderwater suppletie.
- Prijspeil november 2022: Het verschil tussen MDO en de alternatieve brandstof is 1,0 euro/m<sup>3</sup> bij het schiereiland tot 0,75 euro/m<sup>3</sup> bij de onderwater suppletie.
- Prijspeil toekomst: Het verschil tussen MDO en de alternatieve brandstof is 1,0 euro/m<sup>3</sup> bij het schiereiland tot 0,75 euro/m<sup>3</sup> bij de onderwater suppletie.

Prijspeil	Schiereiland [€/m <sup>3</sup> ]	Onderwatersuppletie [€/m <sup>3</sup> ]
Januari 2021	1,8	1,3
November 2022	1	0,75
Toekomst	1	0,75

Figuur 8-2 Invloed brandstofprijzen

Als de berekeningen in dit werkpakket uitgevoerd worden met als prijspeil juni 2022 zien we een prijsstijging tussen de 14% en 35% afhankelijk van de verschillende brandstof soorten. Met deze stijging wordt het gat naar de duurzame brandstof verkleind. De huidige ontwikkelingen in de wereld zorgen ervoor dat er nog geen stabiel prijsniveau is en daarom zal bij de interpretatie van de resultaten hiermee rekening gehouden dienen te worden. Voor de alternatieve duurzamere brandstoffen zoals Waterstof of Methanol is het van belang dat er een groter groen aanbod wordt gerealiseerd en een goede infrastructuur wordt ontwikkeld waardoor de prijzen omlaag kunnen.

### 8.3 MKW-weging

De milieukostenwaardering (MKW) is het gewicht dat aan de milieukosten wordt gehangen door aanbesteders bij uitvraag van een suppletiewerk. Bij aanbestedingen binnen kustlijnverzorging van RWS is de milieukostenweging factor toegenomen van respectievelijk 1, naar 1,5 tot uiteindelijk 2. Op dit moment wordt er veelal een milieukostenweging van 2 gehanteerd. Dit betekent dat elke MKI met een factor 2 wordt vermenigvuldigd. Anders gezegd wordt er op dat moment meer waarde gehecht aan de milieukosten dan de daadwerkelijk berekende milieukosten volgens de MKI. Voor de rapportage is voor de MKW een factor van 1 aangehouden. Het is denkbaar dat milieukosten steeds belangrijker worden geacht in de toekomst, daarom is voor de gevoeligheidsanalyse de MKW factor verhoogd van 1 naar zowel 2 als naar 4. Hieruit bleek dat bij een MKW-weging van 4 het kantelpunt zit. Een verdere verhoging van de MKW zal leiden tot grotere verschillen tussen MDO en alternatieve brandstof, zie de resultaten tekstueel en in de figuur hieronder:

Factor MKW (MKI*X)	Waarde t.o.v. alt. brandstof [€+MKW/m <sup>3</sup> ]
X=1	- 1,44
X=2	- 0,83
X=4	+ 0,37
X=3,38	+ 0

Figuur 8-3 Invloed MKW

- Factor 1: is basis waarop alle waarden in dit plan zijn gebaseerd: De kosten plus MKW-waarde per m<sup>3</sup> van MDO ligt 1.44 euro/m<sup>3</sup> onder de waarde van de alternatieve brandstof
- Factor 2: De kosten plus MKW-waarde per m<sup>3</sup> van MDO ligt 0.83 euro/m<sup>3</sup> onder de waarde van de duurzame Alternatieve brandstof. Als we hier ook naar de overige brandstoffen kijken zien we dat MDO niet meer de goedkoopste brandstof is.
- Factor 4: De kosten plus MKW-waarde per m<sup>3</sup> van MDO liggen 0.37 eur/m<sup>3</sup> hoger dan de waarde van de duurzame Alternatieve brandstof.
- Factor 3,38: De kosten plus MKI-waarde per m<sup>3</sup> van MGO ligt op gelijk niveau van de waarde van de duurzame brandstof. Deze factor is dus het omslagpunt vanaf wanneer de Alternatieve brandstof een goedkoper resultaat per m<sup>3</sup> geeft.

Uit deze gevoeligheidsanalyse blijkt dat het toepassen van een hogere MKW factor, een gunstig effect kan hebben op het toepassen van de alternatieve brandstoffen. De brandstofprijzen in de markt hebben wel een groot effect op de toepassing. Zo komt LNG gunstig uit deze analyse, zelfs al bij een factor 2, echter de marktprijs is dermate gestegen door met name de oorlog in de Oekraïne, dat deze uitkomst met het huidige prijsniveau niet meer haalbaar is. De aanbesteder moet dus goed nadenken wat ze willen bereiken met het toepassen van een MKW-weging en welke factor ze daarbij hanteren.

### 8.4 Zandwinstrategie (vaarafstanden)

De resultaten uit hoofdstuk 7.2 zijn bepaald met de huidige reserveringsgebieden voor zandwinning. De huidige reserveringsgebieden raken snel vol door plaatsing of reservering voor windparken, natuurgebieden, oefengebieden of leidingtracés. Dit gaat op termijn zorgen voor een langere vaarafstand naar de zandwingebieden, die door ruimtegebrek steeds verder weg zullen komen te liggen.

Om te laten zien wat het effect is van zandwingebieden die verder weg komen te liggen, zijn er 4 alternatieve afstanden berekend: 10km, 30km, 40km en 70km.

- het huidige voor zandwinning vergunde gebied Q8A ca. 10 km;
  - Dit is de basis voor de resultaten uit hoofdstuk 7. Op basis van Kosten + MKW is de onderwatersuppletie het meest voordelige concept.
- het 1<sup>e</sup> extra zandwinningsgebied: ca. 30 km;
  - Een zandwingebied dat 20km verder ligt, geeft een kostenstijging tussen de 42% en 74% en op de MKI ligt de stijging op ca 44% tot 75% afhankelijk van het gekozen suppletieconcept.
- het 2<sup>e</sup> extra zandwinningsgebied: ca. 40 km;
  - Een zandwingebied 30km verder, geeft een kostenstijging tussen 66% en 118% en op de MKI ligt de stijging tussen ca 70% en 119% afhankelijk van het gekozen suppletieconcept.
  - Op basis van Kosten +MKW is de onderwater suppletie het meest voordelige concept.
- het 3<sup>e</sup> extra zandwinningsgebied: ca. 75 km.
  - Een zandwingebied 65km verder, geeft een kostenstijging tussen 133% en 136% en op de MKI ligt de stijging tussen 140% en 236% afhankelijk van het gekozen suppletieconcept
- Gemiddeld wordt de kostprijs tussen de 2% en de 4% duurder voor elke kilometer dat een zandwingebied verder weg komt te liggen. Ook de MKI stijgt tussen de 2% en 4% voor elke kilometer. Afhankelijk van het gekozen concept. De procentuele stijging is het laagste bij het Basis Schiereiland concept en het hoogste bij de onderwater suppletie.

Zandwinningsgebied	Afstand [ca. km]	Kostenstijging afhankelijk van suppletieconcept en t.o.v. huidig zandwinvak [%]	Stijging MKI afhankelijk van suppletieconcept en t.o.v. huidig zandwinvak [%]
Huidig Q8A	10		
1e extra gebied	30	42 - 74	44 - 75
2e extra gebied	40	66 - 118	70 - 119
3e extra gebied	70	133 - 136	140 - 236
Per extra km	-	2 - 4	2 - 4

*Figuur 8-4 Invloed vaarafstanden*

Als we naar vaarafstand kijken ligt het omslagpunt voor type brandstof en suppletieconcept bij 47km. Vanaf deze afstand verandert het voordeligste suppletieconcept van 'Onderwater' naar een 'Schiereiland basis'. Dit komt door de inzet van grotere sleepopperzuigers bij het Schiereiland t.o.v. het onderwaterconcept. Grotere sleepopperzuigers hebben bij een grotere vaarafstand meer schaalvoordelen t.o.v. kleinere sleepopperzuigers.

Deze getallen zijn alleen gebaseerd op de berekeningen zoals deze zijn uitgevoerd voor dit werkpakket. Maar als de zandwinvakken verder weg komen te liggen zal ook de winddiepte gaan toenemen. Dit zou tot gevolg kunnen hebben dat de kleinere sleephoppers niet meer voldoen omdat deze niet meer bij de bodem kunnen komen. Hier is in dit rapport geen rekening mee gehouden. Over het algemeen zijn grotere sleephopperzuigers voordeliger op langere afstanden. Het nadeel is dat veel van deze sleephopperzuigers dieper liggen en dus minder dicht bij de kust kunnen komen als deze ondiep is. Dit is het geval op de locatie waar de berekeningen van dit rapport zijn uitgevoerd.



## 9 Conclusie

### 9.1 Belangrijkste conclusies

Op basis van H7 trekken we een aantal conclusies met betrekking tot de indicatoren kosten en duurzaamheid (MKI).

#### *Suppletieconcepten*

Van de drie megasuppletieconcepten scoort de onderwatersuppletie het best op zowel de indicator kosten als op MKI bij het gebruik van reguliere brandstof (MDO).

De onderwatersuppletie scoort 30% lager op kosten en 17% lager op MKI dan het suppletieconcept Eiland. Dit wordt met name veroorzaakt door het feit dat er bij het suppleren meer gerainbowd moet worden, waardoor meer brandstof wordt verbruikt en dus meer wordt uitgestoten. Dit laat zien dat hoe minder energie er verbruikt wordt bij een suppletieconcept hoe beter er wordt gescoord op zowel kosten als op duurzaamheid. Dit verklaart ook het verschil tussen het Schiereiland en het Eiland, waar het Eiland 5% minder is in kosten en 16% minder op MKI. Voor de realisatie van het Schiereiland is meer energie benodigd, met name door het gebruik van leidingen en bijhorende pompen.

#### *Brandstoffen*

Alternatieve brandstoffen als waterstof en methanol scoren een stuk beter op MKI (ongeveer met een factor 10) dan traditionele brandstoffen. Deze brandstoffen zijn momenteel nog een stuk duurder: de kosten voor alle drie suppletieconcepten stijgen door het gebruik van deze brandstoffen met 30-40%. Qua kosten ligt het gebruik van biobrandstof HVO 100% en alternatieve brandstoffen niet ver uit elkaar, terwijl de alternatieve brandstoffen wel circa zesmaal minder milieukosten veroorzaken. Ofwel een relatief kleine extra investering van HVO100% naar alternatieve brandstoffen levert substantieel minder MKI op.

### 9.2 Conclusies gevoeligheidsanalyse

We zien dat geopolitieke ontwikkelingen of politieke keuzes een enorme invloed kunnen hebben op de brandstofprijzen. Dit heeft impact op keuze van type brandstof of suppletieconcept. Door politieke keuzes te vertalen naar het inkoopbeleid is het mogelijk om de verschillen tussen traditionele en duurzame brandstoffen kleiner maar ook groter te maken. Met de waardering in het inkoopbeleid op CO<sub>2</sub> en milieukosten kan hierop gestuurd worden waardoor men stimuleert om eerder een keuze te maken voor een duurzamere brandstof. Als hierdoor meer vraag ontstaat naar duurzamere brandstof kan dit ook zorgen voor een versnelling in de ontwikkeling van deze brandstoffen (aanbod).

#### *CO<sub>2</sub> weging*

De CO<sub>2</sub> prijs is een onderdeel van de MKI-berekening. Een verhoging van de CO<sub>2</sub> prijs zorgt voor een verhoging van de MKI-waarde. Bij een verviervoudiging van de CO<sub>2</sub> prijs is het kostprijs verschil (kosten + MKI) met een alternatieve brandstof omgedraaid, het omslagpunt ligt in de berekeningen die voor dit rapport zijn gedaan op een  $MKW = MKI * 3,4$ . Dat betekent dat als de CO<sub>2</sub> prijs 3,4x zo duur wordt de alternatieven brandstoffen voordeliger worden dan MDO.

#### *Milieukosten Waardering (MKW)*

In de resultaten wordt uitgegaan van een weging met een factor 1. In 2021 is de weging gegroeid naar een factor 2 die momenteel door Rijkswaterstaat in de meeste aanbestedingen wordt gehanteerd. De kostprijs+MKW (MKI\*factor) laat dan zien dat MDO momenteel de voordeligste keuze is, bij een MKI\*2 wordt LNG het voordeligst en bij MKI\*4 zijn de alternatieve brandstoffen goedkoper dan de traditionele brandstoffen. Bij een MKW-waarde van 4 ligt dus een omslagpunt waar alternatieve brandstoffen gunstiger worden. Hoe hoger de MKW-waarde hoe gunstiger dit wordt.

Verhoging van de MKW heeft geen invloed op de keuze van het suppletieconcept. Dit komt omdat de MKI evenredig staat met het aantal te suppleren m<sup>3</sup> zand en er op deze wijze geen verschillen ontstaan tussen de verschillende suppletieconcepten.

### Brandstofprijzen

In de berekeningen voor dit rapport is uitgegaan van prijspeil januari 2021. Door de geopolitieke veranderingen en met name de oorlog in de Oekraïne zien we nu een extreme verhoging en een onstabiel prijspeil. Hierdoor is de brandstofprijs van LNG en biobrandstoffen (HVO) en alternatieve brandstoffen flink toegenomen. Brandstofprijzen stijgen nu harder dan de verhoging in MKW en de CO<sub>2</sub> prijs. Dat betekent dat MDO relatief beter af is dan voor de brandstofstijgingen. Uiteraard kan dit in de nabije toekomst weer andersom omslaan. Ook is bij een schaalvergroting van de productiecapaciteit van duurzame brandstoffen de verwachting dat de prijs in de toekomst zal dalen.

### Vaarafstand

Vergroten van de vaarafstand doordat de zandwingebieden steeds verder weg komen te liggen heeft een negatieve invloed op de prijsontwikkeling, de MKW en op de te kiezen suppletie variant. Vanaf ongeveer 50km afstand verandert de voorkeur suppletievariantie van de onderwatersuppletie naar het schiereiland, dit komt met name door de beperkingen in de uitvoering bij de inzet van grotere sleephopperzuigers. De grotere sleephopperzuigers zijn efficiënter bij langere vaarafstanden.

Bij een vaarafstand van >35km wordt de windiepte steeds dieper, kleine sleephopperzuigers vallen vanaf deze vaarafstand af. Voor de grotere sleephopperzuigers die dan nodig zijn moeten langere zinkerleidingen worden toegepast omdat deze sleephopperzuigers dieper steken en daardoor minder dicht onder de kust kunnen komen. Voor het transporteren van zand over langere afstanden zijn de grotere sleephopperzuigers ook in het voordeel omdat er minder vaarbewegingen gemaakt worden voor eenzelfde hoeveelheid zand.

## 9.3 Kennisleemte en limitaties

In dit onderzoek zijn een aantal uitgangspunten aangehouden. Dit onderzoek komt tot een nauwkeurige benadering, maar het blijft beperkt tot een inschatting omdat er niet altijd voldoende informatie beschikbaar is. Zo is bijvoorbeeld in Hoofdstuk 5 toegelicht dat niet alle innovatieve uitvoeringsmethoden zijn onderzocht, omdat deze nog niet in een ver genoeg stadium van ontwikkeling zijn en/of de informatie hiervan niet publiekelijk toegankelijk is om onderbouwde conclusies te trekken. Daarnaast zijn er nog een aantal kennisleemtes en limitaties van de berekening van de kosten en de MKI die hieronder worden toegelicht.

### 9.3.1 Limitaties berekeningen Kosten

De kostenberekeningen zijn gebaseerd op een aantal aannames voor de inzet van (hulp)materieel horende bij een bepaalde werkmethode en de daarbij horende weekproductie en energieverbruik. Van baggermaterieel en met name sleephopperzuigers zijn er bijna geen twee dezelfde schepen, wat betekent dat kosten, producties en energieverbruik ook sterk van elkaar kunnen afwijken. Ook voor hulpmaterieel (koppelboot, personeels-/survey vaartuig, persleidingen en grondverzetmaterieel) zijn deze aannames gedaan zowel in type als in te zetten aantallen.

Een andere grote kostencomponent zijn de kosten voor energieverbruik. Deze kosten zijn onderhevig aan grote schommelingen als gevolg van internationale ontwikkelingen en de daaruit voorkomende marktwerking. Daarnaast worden onder andere voor biobrandstoffen momenteel nog subsidies verstrekt om deze aantrekkelijk te maken, maar deze subsidies zullen worden afgebouwd. Kortom de in de kosten gebruikte brandstofprijzen zijn een moment opname, in dit geval van januari 2021.

De berekende kosten in dit rapport zijn daarom slechts een indicatie van de mogelijke kosten voor een suppletieconcept en dienen met een bandbreedte van plus minus 20% beschouwd te worden.

Met betrekking tot de “Alternatieve brandstof” als waterstof of methanol het volgende: Sleephopperzuigers die voor de energievoorziening gebruik maken van deze alternatieve brandstoffen zijn momenteel nog in ontwikkeling en niet operationeel. De operationele kosten van een dergelijke sleephopperzuiger zijn dan ook gebaseerd op die van een traditionele sleephopperzuiger met een toeslagpercentage voor de extra investeringen, operationele kosten en lagere productie omdat minder lading kan worden meegenomen (als gevolg van een hoger constructiegewicht). Dit percentage is gebaseerd op het rapport van de sleephopperzuiger Willem van Oranje vanuit “Green maritime methanol” (Harmsen, 2021). Ook het extra brandstofverbruik ten opzichte van MDO als gevolg van een lagere energiedichtheid is een aanname omdat hier nog geen grootschalige ervaringen mee zijn opgedaan. De berekende kosten en milieukosten met “Alternatieve brandstof” in dit rapport zijn dan ook niet meer dan een eerste indicatie. Veel aspecten dienen nog nader onderzocht te worden om tot een gedegen kostenraming te komen. Schaalvergroting en een eenduidige rekenmethode zal de impact van deze brandstoffen in de toekomst moeten uitwijzen.

### 9.3.2 Limitaties berekeningen MKI

De MKI-waarde van MGO, HVO, GTL, LNG en Bio-LNG zijn afkomstig uit hetzelfde onderzoek, namelijk Jochemsens-Verstraeten et al., (2016). Dit heeft als reden dat dit onderzoek haast altijd wordt aangehaald in contractseisen van suppletiecontracten van Rijkswaterstaat en dit derhalve de uitvoeringsmethoden goed weerspiegelt. Daarnaast betreft dit ook de verbranding van scheepsbrandstoffen in een sleephopperzuiger. Er zijn echter meer LCA's en onderzoeken verricht naar brandstoffen, die hiermee dus maar beperkt zijn meegenomen. Dit heeft ook als reden dat een uitgebreide literatuurstudie naar milieueffect-resultaten uit onderzoek naar scheepbrandstoffen niet in de scope van dit onderzoek viel. Het is echter wel aannemelijk dat een dergelijke analyse een afwijkende MKI-waarde zou kunnen hebben gegeven. Dit onderzoek heeft daarmee de meest voorkomende referentiegetallen uit suppletiecontracten aangehouden en benaderd daarmee de praktijk.

Methanol is berekend op basis van de reductie van CO<sub>2</sub> equivalenten in de productiefase en er is een aanname gedaan van een reductie van 10% van de MKI-waarde door een forse reductie in NO<sub>x</sub> en PM<sub>10</sub>. De productie van MGO is hierin als referentie genomen, ook omdat de productiefase van HVO niet veel afwijkt van MGO in Jochemsens-Verstraeten et al., (2016). Voor waterstof is een soortgelijke aanname gemaakt door verduurzaming van blauwe of groene productiemethodes te relateren aan de uitstoot van de productie van fossiele waterstof conform Jochemsens-Verstraeten et al., (2016). De reductie van broeikasgassen is onderbouwd door middel van een beperkte literatuurstudie. Zowel voor waterstof als voor methanol mist een degelijke LCA omdat dit ook buiten de scope van dit onderzoek valt. Het is aannemelijk dat de MKI-waarde voor methanol en waterstof af zal wijken van de uitkomsten van een eventuele latere LCA.

### 10 Aanbevelingen

Op het moment is de overheid hard bezig om samen met de markt (o.a. met marktconsultaties) een lange termijn strategie te ontwikkelen. Er is nu onvoldoende zekerheid om grote verduurzamingsinvesteringen te doen voor de markt. We bevelen dan ook aan om op korte termijn samen met de markt keuzes te maken waardoor er meer zekerheid wordt geboden. Als voorbeelden kunnen contracten met een langere uitvoeringstermijn of innovatietrajecten waarbij risico's worden gedeeld de terugverdientijd en de benodigde zekerheid bieden.

Een andere aanbeveling is een nader onderzoekstraject naar de berekening van MKI-waarden voor baggerschepen op alternatieve brandstoffen en dit aan te houden als branchegemiddelden. Dit wordt nu ook gedaan voor brandstoffen als MDO en HVO. Dit geeft aannemers een duidelijke referentie om investeringen te doen m.b.t. de aanschaf van nieuwe schepen en retrofit.

De MKI en MKW-waarden kunnen en worden in bestekken toegepast om werken milieuvriendelijker uit te voeren. Deze tool is bruikbaar, maar men moet wel de achtergrond bewaken, de opbouw van de MKI kan in verloop van tijd achterhaald worden. We bevelen dan ook aan om de TNO rapportages regelmatig te updaten en de CO2 prijs op regelmatige basis (bijvoorbeeld om de 5 jaar) te actualiseren.

Om het suppleren op de Nederlandse kust economisch verantwoord te houden en uitvoerbaar te houden met kleinere sleepers, is het belangrijk dat de zandwingebieden niet verder dan 35km uit de kust komen te liggen. Met de indeling van de Noordzee voor wingebieden, windmolenparken kabels en leidingen dient hier rekening mee gehouden te worden. Nu worden windmolenparken binnen deze zone gebouwd, maar die kunnen ook verder op zee gebouwd worden. Ook het toepassen van kabelstroken op de Noordzee kan ervoor zorgen dat er meer ruimte blijft voor Zandwingebieden.

Daarnaast moet er rekening worden gehouden met de aanleg van de infrastructuur en benodigde wet- en regelgeving om suppleren op alternatieve brandstoffen ook praktisch mogelijk te maken, denk hierbij aan voldoende bunkermogelijkheden en beschikbaarheid van deze brandstoffen.

## 11 Afkortingen

Afkorting	Omschrijving
ADP	Abiotic Depletion Potential
AP	Acidification Potential
AUMD	Autonomous Underwater Maintenance Dredger
CO	Koolstofmonoxide
CO <sub>2</sub>	Koolstofdioxide
CO <sub>2</sub> -103	Een MKI berekend met een weegfactor van EUR 103/ton CO <sub>2</sub>
EP	Eutrophication Potential
FAETP	Freshwater Aquatic EcoToxicity potential
GTL	Gas To Liquid
GWP	Global Warming Potential
http	Human Toxicity Potential
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil
IKZ	Innovaties in de Kustlijnzorg
LCA	Life Cycle Assessment (/ Levenscyclusanalyse)
LNG	Liquefied Natural Gas
MAETP	Marine Aquatic EcoToxicity Potential
MDO	Marine Diesel Oil
MKI	Milieukostenindicator
MKW	Milieukostenwaardering
NAP	Normaal Amsterdams Peil
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NO <sub>x</sub>	Stikstofoxiden
ODP	Ozone Depletion Potential
PM	Particulate Matter
POCP	Photo-Oxidant Creation Potential
Q8A	Gebied voor zandwinning op de Noordzee
SHZ	Sleephopperzuiger
SO <sub>x</sub>	Sulfur oxide
TETP	Terrestrial EcoToxicity Potential
TNO	Nederlandse Organisatie voor Toegepast Natuurwetenschappelijk Onderzoek
TRL	Technology Readiness Level
ZEDHub	Zero Emission Dredging Hub

## 12 Referenties

- Aronietis, Raimonds & Sys, Christa & van Hassel, Edwin & Vanelslander, Thierry. (2016). Forecasting port-level demand for LNG as a ship fuel: the case of the port of Antwerp. *Journal of Shipping and Trade*. 1. 10.1186/s41072-016-0007-1.
- Baptist, M. J. (2011). *Zachte kustverdediging in Nederland; scenario's voor 2040*. 62.
- Brand, E., Ramaekers, G., & Lodder, Q. (2022). Dutch experience with sand nourishments for dynamic coastline conservation – An operational overview. *Ocean and Coastal Management*, 217. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.106008>
- CIRIA (2009), "A guide to cost standards for standard equipment".
- de Schipper, M. A., Ludka, B. C., Raubenheimer, B., Luijendijk, A. P., & Schlacher, T. A. (2021). Beach nourishment has complex implications for the future of sandy shores. In *Nature Reviews Earth and Environment* (Vol. 2, Issue 1, pp. 70–84). Springer Nature. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00109-9>
- Dyson, A., Victory, S., & Connor, T. (2001). *Sand Bypassing the Tweed River Entrance: An Overview*.
- Ebbens, E., & Litjens, J. (2019). *Tussenrapportage Pilotsuppletie Buitendelta Amelanders Zeegat*. april.
- Fazil Qureshi, Mohammad Yusuf, Hesam Kamyab, Dai-Viet N. Vo, Shreeshivadasan Chelliapan, Sang-Woo Joo, Yasser Vasseghian, (2022). Latest eco-friendly avenues on hydrogen production towards a circular bioeconomy: Currents challenges, innovative insights, and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*
- Harmsen, J. (2021). Green Maritime Methanol. Towards a zero emission shipping industry.
- Hoekstra, R., Walstra, D. J. R., & Swinkels, C. S. (2012). *Pilot Project Sand Groynes Delfland*. <https://rwsinnoveert.nl/@215841/innovaties-kustlijnzorg/>
- Huisman, B. (2021). *Evaluatie van 10 jaar Zandmotor*.
- Huisman, B. J. A., Walstra, D. J. R., Radermacher, M., de Schipper, M. A., & Ruessink, B. G. (2019). Observations and modelling of shoreface nourishment behaviour. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/jmse7030059>
- Jochemsen-Verstraeten, J., de Vos-Effting, S. E., Keijzer, E. E., Dellaert, S. N. C., Horssen, A. V., van Gijlswijk, R. N., & Hulskotte, J. H. J. (2016). *Milieuprofielen van scheepsbrandstoffen ten behoeve van opname in de Nationale Milieudatabase* (No. **TNO 2016 R10662**). TNO.
- Koster, L. (2006). *Humplike nourishing of the shoreface*.
- Mulder, J. P. M., & Tonnon, P. K. (2011). " SAND ENGINE " : BACKGROUND AND DESIGN OF A MEGA-NOURISHMENT PILOT IN THE NETHERLANDS. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), 35. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.management.35>
- Port of Rotterdam. (2021, May 14). Eerste Bunkering Wereldwijd van methanol per bunkerschip in Rotterdam door waterfront shipping, Vopak, NYK En tankmatch. Retrieved October 26, 2022, from <https://www.portofrotterdam.com/nl/nieuws-en-persberichten/eerste-bunkering-wereldwijd-van-methanol-bunkerschip-rotterdam-door>
- Rijkswaterstaat. (2020). *Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust*.
- Schlacher, T. A., Noriega, R., Jones, A., & Dye, T. (2012). The effects of beach nourishment on benthic invertebrates in eastern Australia: Impacts and variable recovery. *Science of the Total Environment*, 435–436, 411–417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.071>
- Stive, M. J. F., de Schipper, M. A., Luijendijk, A. P., Aarninkhof, S. G. J., van Gelder-Maas, C., van Thiel de Vries, J. S. M., de Vries, S., Henriquez, M., Marx, S., & Ranasinghe, R. (2013). A New Alternative to Saving Our Beaches from Sea-Level Rise: The Sand Engine. *Journal of Coastal Research*, 29(5), 1001–1008. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-13-00070.1>
- van Duin, M. J. P., Wiersma, N. R., Walstra, D. J. R., van Rijn, L. C., & Stive, M. J. F. (2004). Nourishing the shoreface: Observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 813–837. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.011>
- van Koningsveld, M., & Mulder, J. P. M. (2004). Sustainable Coastal Policy Developments in The Netherlands. A Systematic Approach Revealed. In *Journal of Coastal Research* (Vol. 20).

van Zyl, Verbeek, Roeien & Mentink, 2020. Routeradar 2019 Innovatiemonitor. RWS.  
[https://rwsduurzamemobiliteit.nl/publish/pages/192393/rr\\_2019\\_innom\\_technekontwikkeling\\_def\\_201008.pdf](https://rwsduurzamemobiliteit.nl/publish/pages/192393/rr_2019_innom_technekontwikkeling_def_201008.pdf)  
Volume 168, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112916>.  
WL | Delft hydraulics, RIKZ, & Rijkswaterstaat. (2006). *Ontwerprichtlijnen Onderwatersuppleties*.

### 13 Bijlagen

Bijlage 1: Kostenindicatie Megasuppleties Versie 9.0 2023

Bijlage 2: Conclusies Kostenindicatie Megasuppleties Versie 9.0 2023

Bijlage 3: Productsheets Innovaties in de Kustlijnzorg (IKZ)

Bijlage 4: Equipment Sheet Strandway