

Memo

Datum

20 Januari 2023

Contactpersoon

Bart van Westen

E-mail

B.vanWesten@TUDelft.nl

Aantal pagina's

1 van 13

Onderwerp

Inventarisatie kustonderhoudsconcepten voor de Dutch Coastline Challenge

Inhoudsopgave

1	Inleiding	2
1.1	Classificatie kustonderhoudsconcepten	3
1.2	Leeswijzer	3
2	Reguliere onderhoudssuppleties	4
2.1	Vooroeversuppletie	4
2.2	Strandsuppletie	5
2.3	Geulwandsuppletie	5
2.4	Overige varianten op strand- en vooroeversuppleties	5
3	Megasuppleties	7
3.1	Op het strand	7
3.2	Op de vooroever	8
3.3	Op de buitendelta of geulwand	8
4	Continue suppleties	9
5	Bevindingen en vervolgstappen	10
	Referenties	11

Review procedure.

Deze memo is tot stand gekomen en intern gereviewd door het DCC project team bij de Technische Universiteit Delft (Bart van Westen, Arjen Luijendijk and Matthieu de Schipper) met als doel achtergrond informatie te bieden voor de eindrapportage van het Dutch Coastline Challenge (DCC Syntheserapport 2023).

1 Inleiding

Het algemene doel van het Topconsortia Kennis & Innovatie project Dutch Coastline Challenge (in het vervolg 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.

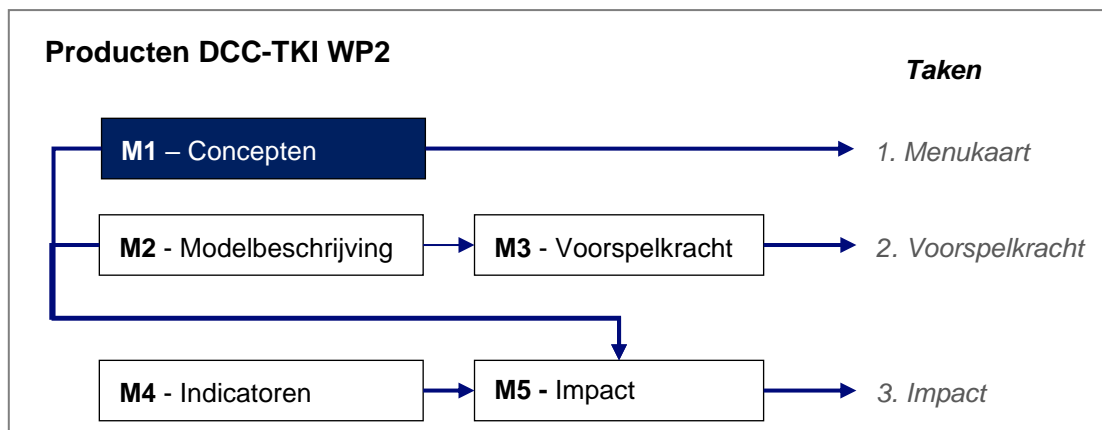
Binnen werkpakket 2 (WP2) staat de volgende vraag centraal: Welke alternatieve onderhoudsconcepten zijn beschikbaar en wat is hun impact op het fysisch en ecologisch systeem? Deze vraagstelling wordt onderzocht aan de hand van drie taken:

- (1) Het maken van een *menukaart* van alternatieve concepten en hun mogelijke impact,
- (2) het evalueren van de huidige morfologische *voorspelkracht* en
- (3) het evalueren van de *impact* van geselecteerd kustonderhoudsconcepten.

Deze memo is de eerste van vijf memo's die gezamenlijk de producten vanuit WP2 vormen. Deze memo's zijn:

- Memo 1 (M1): Inventarisatie kustonderhoudsconcepten voor de Dutch Coastline Challenge. (Engels: *Description of the inventory of nourishment alternatives.*)
- Memo 2 (M2): Beschrijving van de opzet van het Delft3D FM model en validatie van de hydrodynamica. (Engels: *Description of the setup of the Delft3D Flexible Mesh model and validation of the hydrodynamics.*)
- Memo 3 (M3): Evaluatie van de morfologische voorspelkracht van het Delft3D FM model op basis van Zandmotor simulaties. (Engels: *Evaluation of the morphological predictive skills of the Delft3D FM model based on simulations of the Sand Engine.*)
- Memo 4 (M4): Beschrijving van de morfologische en ecologische indicatoren die worden gebruikt voor M5. (Engels: *Morphological and ecological indicators for the Dutch Coastline Challenge nourishment evaluation.*)
- Memo 5 (M5): Evaluatie van de kustonderhoudsconcepten op de indicatoren uit M4. (Engels: *Morphological and ecological evaluation of nourishment concepts.*)

Het overzicht van de samenhang tussen de memo's onderling en in relatie tot de taken van WP2 is weergegeven in Figuur 1. Het doel van deze eerste memo (Memo 1) is om beschikbare en innovatieve kustonderhoudsconcepten te inventariseren (de zgn. *menukaart*). De impact van de geselecteerde kustonderhoudsconcepten op de morfologische en ecologische indicatoren (Memo 4) op basis van simulaties met het morfologische model (Memo 2 en 3) is gerapporteerd in Memo 5.



Figuur 1 Overzicht van te leveren producten (memo's) binnen het DCC-TKI project, de relatie met de taken van WP2 en de onderlinge relaties.

1.1 Classificatie kustonderhoudsconcepten

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 basiskustlijn¹ en het kustfundament² te onderhouden.

De onderhoudsconcepten zijn geïdentificeerd op basis van literatuurstudie, praktijkervaringen uit het verleden en brainstorm sessies. 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 Mm³ 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 suppletietypes kunnen op verschillende plekken in het dwarsprofiel worden aangebracht, zoals op de vooroever (§x.1), het strand (§x.2), een buitendelta of een geulwand (§x.3). 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.

1.2 Leeswijzer

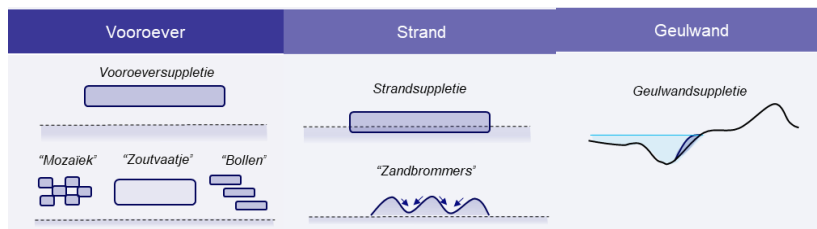
De hoofdtekst van deze memo is onderverdeeld op basis van de drie gedefinieerde onderhoudsconcepten: reguliere onderhoudssuppleties (hoofdstuk 2), megasuppleties (hoofdstuk 3) en continue suppleties (hoofdstuk 4). Deze hoofdstukken zijn verder onderverdeeld op basis van suppletielocatie in het dwarsprofiel. In hoofdstuk 5 zijn de onderhoudsconcepten samengebracht in een samenvattend overzicht en worden de vervolgstappen beschreven.

¹ 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.

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

2 Reguliere onderhoudssuppleties

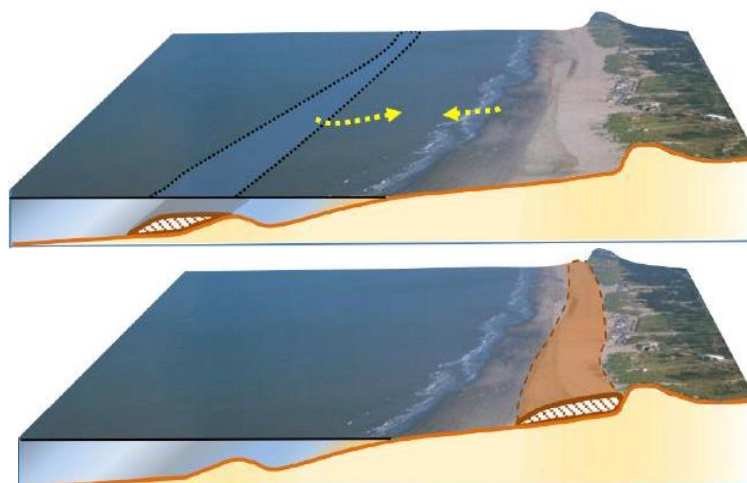
Reguliere onderhoudssuppleties zijn de “standaard” voor het onderhouden van de Nederlandse kust binnen Kustlijnzorg (het kustonderhoudsprogramma van Rijkswaterstaat). Er is in de afgelopen decennia veel ervaring opgebouwd met dit suppletietype. Bij reguliere suppleties wordt regelmatig, met een tussenliggende periode van 1 tot 10 jaar een zandvolume van 0,1-5 miljoen m³ aangebracht op de vooroever, op het strand of op een geulwand (zie Figuur 2). Deze concepten worden hieronder kort toegelicht.



Figuur 2 Overzicht van reguliere onderhoudssuppleties. De eerste 2 kolommen tonen bovenaanzichten, laatste kolom een geulwandsuppletie in zijaanzicht.

2.1 Vooroeversuppletie

Vooroeversuppleties worden onderwater, zeewaarts van het strand aangelegd, op de vooroever (zie Figuur 3 en Figuur 4, rechts). Het zand wordt door de sleeplopperzuigers op de zeebodem aangebracht door de bodemkleppen te openen. Incidenteel is gebruik gemaakt van rainbowen, waarbij het zand vanaf de boeg van de sleeplopperzuiger met een grote boog door de lucht wordt gespoten. Uit zowel theoretische studies als ervaring in het veld komt naar voren dat vooroeversuppleties niet alleen net zo effectief waren als strandsuppleties (zie § 2.2), 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 vooroeversuppleties is ca. 5 jaar. Ze hebben een kustlangse grootte van ca. 350-500 m³/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 vooroeversuppleties op de MKL-zone en strandbreedte is lastig in universele getallen te vatten. Op lange tijdschaal is waargenomen dat de BKL volumes in stand worden gehouden door vooroeversuppleties (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 Grafische weergave van vooroeversuppleties waarbij het zandpakket voor de kust op de vooroever wordt gesuppleerd (boven) en van strandsuppleties waarbij het zandpakket tegen de duinvoet aan wordt gesuppleerd (onder). Aangepast van (Stive et al., 2013)

2.2 Strandsuppletie

De conventionele manier van het suppleren van zand is doormiddel van strandsuppleties (de Schipper et al., 2021). Hierbij wordt zand direct op het strand of tegen de duinvoet aangelegd (zie Figuur 3 en Figuur 4, links). Het aanleggen van een strandsuppletie betekent dat het zand vanuit het schip naar het strand wordt gepompt via een grote buisleiding. 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. Strandsuppleties langs de Nederlandse kust hebben een kustlangse omvang volume van ca. 200 m³/m kustlangs 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 4 Foto's van de aanleg van een strandsuppletie (links) en het opsputten, of rainbowed, van een vooroeversuppletie (rechts). Bron: natuurlijkveilig.nl

2.3 Geulwandsuppletie

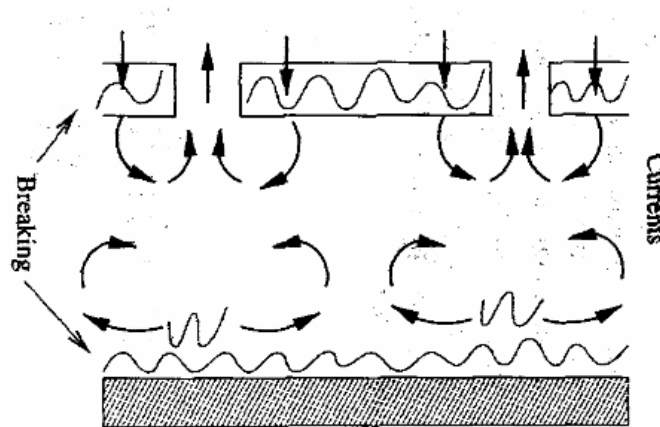
Geulwandsuppleties worden uitgevoerd op die plekken bij de kust waar een getijdegeul direct voor de kust aanwezig is, in de Zeeuwse delta en bij de Wadden. Een geulwandsuppletie wordt zeewaarts onder water aangebracht op de geulwand tegen de landwaartse oever van de getijdegeul. De eerste geulwandsuppleties stammen uit 1952 en 1966 (Baptist, 2011). Vervolgens zijn geen geulwandsuppleties uitgevoerd tot 1987. Sinds 2003 zijn er dertien geulwand suppleties uitgevoerd, met een gemiddelde volume van 2.4 Mm³ en een kustlangse omvang variërend van 400-2000 m³/m (Brand et al., 2022).

2.4 Overige varianten op strand- en vooroeversuppleties

Op de bovenstaande reguliere strand, vooroever en geulwand en suppleties 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.

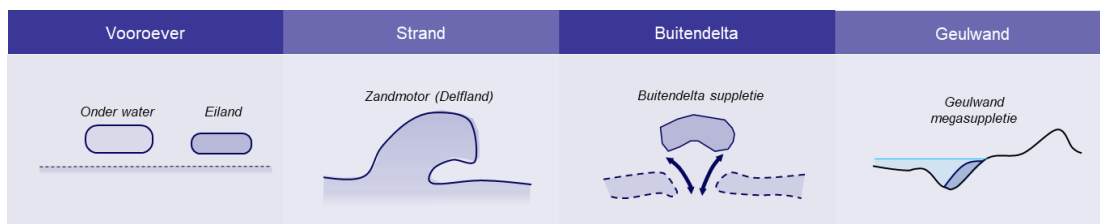
Daarnaast zijn er varianten bedacht voor suppleties op de vooroever waarvan de intentie is om de gevolgen voor het bodemleven te beperken. Een voorbeeld hiervan is de "mozaïeksuppletie" waarbij gebieden met bedelving worden afgewisseld met delen zonder bedelving (Schlacher et al., 2012). Een ander voorbeeld 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 5 Bovenaanzicht van de Bollen suppletie concept (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 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 6). Daarnaast kan het zand in geconcentreerde vorm worden aangebracht (feeder mega nourishments), zoals bij de Zandmotor bij Kijkduin (Stive, 2013), of kustlangs uitgespreid.

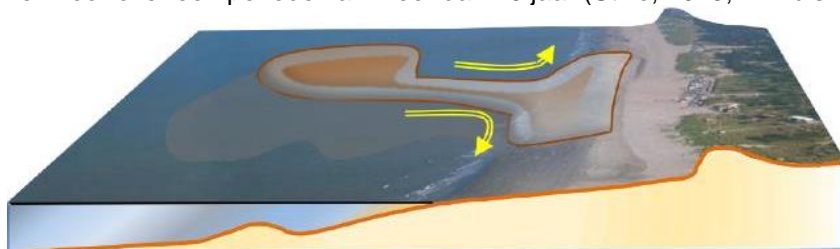


Figuur 6 Overzicht van alternatieve megasuppleties

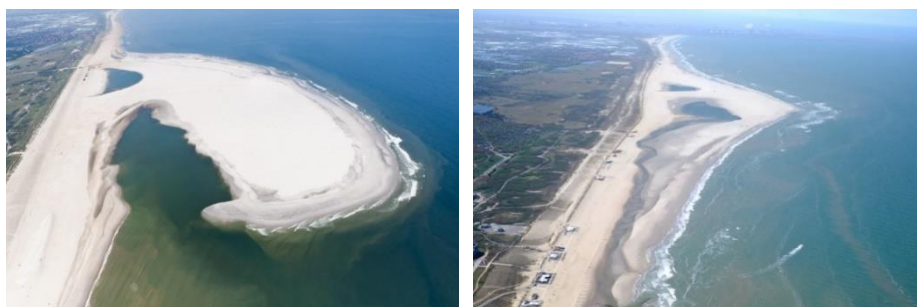
3.1 Op het strand

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 7 en Figuur 8). 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 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).



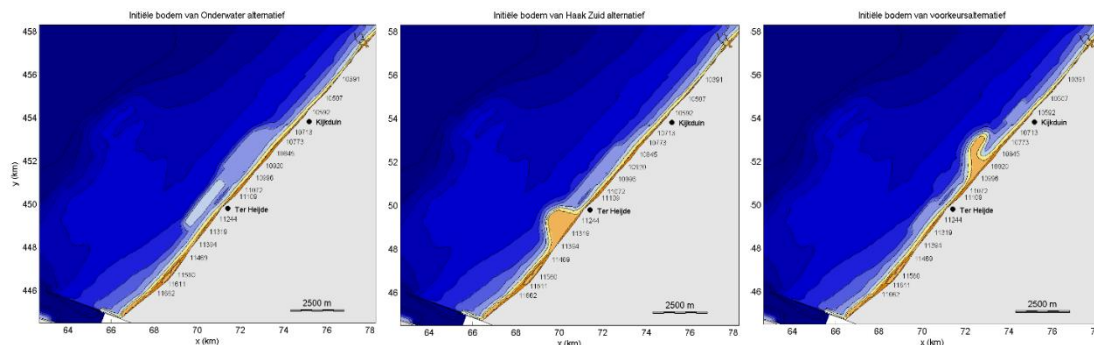
Figuur 7 Grafische weergave van zandmotorsuppleties waarbij een grote hoeveelheid zand voor de kust wordt gesuppleerd. Bron: (Stive et al., 2013).



Figuur 8 De Zandmotor direct na aanleg (2011, links) en na 4 jaar morfologische ontwikkeling (2015, rechts).
Bron: www.flickr.com/photos/zandmotor/

3.2 Op de vooroever

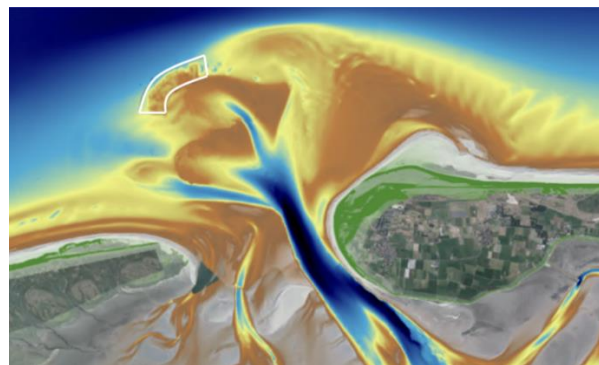
Concepten voor megasuppleties die zeewaarts en los van het strand op de vooroever worden aangelegd zijn zeer grote zandbanken die volledig onder water liggen of die een eiland vormen voor de kust. Alhoewel er met deze concepten voor megasuppleties geen praktijkervaringen zijn opgedaan, is er tijdens 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 kleppen 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 9 Megasuppletie alternatieven op de vooroever (links), belvormig (midden) en haakvorming (rechts).
Bron: (Mulder & Tonnon, 2011)

3.3 Op de buitendelta of geulwand

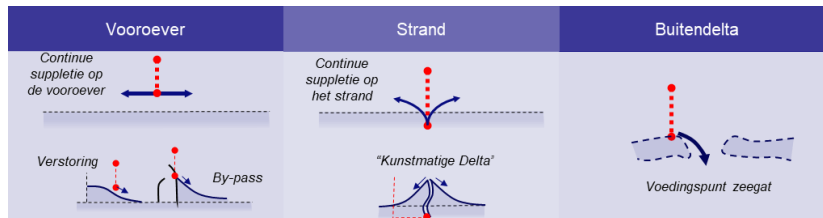
De buitendelta's zijn de gebieden zeewaarts van de zeegaten, die uit zowel ondieptes (zandbanken) als getijdegeulen bestaan. De aanwezigheid van buitendelta's is verbonden met de zeegaten van de Wadden. Ook de mondingsgebieden van de Ooster- en Westerschelde worden beschouwd als buitendelta's. Bij een 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 4, Ebbens & Litjens, 2019).



Figuur 10 Weergave van buitendelta megasuppletie bij het Amelander Zeegat. Bron: Ebbens & Litjens (2019).

4 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 11). Op dit moment is in Nederland nog geen praktijkervaring met dit type suppleties.



Figuur 11 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 (Dyson et al., 2001), welke is getoond in Figuur 12.



Figuur 12 Weergave van de Tweed River sediment bypass in Australië, met de layout van het persleidingssysteem (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 kustlangse 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.

5 Bevindingen en vervolgstappen

In deze memo hebben we een overzicht gepresenteerd van bestaande en innovatieve suppletieconcepten aan de hand van literatuur, workshops, voorgaande en lopende programma's. Per suppletiecategorie zijn er tal van alternatieve concepten denkbaar, welke een mogelijk positieve meerwaarde kunnen bieden op het gebied van kosten, emissies, recreatie en ecologie. Om een structureel overzicht te geven, hebben we een classificatie aangebracht op basis van suppletietype en -locatie (zie Figuur 13 en Figuur 14 voor een vergrote versie):

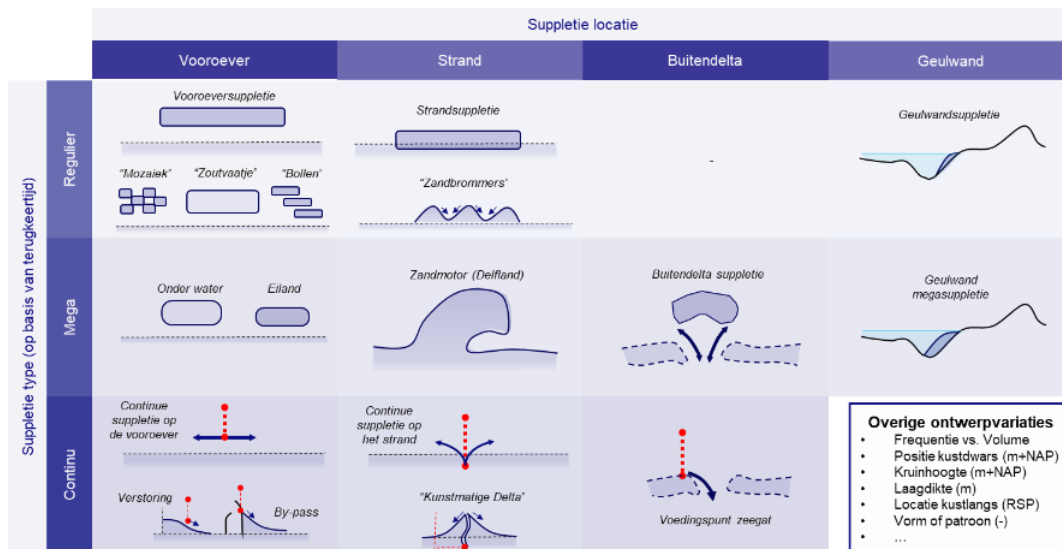
Suppletietypes

- Reguliere onderhoudssuppleties
- Megasuppleties
- Continue suppleties

Suppletielocaties

- Vooroever
- Strand
- Buitendelta
- Geulwand

Om de oplossingsruimte te verkennen buiten de reguliere suppleties is in het TKI-DCC vooral gekeken naar het gedrag van megasuppleties en continue suppleties. Voor deze concepten is de morfologische en ecologische impact geëvalueerd aan de hand van kustindicatoren (Technische Universiteit Delft, 2023d; Technische Universiteit Delft, 2023e; memo's 4 en 5 in Figuur 1) die worden gekwantificeerd met numerieke simulaties (Technische Universiteit Delft, 2023b; Technische Universiteit Delft, 2023c). Voor de evaluatie van de concepten is het kustdeelvak Egmond-Bergen gebruikt als proeftuin (Technische Universiteit Delft, 2023e).



Figuur 13 Overzicht suppletieconcepten binnen de Dutch Coastline Challenge. De indeling van concepten is gebaseerd op terugkeertijd en locatie (in het dwarsprofiel)

Referenties

- 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>
- 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*.
- Hoekstra, R., Walstra, D. J. R., & Swinkels, C. S. (2012). *Pilot Project Sand Groynes Delfland*.
- 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>
- 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>
- 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>
- Technische Universiteit Delft (2023a). TKI Dutch Coastline Challenge: Description of the inventory of nourishment alternatives. *Memo TU Delft*.
- Technische Universiteit Delft (2023b). TKI Dutch Coastline Challenge: Description of the setup of the Delft3D Flexible Mesh model and validation of the hydrodynamics. *Memo TU Delft*.
- Technische Universiteit Delft (2023c). TKI Dutch Coastline Challenge: Evaluation of the morphological predictive skills of the Delft3D FM model based on simulations of the Sand Engine. *Memo TU Delft*.

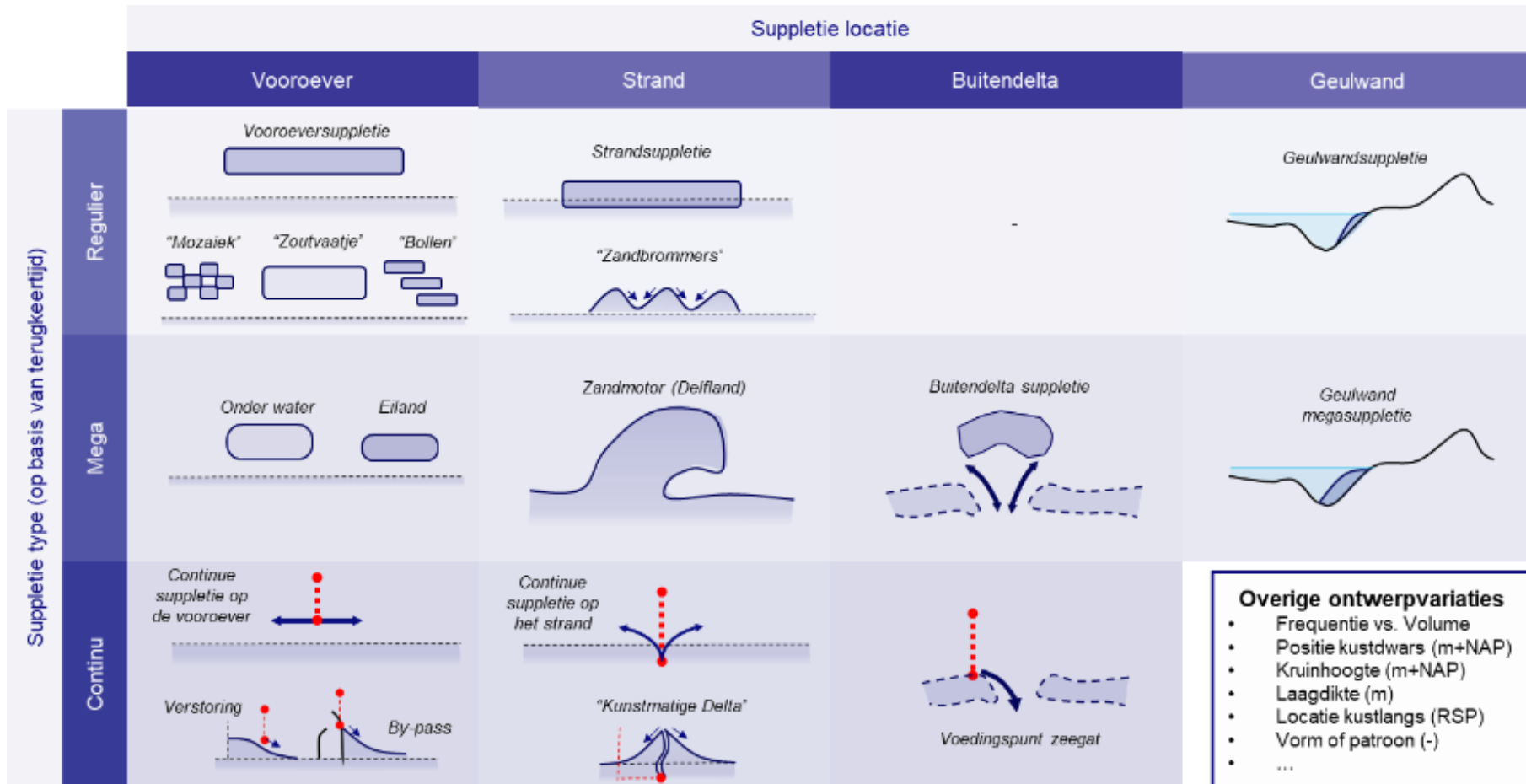
Technische Universiteit Delft (2023d). TKI Dutch Coastline Challenge: Morphological and ecological indicators for the Dutch Coastline Challenge nourishment evaluation. *Memo TU Delft*.

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

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).

WL | Delft hydraulics, RIKZ, & Rijkswaterstaat. (2006). *Ontwerprichtlijnen Onderwatersuppleties*.



Figuur 14 Overzicht suppletieconcepten binnen de Dutch Coastline Challenge. De indeling van concepten is gebaseerd op terugkeertijd en locatie (in het dwarsprofiel)