

## TKI Dutch Coastline Challenge - Werkpakket 1

Systeemkennis morfologie en toekomstprojectie suppletieopgave voor de kustvakken Noord-Holland en Texel



## **TKI Dutch Coastline Challenge - Werkpakket 1**

Systeemkennis morfologie en toekomstprojectie suppletieopgave voor de kustvakken Noord-Holland en Texel

### **Auteur(s)**

Björn Röbbke

Lodewijk de Vet

Giorgio Santinelli

Harriëtte Meijer - Holzhauer

## TKI Dutch Coastline Challenge - Werkpakket 1




Systeemkennis morfologie en toekomstprojectie suppletieopgave voor de kustvakken Noord-Holland en Texel

<b>Opdrachtgever</b>	TKI Deltatechnologie
<b>Contactpersoon</b>	Björn R. Rübke
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	TKI Dutch Coastline Challenge, morfologie Noord-Holland, morfologie Texel, kustsuppleties, toekomstprojectie suppletieopgave

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	08-10-2021
<b>Projectnummer</b>	11207047-001
<b>Document ID</b>	11207047-001-HYE-0001
<b>Pagina's</b>	55
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)


Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Björn R. Rübke	Ad van der Spek	Dirk-Jan Walstra	
				

**Deltares**

 VERENIGING VAN  
WATERBOUWERS



Rijkswaterstaat  
Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

 **TU Delft**

  
**EcoShape**  
building with nature

# Samenvatting

Zandsuppleties spelen een cruciale rol in het onderhoud van de Nederlandse kust. Het beleid is om voor dit onderhoud jaarlijks 12 mln (miljoen) m<sup>3</sup> zand te suppleren. Suppleties gaan gepaard met scheepsbewegingen en inzet van materieel en daaruit volgende broeikasgas- en stikstofemissies. Ook vindt er bij de winning en depositie van het sediment verstoring van de bodem en daarmee het ecologische systeem plaats. Het is de verwachting dat er in de toekomst meer gesuppleerd moet gaan worden bij verdere zeespiegelstijging. Het Topconsortia Kennis & Innovatie project Dutch Coastline Challenge (in het vervolg TKI-DCC) is een samenwerking tussen overheid (Rijkswaterstaat), bedrijfsleven (Vereniging van Waterbouwers en EcoShape) en kennisinstellingen (Technische Universiteit Delft en Deltares) om nieuwe kennis en ervaring te ontwikkelen voor het verduurzamen, natuur-inclusiever maken en opschalen van het kustonderhoud. Het TKI-DCC project ontwikkelt alternatieve kustonderhouds-/suppletieconcepten, uitvoeringsmethoden, samenwerkings- en contractvormen en focust daarbij specifiek op de kustvakken Noord-Holland en Texel. Hierbij ligt de nadruk op de middellange termijn (van nu tot 2035), maar er is ook aandacht voor het opschalen naar de langere termijn (voorbij 2035), anticiperend op mogelijk versnelde zeespiegelstijging.

Het TKI-DCC project is onderverdeeld in 6 werkpakketten. Dit rapport is een product van Werkpakket 1 – *Systeemkennis morfologie en toekomstprojectie suppletieopgave* en vormt de basis voor de andere werkpakketten waarin de alternatieve suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden worden uitgewerkt. Dit rapport beschrijft het systeemgedrag van de kustvakken Noord-Holland en Texel, zet de kennis van de huidige suppletiepraktijk in deze kustvakken uiteen en geeft een verwachting van de suppletiehoeveelheden en -locaties voor de komende 15 jaar op basis van deze huidige praktijk. Dit is de benchmark waartegen de nieuwe suppletieconcepten en uitvoeringsmethoden in de andere werkpakketten zullen worden afgezet. Voorts geeft het rapport hiertoe een toekomstprojectie van de suppletieopgave, -kosten en -emissies voor deze kustvakken voor de periode 2021–2035, net als van de milieukostenindicator (MKI) voor een kwantificatie van de milieueffecten. De uiteengezette systeemkennis en de toekomstprojecties faciliteren de nieuwe onderhoudsconcepten en de evaluatie van de morfologische en ecologische effecten gerelateerd aan deze concepten.

Zowel (i) de sedimentbehoefte van het kustfundament (de zone tussen de doorgaande NAP -20 m dieptelijn en de binnenduinrand en bij de zeegaten de kortste lijn tussen de aangrenzende oevers) als gevolg van zeespiegelstijging, bodemdaling en sedimentverliezen, als ook (ii) de suppletieopgave (te suppleren volume voor onderhoud van de basiskustlijn ten behoeve van de kustlijnfuncties) zijn beschouwd. Dit zijn twee verschillende grootheden omdat als er voldaan wordt aan de sedimentbehoefte van het kustfundament het zand niet noodzakelijk op de juiste plek in het systeem zit om de basiskustlijn te onderhouden. De verwachting is dat het onderhoud van de basiskustlijn zeker tot 2035 leidend blijft in de verdeling van het jaarlijks suppletievolume langs de Nederlandse kust. De sedimentbehoefte van het kustfundament wordt waarschijnlijk pas op de langere termijn, bij versnelde zeespiegelstijging, zo groot dat deze de suppletiepraktijk gaat leiden. Ook het onderhoud van de basiskustlijn zal door zeespiegelstijging beïnvloed gaan worden.

Concreet zijn de sedimentbehoefte van het kustfundament en de suppletieopgave als volgt geschat. De sedimentbehoefte van het kustfundament over de periode 2021–2035 wordt geschat op ongeveer 39 mln m<sup>3</sup> voor het kustvak Noord-Holland en 8 mln m<sup>3</sup> voor het kustvak Texel. Het grootste deel (60 %) van de sedimentbehoefte van het kustfundament van beide kustvakken samen bestaat uit compensatie van de export naar het bekken van het Zeegat van Texel. De suppletieopgave voor de periode 2021–2035 voor het kustvak Noord-Holland wordt

op basis van extrapolatie van historische suppletietrends op  $45\pm 3$  mln  $m^3$  geschat, waarvan 76 % in de vorm van vooroeversuppleties. Voor het kustvak Texel is in totaal  $25\pm 3$  mln  $m^3$  voorzien, waarvan 80 % in de vorm van vooroeversuppleties. Naast deze totale suppletievolumes is de te verwachten suppletieopgave ook ruimtelijk gedifferentieerd. De suppletieopgave is het grootst in de erosiegebieden rond Egmond, Bergen, Callantsoog, Julianadorp – Den Helder en het grootste deel van de Noordzeekust van Texel (afgezien van de omgeving van De Slufter en net ten zuiden van de Eierlandse Dam).

De toekomstprojecties van de suppletieopgave, -kosten en -emissie moeten gezien worden als een schatting aangezien deze gebaseerd zijn op een extrapolatie van de historische suppletietrends. Onzekerheden in de suppletievolumes zijn uitgedrukt als variatie van de trends. Benadrukt wordt dat er meer onzekerheden spelen. De toekomstprojectie is dus vooral bruikbaar als een schatting waartegen – in de andere werkpakketten – veranderingen in onderhoudsconcepten en uitvoeringsmethoden afgezet kunnen worden, waarbij rekening gehouden moet worden met de onderliggende aannamen en onzekerheden uit deze rapportage.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introductie en doelstelling</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Context: suppleties Nederlandse kust</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>Morfologie en uitgevoerde suppleties kustvak Noord-Holland</b>	<b>14</b>
3.1	Algemene gebiedsbeschrijving	14
3.2	Recent morfologisch systeemgedrag	16
3.3	Uitgevoerde suppleties	18
<b>4</b>	<b>Morfologie en uitgevoerde suppleties kustvak Texel en Zeegat van Texel</b>	<b>21</b>
4.1	Algemene gebiedsbeschrijving	21
4.1.1	Texel	21
4.1.2	Bekken van het Zeegat van Texel	22
4.2	Recent morfologisch systeemgedrag	23
4.2.1	Texel	23
4.2.2	Bekken van het Zeegat van Texel	25
4.3	Uitgevoerde suppleties	27
<b>5</b>	<b>Toekomstprojectie sedimentbehoefte kustfundament en suppletieopgave kustfuncties 2021–2035</b>	<b>29</b>
5.1	Methodiek	29
5.1.1	Bepaling toekomstprojectie sedimentbehoefte kustfundament	29
5.1.2	Bepaling toekomstprojectie suppletieopgave kustfuncties	30
5.2	Toekomstprojectie suppletievolumes en -frequentie	31
5.3	Toekomstprojectie suppletiekosten	37
5.4	Toekomstprojectie CO <sub>2</sub> -uitstoot en milieukostenindicator (MKI)	38
<b>6</b>	<b>Relevante ecologische aspecten</b>	<b>39</b>
6.1	Bodemdieren	39
6.2	Vogels	40
6.3	Zeehonden en vis	40
6.4	Zeereep en achterliggende duinen	40
6.5	Cumulatie van verstoringen en permanente veranderingen	41
<b>7</b>	<b>Synthese</b>	<b>42</b>
7.1	Aanbevelingen voor gebruik toekomstprojectie	42
7.2	Vervolgstappen	43
	<b>Referenties</b>	<b>45</b>
	<b>Bijlage</b>	<b>49</b>



# 1 Introductie en doelstelling

Zandsuppleties spelen een cruciale rol in het onderhoud en de versterking van de Nederlandse kust. Zandsuppleties zijn, voor een dynamische kust als die van Nederland, een doelmatige methode om de zandbalans in evenwicht te houden en om kustachteruitgang tegen te gaan (zie verdere details in Hoofdstuk 2). Daarmee bieden zandsuppleties de mogelijkheid de functies van het strand en de duinen, zoals natuur, recreatie en waterkering, te behouden. Tevens kan een basisvoorziening worden gecreëerd voor verdere ontwikkeling van deze functies. Omdat zandsuppleties jaarlijks op grote schaal langs de Nederlandse kust worden uitgevoerd, leiden deze tot aanzienlijke broeikasgasemissies en zijn er effecten op de ecologie. De ambitie is om het kustonderhoud vanaf 2030 emissievrij uit te voeren en de ecologische effecten van het winnen en suppleren van zand (onder andere in relatie tot stikstof, bodemleven en dynamisch duinbeheer) te reduceren (VOLLEBREGT & DE BOER 2020). Verder bestaat de vraag welke kustonderhoudsconcepten passen bij een mogelijk versnelde zeespiegelstijging na 2050.

Het Topconsortia Kennis & Innovatie project Dutch Coastline Challenge (in het vervolg TKI-DCC) is een samenwerking tussen overheid (Rijkswaterstaat), bedrijfsleven (Vereniging van Waterbouwers en EcoShape) en kennisinstellingen (Technische Universiteit Delft en Deltares) om onderliggende vragen van deze ambities te beantwoorden. Binnen het TKI-DCC project zal nieuwe kennis en ervaring verkregen worden (geen uitvoering van pilots) over het verduurzamen en natuur-inclusiever maken van het kustonderhoud op korte termijn en over het opschalen hiervan op langere termijn, anticiperend op mogelijk versnelde zeespiegelstijging na 2050. Om deze kennis te genereren zijn de drie hoofddoelen van het TKI-DCC project het ontwikkelen van

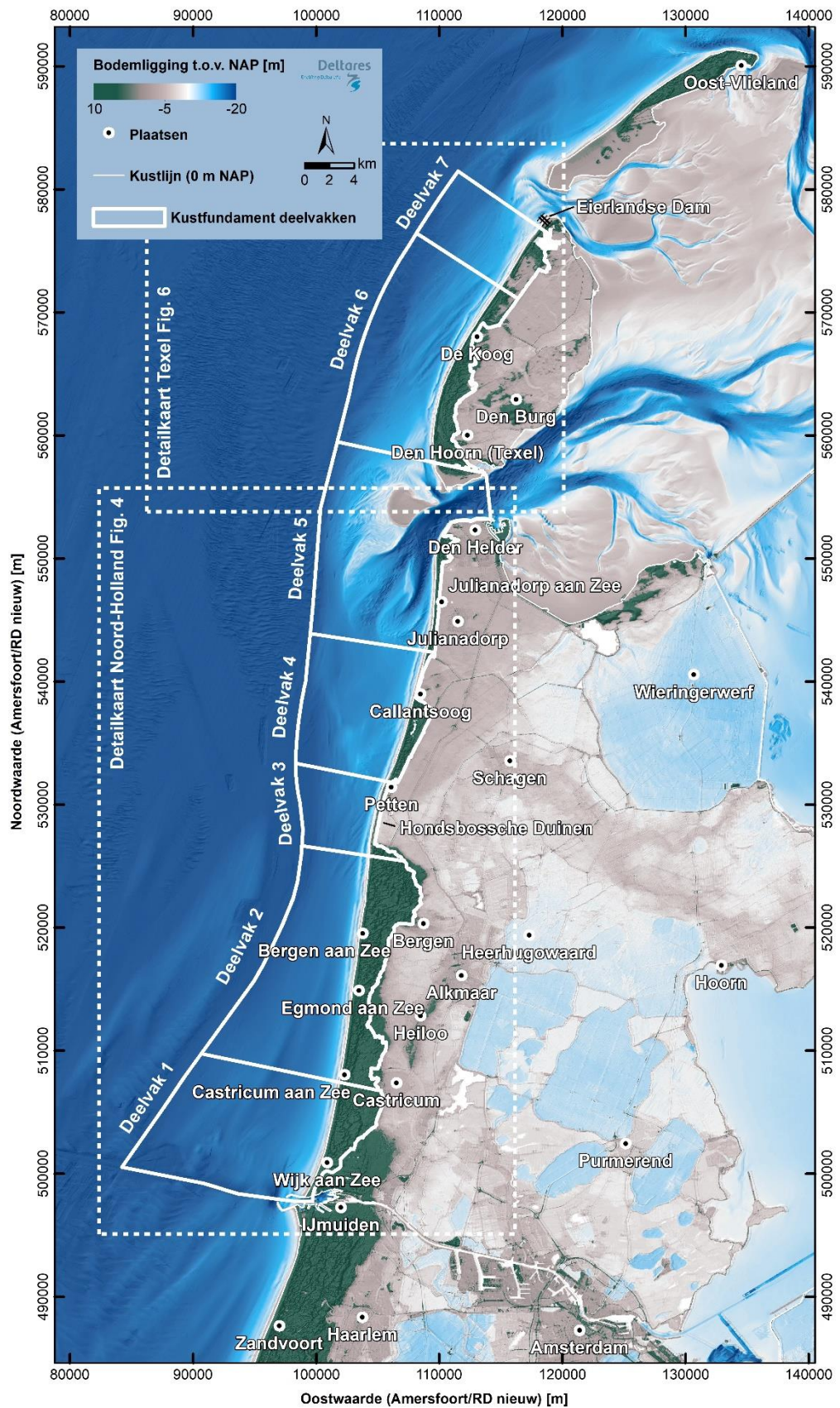
- nieuwe kustonderhouds-/suppletieconcepten (bijvoorbeeld strand-, vooroever-, megasuppleties en varianten erop alsook puntbronnen, geconcentreerde, uitgesmeerde, discontinue en continue suppleties),
- uitvoeringsmethoden (bijvoorbeeld conventionele baggerschepen versus alternatieve brandstoffen, pijpleidingen, transportmethoden etc.) en
- samenwerkings- en contractvormen (bijvoorbeeld de verdeling van verantwoordelijkheden en risico's tussen overheid, bedrijfsleven en kennisinstellingen, de duur van het contract en de aanbestedingssystematiek).

Deze suppletieconcepten, uitvoeringsmethoden en contractvormen worden binnen het TKI-DCC project ontwikkeld met een focus op de kustvakken Noord-Holland en Texel (Figuur 1) gericht op de komende 15 jaar. Dit onderzoeksgebied is gekozen omdat het veel fysische karakteristieken bevat die representatief zijn voor de Nederlandse kust en er in deze kustvakken de komende jaren veel gesuppleerd zal gaan worden. Bovendien ligt in dit gebied al een gedeelde onderhoudsverantwoordelijkheid tussen overheid en markt gerelateerd aan de grote strandsuppletie die langs de Hondsbossche en Pettemer Zeewering (sindsdien ook Hondsbossche Duinen genoemd) in 2014 en 2015 is gerealiseerd.

Het TKI-DCC project is onderverdeeld in zes werkpakketten (WPs):

- WP1 – Systeemkennis morfologie en toekomstprojectie suppletieopgave (trekker Deltares)
- WP2 – Onderhoudsconcepten (trekker Technische Universiteit Delft)
- WP3 – Uitvoeringsmethoden (trekker Vereniging van Waterbouwers)
- WP4 – Samenwerkings- en contractvormen (trekker Rijkswaterstaat)
- WP5 – Samenwerking, integratie, afweging en advies (trekker Deltares)
- WP6 – Projectcoördinatie (trekker Deltares).





Figuur 1: Topografische overzichtskaart en morfologische kustfundament deelvakken van de kustvakken Noord-Holland en Texel – het onderzoeksgebied van deze studie. De gestippelde boxen tonen de kaartuitsneden in Figuur 4 en Figuur 6.

Dit rapport is een product van WP1. Als input voor het gehele project, en in het bijzonder voor WP2, WP3 en WP5, zijn voor dit werkpakket de volgende taken opgezet:

- i) bestaande kennis van de morfologie van de kustvakken Noord-Holland en Texel uiteenzetten en mogelijk aanvullende kennis ontwikkelen ten behoeve van de evaluatie van de morfologische en ecologische effecten gerelateerd aan nieuwe onderhoudsconcepten;
- ii) vaststellen van de benchmark/toekomstprojectie: wat zijn de te verwachten suppletievolumes, -kosten en -emissies voor de kustvakken Noord-Holland en Texel voor de periode 2021–2035;
- iii) vaststellen welke andere delen van de Nederlandse kust (op morfologische en ecologische gronden) in aanmerking kunnen komen voor implementatie van de lessen van dit project.

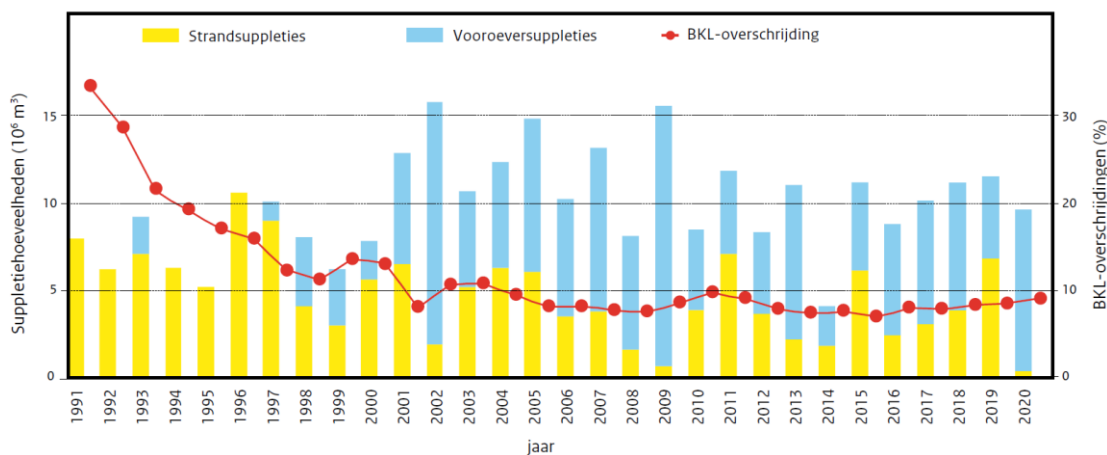
Dit rapport presenteert de resultaten volgend uit de eerste twee taken. In een latere fase – als de resultaten van de andere werkpakketten beschikbaar komen – zal bepaald worden op welke andere delen van de Nederlandse kust de inzichten uit dit project toepasbaar zijn (taak iii)). Na een kort overzicht van het kustonderhoud langs de Nederlandse kust middels zandsuppleties in Hoofdstuk 2 volgt in Hoofdstuk 3 en 4 een beschrijving van de kustvakken Noord-Holland en Texel. Hier worden de fysisch-geografische kenmerken en het recente morfologische systeemgedrag toegelicht en wordt een overzicht gepresenteerd van de uitgevoerde suppleties en de ecologie van beide kustvakken. In Hoofdstuk 5 worden de resultaten van de toekomstprojectie van de suppletievolumes, -frequenties, -kosten en -emissies getoond. Hoofdstuk 6 gaat hierna in op de ecologische impact van de suppleties. De synthese in Hoofdstuk 7 geeft aanbevelingen voor de andere werkpakketten voor het gebruiken van de uitgewerkte toekomstprojectie en noemt mogelijke vervolgstappen.

## 2 Context: suppleties Nederlandse kust

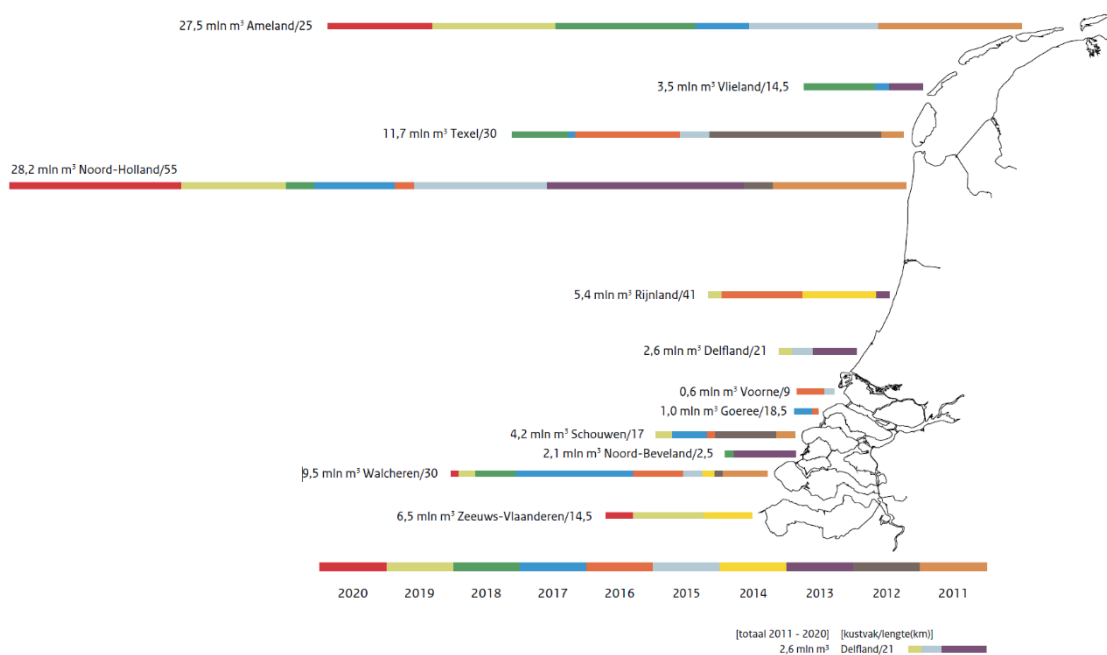
De eerste zandsuppleties ter versterking van de Nederlandse kust werden in de jaren '50 uitgevoerd en sinds de jaren '90 worden deze grootschalig ingezet. In één van de eerste grootschalige evaluaties naar de effectiviteit van suppleties (ROELSE 1996) is geconcludeerd dat deze effectief zijn in de handhaving van de kustlijn en het behoud van het volume sediment in de kustzone. Met het begin van het dynamisch kustbeheer in 1990 geldt het principe *zacht (suppleties) waar het kan en hard (constructies) waar het moet*. Bij de implementatie van dit beleid werd voor de eerste keer de *basiskustlijn* (BKL) – een representatie van de laagwaterlijn – gedefinieerd (en herzien in 2001, 2012 en 2017). De strategie is daar te suppleren waar de BKL structureel overschreden dreigt te worden. Naast instandhouding van de BKL wordt ook gestreefd om het *kustfundament* – de zone tussen de doorgaande NAP-20 m dieptelijn en de binnenduinrand en bij de zeegaten de kortste lijn tussen de aangrenzende oevers – in structureel evenwicht te houden met de zeespiegelstijging en zandverliezen te compenseren. Het sedimentvolume dat voor dit evenwicht nodig is wordt de *sedimentbehoefte* genoemd. De BKL is nog steeds grotendeels leidend voor de bepaling van de locaties waar het sediment gesuppleerd wordt.

In de jaren '90 bestonden de kustsuppleties nog voornamelijk uit strandsuppleties. Rond de millenniumwisseling is overgegaan tot hoofdzakelijk onderwatersuppleties of zogenaamde vooroeversuppleties. Zowel strand- als vooroeversuppleties voldoen aan de doelstelling om het volume van het kustfundament te behouden (ROELSE 2002, MASTBERGEN et al. 2017). Voor het behoud van de BKL hebben strandsuppleties een aantal voordelen. Het voordeel van een strandsuppletie is dat het zand rechtstreeks neergelegd wordt waar dat nodig is. Een nadeel is dat het extra sediment in de vorm van een hoger, breder strand het gevolg heeft dat de natuurlijke situatie verstoord wordt en er extra erosie optreedt om het natuurlijke evenwicht te herstellen. Bij een vooroeversuppletie wordt het zand onderwater aangebracht in het kustprofiel, meestal zeewaarts van de buitenste bank en wordt daarna door natuurlijke processen verspreid. Vanwege de betere toegankelijkheid voor baggerschepen zijn de kosten per m<sup>3</sup> vooroeversuppletie lager dan voor strandsuppleties. Met de sterke toename van de suppletievolumes langs de Nederlandse kust over de afgelopen tientallen jaren zijn de lagere kosten, de beperkte verstoring op het strand en de mogelijkheid grotere sedimentvolumes aan te brengen de belangrijkste redenen om in de afgelopen 20 jaar hoofdzakelijk (en waar mogelijk) vooroeversuppleties aan te brengen (MASTBERGEN et al. 2017). Naast de klassieke strand- en vooroeversuppleties zijn recentelijk ook andere suppletievormen uitgevoerd, met name geulwandsuppleties (bijvoorbeeld in het Zeegat van Texel in 2007; Paragraaf 3.3), buitendeltasuppleties (Amelander Zeegat in 2019) en megasuppleties zoals de Zandmotor ten zuidwesten van Den Haag in 2011 en de grote strandsuppletie bij de Hondsbossche Duinen tussen 2014 en 2014 (Paragraaf 3.3).

In Figuur 2 is de bijdrage van strand- en vooroeversuppleties langs de gehele Nederlandse kust sinds 1991 weergegeven. Dit overzicht betreft de suppleties in het kader van het reguliere onderhoud van de kustlijn (LODDER et al. 2019). Dit is dus bijvoorbeeld exclusief de megasuppleties zoals de Zandmotor of die bij de Hondsbossche Duinen en alle zandige zwakke schakelversterkingen (onder andere bij Ter Heijde, Kijkduin, Scheveningen, Katwijk en Noordwijk). Zichtbaar in deze grafiek is de toename in vooroeversuppleties, afname in strandsuppleties vanaf 1998 en de verdubbeling van het totale suppletievolume vanaf 2000.



Figuur 2: Jaarlijkse suppletiehoeveelheden in het kader van het regulier onderhoud van de kustlijn en fractie overschrijdingen van de Basiskustlijn (BKL) sinds 1991 (overgenomen uit Rijkswaterstaat 2020b).



Figuur 3: Totale suppletiehoeveelheden langs de Nederlandse kust per kustvak in het kader van regulier onderhoud van de kustlijn over de periode 2011 t/m 2020. Het getal achter de naam van het kustvak weergeeft de lengte van het kustvak in kilometers (overgenomen uit Rijkswaterstaat 2020b).

Ter referentie is in Figuur 3 de verdeling van de suppletiehoeveelheden langs de Nederlandse kust weergegeven voor de laatste tien jaar (2011–2020). Langs de kust van Noord-Holland (55 km lang) is over deze periode 28,2 mln (miljoen) m<sup>3</sup> zand (gemiddeld 51.000 m<sup>3</sup>/km/jaar) gesuppleerd exclusief de Hondbossche Duinen en langs de Noordzeekust van Texel (30 km lang) was dit 11,7 mln m<sup>3</sup> zand (gemiddeld 39.000 m<sup>3</sup>/km/jaar). In totaal is in deze periode 39 % van het suppletievolumen van de Nederlandse kust in deze twee kustvakken gesuppleerd (31 % van de Nederlandse kustlijn).

Opgemerkt wordt dat, bij de verdeling van de suppleties langs de kust, tot nu toe niet expliciet rekening is gehouden met de lokale sedimentbehoefte van het kustfundament omdat de instandhouding van de kustlijn en kustfuncties leidend was (Rijkswaterstaat, 2020a). Gevolg is dat er langs de Hollandse kust ongeveer tweemaal de lokale sedimentbehoefte (1,6 mln m<sup>3</sup>/jaar) is gesuppleerd en langs de volledige kust van de Waddeneilanden juist ongeveer de helft van de lokale sedimentbehoefte (9,1 mln m<sup>3</sup>/jaar), aldus Kustgenese 2.0

(Rijkswaterstaat, 2020a). Kortom, de suppletiehoeveelheden zijn niet noodzakelijk gelijk aan de sedimentbehoefte van het kustfundament en daarom worden beide beschouwd (LODDER 2016). Voor de komende 20 jaar wordt het lokaal niet in evenwicht houden van het kustfundament met de zeespiegelstijging niet als probleem gezien. Binnen Kustgenese 2.0 is aanbevolen voor een tijdschaal van 20 jaar te focussen op het handhaven van de kustlijn, voor grotere tijdschalen wordt het in evenwicht houden van het kustfundament wel van belang (Rijkswaterstaat 2020a).

## 3 Morfologie en uitgevoerde suppleties kustvak Noord-Holland

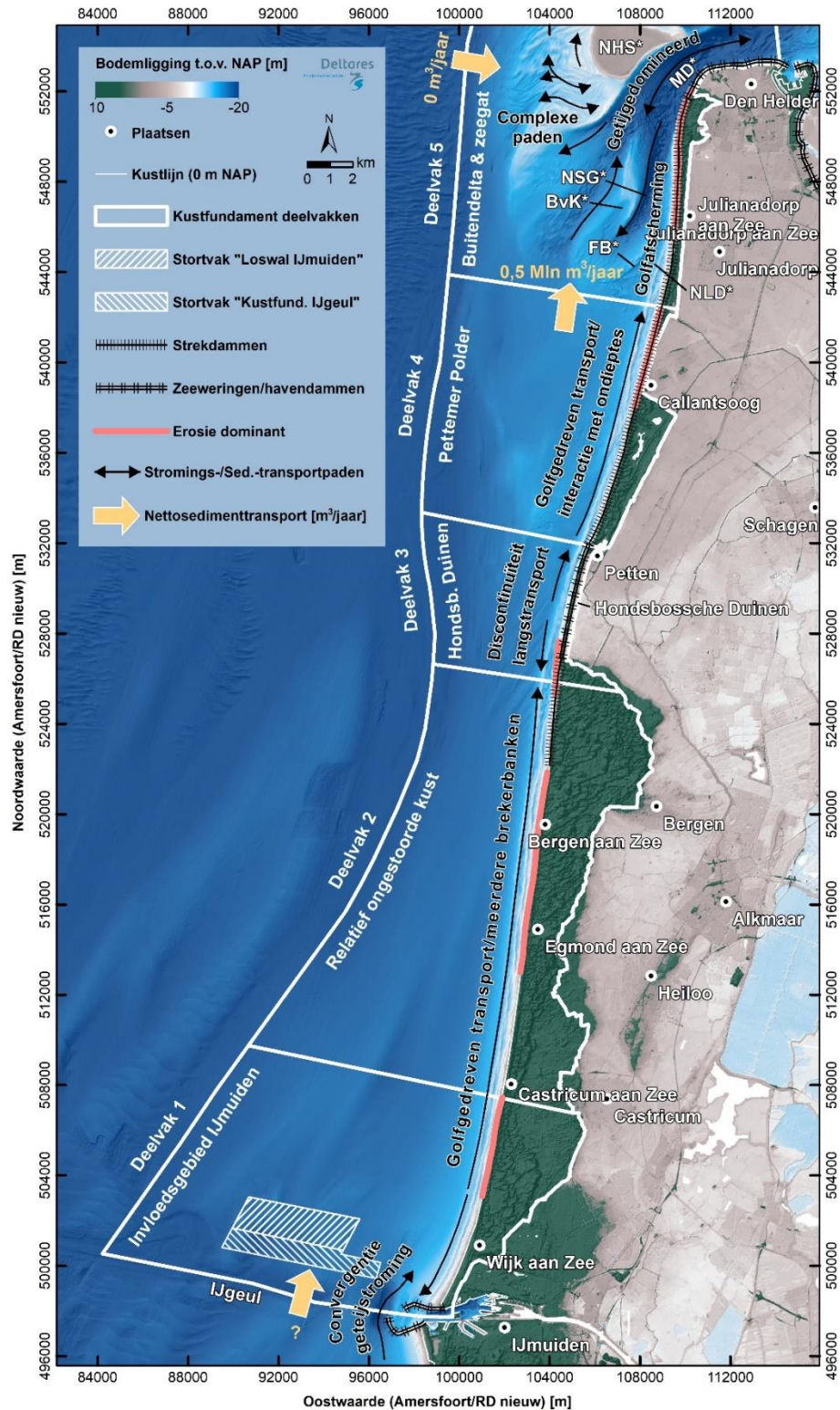
### 3.1 Algemene gebiedsbeschrijving

De Nederlandse kust bestaat uit drie grootschalige morfologische regio's: de Rijn-Maas-Scheldedelta in het zuidwesten, de Wadden in het noordoosten en daartussen de relatief rechte Hollandse kust (Figuur 3). Dit hoofdstuk behandelt het meest noordelijke deel van de Hollandse kust, het kustvak *Noord-Holland* dat begrensd wordt door de haven van IJmuiden in het zuiden en het Zeegat van Texel in het noorden (Figuur 4). De kustlijn van Noord-Holland heeft een lengte van ca. 55 km en is in noordnoordoostelijke richting georiënteerd, zonder onderbrekingen door mondingen of havendammen. De Hondsbossche Duinen vormen een uitbocht van de kustlijn en scheiden de morfologische gebieden ten zuiden en ten noorden hiervan (zie ook WIJNBERG 2002, ELIAS et al. 2013, MASTBERGEN et al. 2017):

- In het zuidelijke deel van het kustvak is de kustlijn relatief ongestoord met vrijwel geen harde kustbeschermingsmaatregelen. Dit stuk kust bevat duinen met een breedte van maximaal 5 km en een maximale hoogte van ongeveer NAP+50 m. Landwaarts van de duinen volgt een laagliggend zeekleilandschap met een bodemligging van enkele meters boven en beneden NAP. Zeewaarts van de kustlijn, tot maximaal 10 m diep, bevinden zich enkele kust-parallelle brekerbanken (Figuur 4). In dieper water zijn enkele kustaangehechte banken aanwezig. De breedte van het kustfundament bedraagt minimaal 5 km (nabij de Hondsbossche Duinen) en maximaal 15 km (rond IJmuiden).
- In het noordelijke gedeelte ontbreken duinen geheel of zijn deze veel smaller dan in het zuidelijke gedeelte. De kust wordt door enkele zeeweringen beschermt, zoals vroeger de Hondsbossche en Pettemer Zeewering in het gebied van de Hondsbossche Duinen en de zeeweringen langs de kop van Noord-Holland bij Den Helder (Figuur 4). Tussen deze zeeweringen beschermen ook strandhoofden de kust, die met een onderlinge afstand van 250 m aangelegd zijn en ca. 200 m de zee in steken. Tussen de Hondsbossche Duinen en de buitendelta van het Zeegat van Texel treedt een enkele brekerbank op, die stabiel in positie is. In hetzelfde gebied is de vooroever relatief ondiep door de voorliggende Pettemer Polder, een opduiking van de Pleistocene ondergrond (DE MULDER 1983). Langs de kop van Noord-Holland ontbreken brekerbanken en de vooroever is steiler door de aanwezigheid van het Marsdiep, Nieuwe Schulpengat en Nieuwe Landsdiep. In het Marsdiep is de waterdiepte maximaal 45 m. In het buitendelta van het zeegat bevinden zich enkele platen, onder andere de Noorderhaaks (maximaal NAP+1,3 m) alsmede de Bollen van Kijkduin en het Franse Bankje (beide enkele meters onder NAP) die direct voor de Noord-Hollandse kust liggen.

De Noord-Hollandse kust bestaat voornamelijk uit Holocene en noordelijk van Egmond ook uit Pleistocene zandafzettingen (DE GANS 1991). De gemiddelde korrelgrootte (medium zand,  $\varnothing \approx 250 \mu\text{m}$ ) verschilt weinig in bovengenoemde deelgebieden (GLIM 1980; WIJNBERG 2002; DONKER et al. 2018).

De Noord-Hollandse kust wordt gedomineerd door een dubbeldaags getij met een getijslag van ca. 1,69 m (springtij 1,88 m/doodtij 1,37 m) bij IJmuiden en 1,41 m (springtij 1,55 m/doodtij 1,37 m) bij Den Helder (Rijkswaterstaat 2013). Langs de hele kust is de periode van stijgend water korter dan van dalend water (vloeddominant). De maximale getijstroomsnelheden zijn orde grootte  $0,4 \text{ m s}^{-1}$ – $0,6 \text{ m s}^{-1}$  (WIJNBERG 2002, POT 2011). De wind komt gemiddeld uit het zuidwesten en golven komen hoofdzakelijk uit het noordwesten en zuidwesten (DONKER et al. 2018). De jaargemiddelde (spectrale) significante golfhoogte  $H_{0m}$  bedraagt 1,2 m (WIJNBERG 2002).



Figuur 4: Topografische kaart en morfologische kustfundament deelvakken van het kustvak Noord-Holland met een beschrijving van de morfologische kenmerken en drijvende processen volgens ELIAS et al. (2013) en MAST-BERGEN et al. (2017). \*Afkortingen van zuid naar noord: NLD = Nieuwe Landsdiep, FB = Franse Bankje, BvK = Bollen van Kijkduin, NSG = Nieuwe Schulpengat, MD = Marsdiep, NHS = Noorderhaaks.

## 3.2 Recent morfologisch systeemgedrag

Deze paragraaf geeft een overzicht van het recente morfologische systeemgedrag van het kustvak Noord-Holland en put in belangrijke mate uit de Beheerbibliotheek Noord-Holland als product van de projecten BenO Kust en Kustgenese 2.0 (ELIAS et al. 2013; MASTBERGEN et al. 2017). Dit overzicht is niet bedoeld om volledig te zijn, maar vormt een samenvatting van de kennis die relevant voor de vraagstellingen van dit project is, specifiek voor de toekomstprojectie van de suppletieopgave. Voor nadere details wordt verwezen naar de rapporten van ELIAS et al. 2013 en MASTBERGEN et al. 2017 alsmede onderliggende referenties. In het bijzonder zijn de studies van STIVE et al. (1990) en VAN RIJN (1997) relevant voor bepalingen van de sedimenttransporten en morfologische veranderingen langs de (Noord-)Hollandse kust voortgaand aan het beleid van dynamisch kustbeheer (rond 1990) als ook de studies van VERMAAS (2010, 2012), POT (2011), DE SONNEVILLE & VAN DER SPEK (2012), VAN DER SPEK & ELIAS (2013) na implementatie van het dynamische kustbeheer.

Terwijl de uitgevoerde studies geen eenduidige kwantitatieve beschrijving van de morfologische processen geven, is er wel consensus over de kwalitatieve beschrijving van het kustvak Noord-Holland. Er wordt uitgegaan van een netto landwaarts sedimenttransport van het diepe water (dieper dan 20 m) naar het kustfundament. Over de grootte van dit landwaarts gerichte sedimenttransport bestaat grote onzekerheid, mede omdat de effecten van stormen op het sedimenttransport in deze zone (mogelijk zeewaarts gerichte transport) niet goed bekend zijn (NOLTE et al. 2020). In het diepe deel van het kustfundament (NAP-20 m tot NAP-8 m) wordt het sedimenttransport door getij- en wind-gerelateerde stroming gedomineerd. In het ondiepe gedeelte (boven NAP-8 m) domineren golven zowel het kustlangse als het kustdwarse sedimenttransport. Het eolische sedimenttransport van het strand naar de duinen wordt voor de Noord-Hollandse kust op 1 mln m<sup>3</sup>/jaar geschat.

Als gevolg van de (vloeddominante) getijstroming en de overheersende wind en golven uit westelijke richting, is het netto sedimenttransport langs de Noord-Hollandse kust noordwaarts gericht. Terwijl de havenhoofden van IJmuiden sedimenttransport in het ondiepe water (tot ca. NAP-10 m) verhinderen (VAN RIJN 1995), vindt er wel noordwaarts gericht sedimenttransport over de vaargeul IJgeul plaats (DE KRUIF & KEIJER 2003). Dit blijkt vooral uit de sterke erosie langs de kop van het zuidelijke havenhoofd en rond de vaargeul (ontgrondingskuil), terwijl ten noorden van de noordelijke havenhoofd de kust juist sterk sedimenteert. Als gevolg van de contractie van de stroming bij de havendammen erodeert sediment, transporteert dit over de vaargeul heen en sedimenteert het achter de havendammen door divergentie van de stroming. De grootte van dit sedimenttransport is echter niet bekend (Figuur 4). Naast het sedimenttransport over de vaargeul is baggerspecie uit de haven van IJmuiden en de IJgeul een substantiële sedimentbron voor het kustvak Noord-Holland. Baggerspecie uit de haven van IJmuiden (voornamelijk slib) wordt in het stortvak *Loswal IJmuiden* (< -11 m NAP; Figuur 4) ten noorden van de IJgeul gestort (jaarlijks tussen de 1,8 mln m<sup>3</sup> en 5 mln m<sup>3</sup> in de periode 2003 t/m 2021, gemiddeld 2,6 mln m<sup>3</sup>; Rijkswaterstaat 2021). Baggerspecie uit de IJgeul (zand-slibmengsel) wordt in het nabijgelegen stortvak *Kustfundament IJgeul* (< -11 m NAP; Figuur 4) gestort (tot 0,7 mln m<sup>3</sup> per jaar in de periode 2014 t/m 2021, gemiddeld 0,1 mln m<sup>3</sup>; Rijkswaterstaat 2021).

VAN RIJN (1995) en ELIAS (2019) geven een overzicht van gerapporteerde waarden voor de sedimentlangstransporten voor Noord-Holland, representatief voor de kustzone tot ongeveer 20 m diepte (het kustfundament). Afhankelijk van de rekenmethode van de verschillende studies en de exacte locatie waar de transporten berekend worden, liggen de gerapporteerde waarden voor de Noord-Hollandse kust tussen 0,2 mln m<sup>3</sup>/jaar en 0,5 mln m<sup>3</sup>/jaar. Het noordwaartse langstransport neemt van zuid naar noord toe. ELIAS (2019) schat het langstransport bij Callantsoog op 0,5 mln m<sup>3</sup>/jaar (Figuur 4).



Zoals Paragraaf 3.1 duidelijk heeft gemaakt, kan het kustvak Noord-Holland in twee morfologische regio's worden opgedeeld – het gebied ten zuiden van de Hondsbossche Duinen en het gebied ten noorden hiervan. Terwijl in het zuidelijke gedeelte vooral het golfgedreven sedimenttransport en bankgedrag de kustlijnontwikkeling sturen, wordt het kustgedrag in het noordelijke gedeelte in grote mate bepaald door de uitwisseling van sediment met het Zeegat van Texel. Deze grove opdeling kan – op basis van morfologische kenmerken, sturende processen en ruimtelijke variatie in suppleties (zie Paragraaf 3.3) – nog verder verfijnd worden naar vijf morfologische deelvakken (Figuur 4):

- *Deelvak 1 – Invloedsgebied IJmuiden:* In dit deelvak wordt de kustmorfologie sterk beïnvloed door de aanwezigheid van de havendammen van IJmuiden. In het zuidelijke deel (km 0–5) bouwt de kust als gevolg van het beschermende effect van de havendammen zeewaarts uit (toename in sedimentvolume sinds 1990 ca. 0,2–0,3 mln m<sup>3</sup>/jaar). Verder naar het noorden neemt het beschermende effect sterk af. Hier domineert nog de natuurlijke cyclische dynamiek van het bankensysteem. De kust is hier gekarakteriseerd door erosie. Ter compensatie van deze erosie worden in dit gebied incidenteel vooroever- en strandsuppleties uitgevoerd.
- *Deelvak 2 – Relatief ongestoorde kust:* In dit relatief ongestoorde deel van de Noord-Hollandse kust bevinden zich bijna geen harde verdedigingswerken. Bij Castricum aan Zee en noordwaarts daarvan is de kustlijn vrijwel stabiel en is er weinig onderhoud nodig. In dit stuk van de kust lijkt de natuurlijke cyclische migratie van de brekerbanken nog intact. In het gebied van Egmond aan Zee en Bergen aan Zee wordt de kust door erosie gedomineerd, wat frequent (vrijwel jaarlijks sinds 1992) aanbrengen van vooroever- en strandsuppleties vereist. De aangebrachte vooroever-suppleties worden binnen enkele jaren geabsorbeerd in het natuurlijk systeem. Als gevolg van het frequente suppleren is de oorspronkelijke cyclische migratie van de brekerbanken in dit gebied gestoord.
- *Deelvak 3 – Hondsbossche Duinen:* De Hondsbossche Duinen vormen een uitbocht van de kust waardoor een discontinuïteit maar geen volledige onderbreking in het sedimentlangstransport ontstaat. In dit gebied werd tussen 2014–2015 een zeer grote strandsuppletie van 35 mln m<sup>3</sup> uitgevoerd. Als gevolg hiervan is de kustlijn ca. 300 m zeewaarts verschoven en een vrijwel ononderbroken brekerbank ontstaan. Voor het gebied van de Hondsbossche Duinen is nog geen nieuwe BKL-ligging bepaald en is de recente kustlijnontwikkeling niet in detail bekend. Opvallend zijn wel de relatief grote suppleties die in de afgelopen 20 jaar aan de zuidkant van de Hondsbossche Duinen – waar de kustlijn zeewaarts verschuift en daarmee een hindernis voor de kustparalelle stroming vormt – uitgevoerd zijn en derhalve erosie in dit gebied aanduiden.
- *Deelvak 4 – Pettemer Polder:* In het zuidelijke gedeelte van dit deelvak zijn de sedimenttransporten verstoord door de uitbocht van de Hondsbossche Duinen en er treedt sedimentatie in de luwte van de uitbocht op. Naar het noorden wordt de morfologie steeds meer door het Zeegat van Texel beïnvloed. De enkele brekerbank in dit deelvak (Paragraaf 3.1) ligt stabiel en vertoont geen migrerende bankencyclus, zoals waargenomen langs het merendeel van de Hollandse kust. Hoewel er recentelijk een trend van verflauwing te zien is, vertoont deelvak 4 op middellange termijn een negatieve zandbalans waardoor de benodigde onderhoudsinspanning (vooral vooroever- maar ook strandsuppleties) in het verleden groot was, met een piek rond Callantsoog. Daarnaast wordt de kust in het hele deelvak beschermd door strandhoofden (zie Paragraaf 3.1). De negatieve zandbalans is het gevolg van een relatief groot netto noordwaarts sedimenttransport die veroorzaakt wordt door onder andere (i) het hinderen van golfgedreven sedimenttoevoer uit het noorden door de ondiepten van de buitendelta van het zeegat, waardoor het golfgedreven sedimentlangstransport uit zuidelijke richting domineert, (ii) de aanwezigheid van het zeegat als put voor het aangevoerde sediment en (iii) een verstoorde sedimenttoevoer door de blokkerende werking van de Hondsbossche Duinen.

- *Deelvak 5 – Buitendelta en Zeegat van Texel*: In het meest zuidelijke stuk van deelvak 5 is de kustlijn vrijwel stabiel mede doordat de voorliggende platen en banken van de buitendelta de golfenergie voor dit deel van de kust reduceren. Langs de kust grenzend aan het Nieuwe Landsdiep, Nieuwe Schulpengat en Marsdiep vindt sterke erosie plaats en de kustlijn verschuift overwegend landwaarts. De erosie is gerelateerd aan de uitbreiding van het zeegat en het landwaarts verplaatsen van het Nieuwe Landsdiep en Nieuwe Schulpengat in samenhang met de grote getijstrooming in dit gebied. Dit maakt frequent terugkerende (enkele jaren) vooroever- en strandsuppleties in dit gebied nodig, terwijl de kust aan de kop van Noord-Holland door de harde Helderse Zeewering tegen erosie beschermd is.

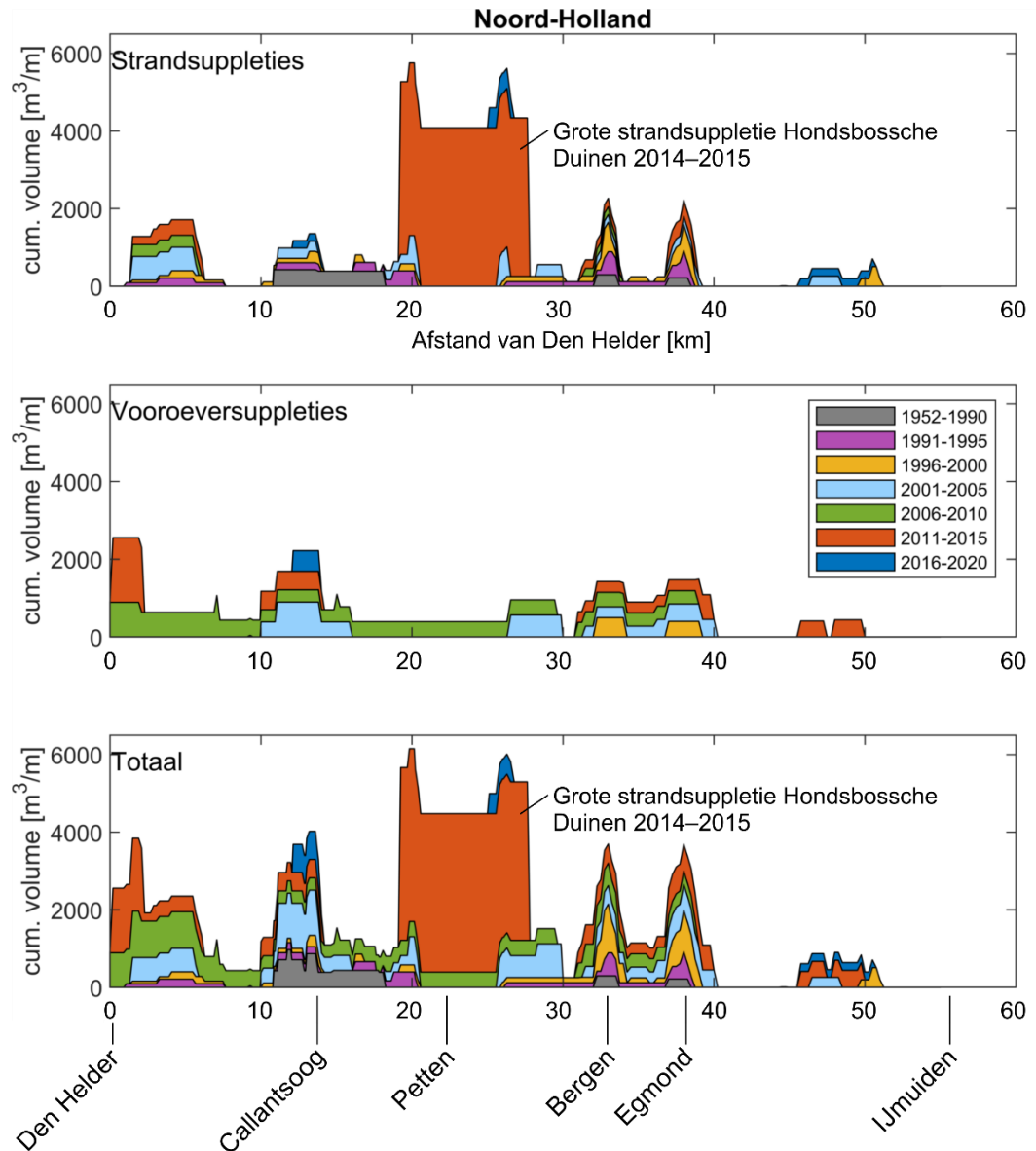
Volgens POT (2011) en MASTBERGEN et al. (2017) vertoonde het gehele kuststelsel Noord-Holland in de periode 1965–1990 gemiddeld een erosie van de orde grootte  $1 \text{ m}^3/\text{jaar}$ . Sinds 1990 is de erosieve trend gestopt en het totale kustsedimentvolume groeit met ca.  $1,1 \text{ mln m}^3/\text{jaar}$  als gevolg van de aangebrachte suppleties van gemiddeld  $2 \text{ mln m}^3/\text{jaar}$  (Paragraaf 3.3). Deze volumetoename komt ongeveer overeen met het verschil tussen het aangebrachte suppletievolumen en de doorgaande autonome erosie van  $1,1 \text{ mln m}^3/\text{jaar}$  sinds 1990. Een belangrijke observatie is dat de sedimentverliezen gemiddeld over het kustvak Noord-Holland niet per definitie toenemen als het suppletievolumen groter is dan het autonome erosievolumen. Veeleer wordt sediment dat extra gesuppleerd wordt herverdeeld over de kust zodat deze zeewaarts uitbouwt. Sediment dat langs de Noord-Hollandse kust extra gesuppleerd wordt leidt niet direct tot een extra sedimentvoeding van de Waddenzee. De verklaring hiervoor is waarschijnlijk dat de sedimenttransporten gelimiteerd zijn door de transportcapaciteit en niet door het zandaanbod (LODDER 2015). Als de transportcapaciteit in de toekomst niet wezenlijk verandert zal daarom ook de sedimentimport naar de Waddenzee waarschijnlijk niet toenemen.

### 3.3 Uitgevoerde suppleties

In deze paragraaf wordt een kort overzicht gegeven van de uitgevoerde suppleties in het kustvak Noord-Holland op basis van de beheerbibliotheek van MASTBERGEN et al. (2017). Ter bescherming van de Noord-Hollandse kust wordt deze sinds 1976 met zand gesuppleerd. Het totale suppletievolumen tot 2020 bedraagt meer dan  $100 \text{ mln m}^3$  zand, aangebracht met bijna 100 verschillende suppleties. Tot 1990 werden de suppleties alleen reactief (bijvoorbeeld bij stormschade) uitgevoerd en daarom onregelmatig met grotere afstand in de tijd (gemiddeld elke 3,5 jaar). Sinds 1990, met het begin van de dynamische kusthandhaving en de vaststelling van de BKL (zie Paragraaf 2), wordt jaarlijks langs de Noord-Hollandse kust gesuppleerd met een gemiddeld suppletievolumen van ca.  $2 \text{ mln m}^3/\text{jaar}$ . Terwijl de suppleties tot 1999 uitsluitend als strand- en duinsuppleties werden uitgevoerd, wordt sindsdien een groot gedeelte van het suppletievolumen op de vooroever neergelegd (vooroeversuppleties; zie Paragraaf 2). De verhouding tussen de aantal vooroever- en strandsuppletiecampagnes langs de Noord-Hollandse kust sinds 1999 is ongeveer gelijk, maar het gemiddelde volume per vooroeversuppletie van ca.  $1 \text{ mln m}^3$  is meer dan dubbel zo groot als dat per strandsuppletie van ca.  $470.000 \text{ m}^3$ .

Figuur 5 toont dat de meeste en grootste suppleties in Noord-Holland tussen Den Helder en Egmond zijn aangebracht, met pieken in de erosiegebieden Egmond, Bergen, Callantsoog en Julianadorp – Den Helder (Paragraaf 3.2). Zuidelijk van Egmond werd tot nu alleen tussen Castricum en Wijk aan Zee gesuppleerd. Tussen 2014 en 2015 werd een grote strandsuppletie van  $35 \text{ mln m}^3$  uitgevoerd ter versterking van de Hondsbossche en Pettemer Zeewering – een voormalige zwakke schakel van de Noord-Hollandse kust. Deze interventie valt buiten het reguliere onderhoud omdat één doel van deze suppletie het zeewaartse uitbouwen van de kustlijn was (Paragraaf 3.2). In een unieke uitvoeringsvorm werd in 2007 een grootschalige gecombineerde geulwand-, vooroever- en strandsuppletie met een totaalvolume van  $6,35 \text{ mln m}^3$

(geulwandsuppleties worden als vooroeversuppleties geclassificeerd in Figuur 5) tussen Julianadorp en Den Helder uitgevoerd (ELIAS et al. 2013). De geulwandsuppletie werd met een volume van 1,6 mln m<sup>3</sup> in het noordelijke Nieuwe Schulpengat, waar de geul met een steil talud overgaat in het strand, als zandbuffer voor de Helderse Zeewering aangebracht. Deze buffer was al binnen 3 jaar afgevoerd.



Figuur 5: Overzicht van de cumulatieve strand- (boven), vooroever- (midden) en totale (beneden) suppletiehoeveelheden in m<sup>3</sup>/m uitgevoerd langs de Noord-Hollandse kust tussen Den Helder en IJmuiden tot en met 2020 (op basis van MASTBERGEN et al. 2017).

Recente analyses van de kustlijnontwikkeling, het sedimentvolume en het bankgedrag laten zien dat het dynamisch handhaven van de Noord-Hollandse kustlijn met suppleties een geschikte methode is om de kust tegen structurele erosie te beschermen. Als gevolg van de suppleties is de kustlijn de afgelopen tientallen jaren stabiel gebleven of zeewaarts verschoven, is de waterdiepte in het ondiepe vooroever afgenomen en is het sedimentvolume in het kustfundament toegenomen (Paragraaf 3.2). Onderzoek naar het gedrag en de effectiviteit van vooroeversuppleties langs de Noord-Hollandse kust met focus op Bergen aan Zee en Egmond (onder andere VAN DUIN & WIERSMA 2002; VAN DUIN et al. 2004; SPANHOFF et al. 2004; COHEN

& BRIERE 2007; BRUINS 2016) toont aan dat grote vooroeversuppleties (ordergrootte 1 mln m<sup>3</sup>) een duidelijke effect hebben op de aanwezige banksystemen. Dit soort suppleties hinderen de van nature zeewaartse migratie van de banken en vormen in principe een extra bank in het kustprofiel. Als gevolg hiervan treedt er meer golfdissipatie op, resulterend in mildere condities bij de waterlijn en kleinere langstransporten. Ondanks de verhinderde bankmigratie kunnen de banken zich wel ontwikkelen, bijvoorbeeld door in kustlangse richting op te splitsen (zogenoemde bifurcatiepunten). Het hinderende effect houdt meerdere jaren na suppleren aan; daarna keren de banken weer terug naar hun oorspronkelijke gedrag van zeewaartse migratie. De tijdsduur van het hinderende effect wordt als een mogelijke indicator voor de levensduur van vooroeversuppleties gebruikt.

## 4 Morfologie en uitgevoerde suppleties kustvak Texel en Zeegat van Texel

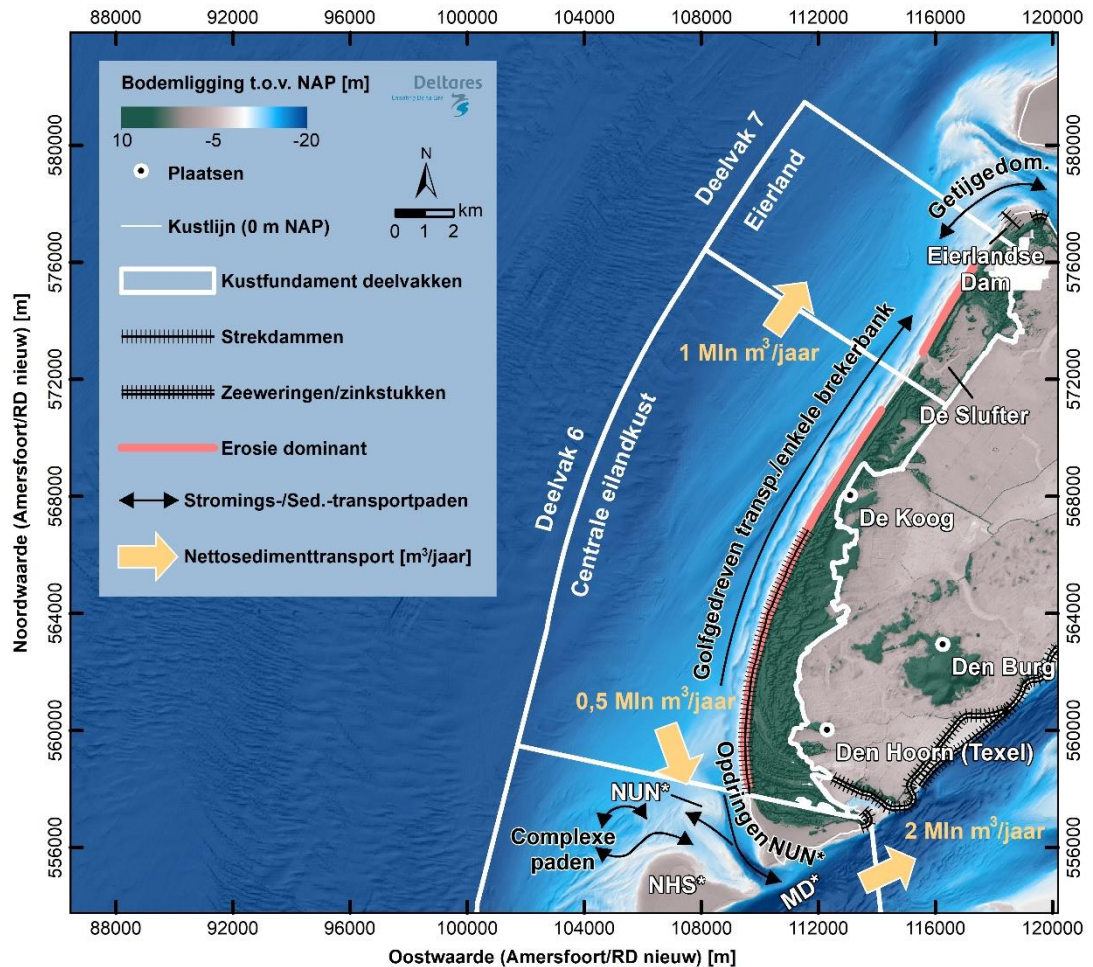
In dit hoofdstuk wordt voor het kustvak Texel en het Zeegat van Texel allereerst een algemene gebiedsbeschrijving gegeven (Paragraaf 4.1) en het recente morfologische systeemgedrag besproken (Paragraaf 4.2). Deze inzichten volgen hoofdzakelijk uit de beheerbibliotheken en onderliggende studies (o.a. OOST et al. 2019; ELIAS 2019; QUATAERT et al. 2020). Het overzicht dat in dit hoofdstuk gegeven wordt, focust op de relevante kennis over het systeemgedrag voor dit project. Voor nadere details wordt verwezen naar de onderliggende rapportages. Het Eierlandse Gat (zeegat ten noorden van Texel) en de Waddenzeekust van Texel vallen buiten het studiegebied maar komen wel kort ter sprake omdat deze logischerwijs in verbinding staan met de interessegebieden.

### 4.1 Algemene gebiedsbeschrijving

#### 4.1.1 Texel

Met een oppervlakte van ongeveer 160 km<sup>2</sup> is Texel het grootste Nederlandse Waddeneiland (Figuur 6). De lengte van de kust aan de Noordzeezijde is 27 km. De kustlijn van het eiland is voor het grootste gedeelte zuidzuidwest-noordnoordoost georiënteerd. Texel is gevormd door het openbreken van de kustboog ter hoogte van de huidige westelijke Waddenzee in de middeleeuwen (Schoorl, 1999). Het huidige Texel bestaat uit twee delen, het zuidoostelijke deel met een kern van keileem, en Eierland. Beide delen zijn aan elkaar gegroeid door het dichtslippen van het Anegat en de aanleg van een zanddijk. Het eiland is verder gegroeid door bedijkingen aan de wadzijde. De landwaartse grens van het kustfundament valt gelijk met de landwaartse grens van de primaire waterkering (hoofdzakelijk duinen). De kustlijn aan de Noordzeezijde van Texel wordt onderbroken door een opening in de duinen met een achterliggend intergetijdengebied (De Slufter) op de plek waar het voormalige Anegat lag. De duinenrij hier was oorspronkelijk een stuifdijk die een gesloten kustlijn moest creëren, maar ter plaatse van De Slufter brak de stuifdijk herhaaldelijk door. De Slufter vormt nu een uniek natuurgebied en een sluiting door menselijk toedoen wordt in het huidige beleid juist vermeden. De kust bevat langs het eiland voor het grootste gedeelte een enkele brekerbank.

Langs de Noordzeekust van Texel vindt structurele erosie plaats. De kustlijn wordt mede op zijn plek gehouden door de aanwezigheid van strandhoofden/strekdammen in het zuidwesten (aangelegd 1959–1987) en de Eierlandse Dam in het noorden (1995), zie Figuur 6. Verder wordt er langs de kust van Texel gesuppleerd sinds 1979. Ook aan de Waddenzeezijde wordt ingegrepen. In 2018/2019 is bijvoorbeeld de Prins Hendrikzanddijk aangelegd. Voor meer details over de fysische geografie van Texel wordt verwezen naar QUATAERT et al. (2020).



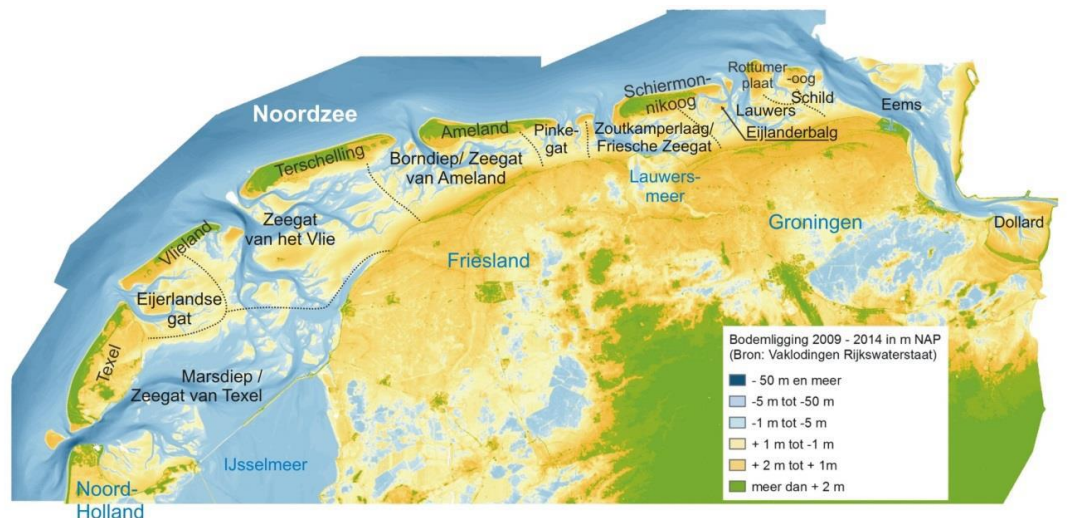
Figuur 6: Topografische kaart en morfologische kustfundament deelvakken van het kustvak Texel met beschrijving van de morfologische kenmerken en drijvende processen volgens ELIAS (2019) en QUATAERT et al. (2020). \*Afkortingen: MD = Marsdiep, NHS = Noorderhaaks, NUN = Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks.

#### 4.1.2 Bekken van het Zeegat van Texel

De Noordzeekust van Texel en Noord-Holland worden gescheiden door het Zeegat van Texel en zijn buitendelta. De buitendelta van het Zeegat van Texel vormt, samen met de andere buitendelta's van de Waddenzee, een buffer waarin grote hoeveelheden sediment zijn opgeslagen die ter beschikking kunnen komen van het achterliggende bekken (Rijkswaterstaat, 2020a). Hoewel het Dutch Coastline Challenge project zich beperkt tot suppletie strategieën langs de Noordzeekust van Texel en Noord-Holland (inclusief de buitendelta van het Zeegat van Texel), is kennis over het achterliggende bekken dus wel relevant.

De ligging van het bekken van het Zeegat van Texel (690 km<sup>2</sup>, waarvan 21 % intergetijdengebieden; OOST et al. 2019) is weergegeven in Figuur 7. Binnen dit kombergingsgebied liggen diverse havens, waarvan de haven van Den Helder de grootste is. De veerdienst van Den Helder naar Texel kruist de hoofdgeul Marsdiep. De havens en de vaargeulen van en naar deze havens worden op diepte gehouden. Gemiddeld is in het bekken van het Zeegat van Texel 1,4 mln m<sup>3</sup> per jaar gebaggerd (over 2013–2015). De helft van dit baggerbezwaar betreft de haven van Den Helder. Het gebaggerde sediment wordt elders binnen het systeem verspreid (OOST et al. 2019). Sinds 2021 is de zandwinning in de Waddenzee volledig stopgezet, sinds 2017 werd het oorspronkelijke zandwinoquotum van 0,5 mln m<sup>3</sup> per jaar voor de gehele Waddenzee afgebouwd. Door al het gebaggerde sediment binnen de Waddenzee te behouden, wordt de sedimentbalans van de Waddenzee en de kustzone niet geschaad. Het behoud van

het sediment binnen de Waddenzee is ook relevant in het kader van zeespiegelstijging. Het bekken van het Zeegat van Texel grenst aan het wantij met het Eierlandse Gat, het wantij met het Zeegat van het Vlie en de Afsluitdijk (1932). De Afsluitdijk heeft een grote impact op de hedendaagse hydrodynamica en morfologie van dit bekken. Voor meer details wordt verwezen naar OOST et al. (2019).



Figuur 7: Overzicht van de kombergingsgebieden van de Waddenzee (overgenomen van OOST et al. 2019).

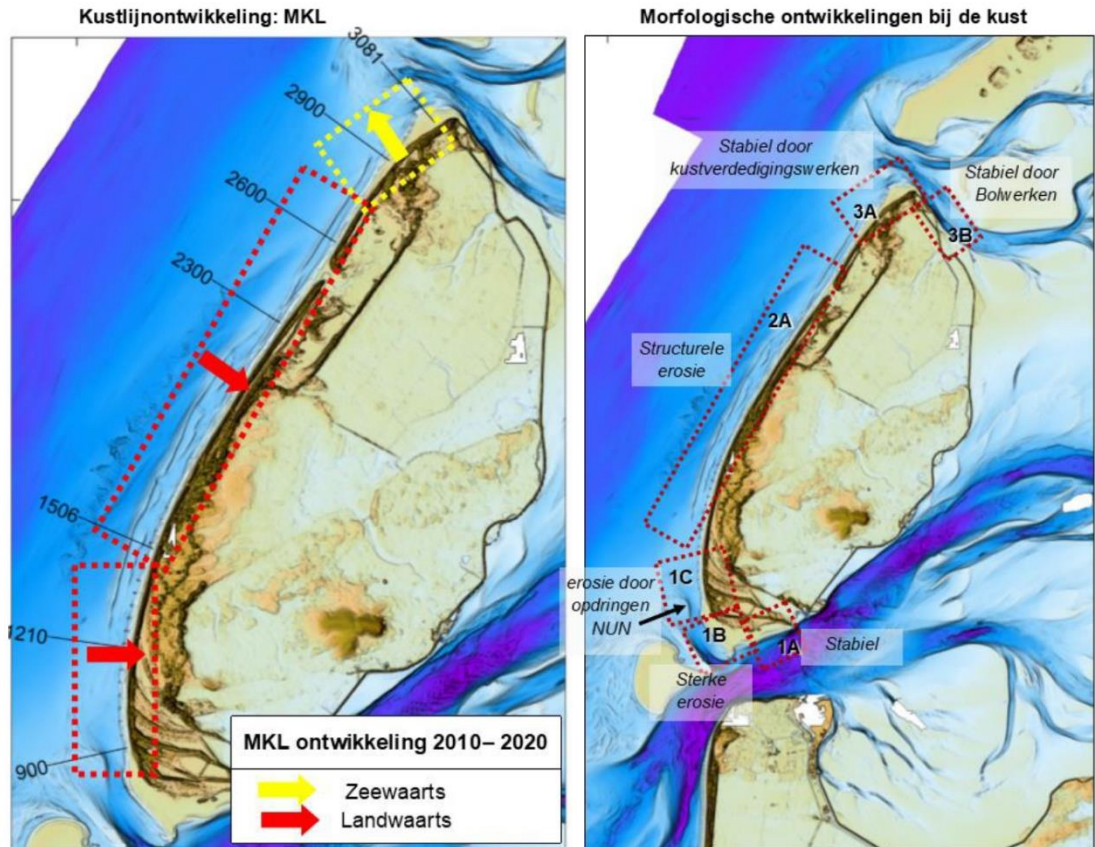
## 4.2 Recent morfologisch systeemgedrag

### 4.2.1 Texel

De recente morfologische ontwikkelingen van de Noordzeekust van Texel, net als de ontwikkelingen op de lange termijn, zijn in detail beschreven in QUATAERT et al. (2020). In de laatste decennia is een belangrijke rol weggelegd voor de strandhoofden en suppleties.

Het zuidelijke deel van de eilandkust wordt sterk beïnvloed door de buitendelta van het Zeegat van Texel, specifiek door de zandplaat Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (Figuur 6). De ligging van deze zandplaat is sterk veranderd sinds 2006, terwijl de ontwikkelingen in de periode daarvoor juist beperkt waren. Door het opdringen van deze zandplaat en de tussengelegen geul (het Molengat) is de meest zuidwestelijke punt van Texel (De Hors) in recente jaren aan erosie onderhevig (rond raai 700), maar groeit het noordelijke deel van dit gebied juist wat aan (rond raai 800). Het grootste effect heeft het opdringen van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks noordelijk van raai 900, waar de kust al jaren een erosieprobleem ondervindt. In recente jaren is het Molengat aan het opvullen en is de noordelijke punt van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks rond 2015 aan de kust gegroeid. Deze aanlanding compenseert echter onvoldoende voor de grootschalige erosie van de zuidwestkust. De ontwikkelingen van De Hors inclusief een conceptueel model van deze ontwikkelingen zijn in ELIAS & VAN DER SPEK (2020) in detail uiteengezet.

De centrale eilandkust is gedomineerd door golfprocessen en is onderhevig aan erosie. Meestal is slechts een enkele brekerbank aanwezig. Uit metingen is gebleken dat de suppleties de brekerbank kunnen beïnvloeden. De strandhoofden beïnvloeden de centrale eilandkust substantieel. De strandhoofden langs het zuidwesten van de centrale eilandkust (Figuur 6) beperken de erosie in sterke mate door het langstransport in de brandingszone te verminderen, hoewel ze de kustachteruitgang niet volledig gestopt hebben. Voor een deel van dit gebied is de erosie gehalveerd, zoals berekend door RAKHORST (1984), voor een ander deel is deze zo goed als niet beïnvloed.



Figuur 8: Samenvatting van de ontwikkeling van de kustlijn en morfologie bij de kust van Texel (QUATAERT et al. 2020).

Tussen De Slufter en het Eierlandse Gat (deelvak Eierland in deze studie) zijn meestal twee brekerbanken aanwezig. Dankzij de 800 meter lange Eierlandse Dam (1995) die noordwaarts transport beperkt, wordt voorkomen dat er aan de noordpunt buitensporig veel sediment moet worden gesuppleerd. Tussen 1979 en 1996 was daar nog bijna 11 mln m<sup>3</sup> aan suppleties vereist. Dankzij de aanleg van de Eierlandse Dam in 1995 is de kustlijn juist honderden meters zeewaarts verplaatst. Noordelijk van de Eierlandse Dam wordt de kust verdedigd met diverse bestortingen en harde constructies. Langs de kust ten zuiden van de Eierlandse Dam zijn wel nog zandsuppleties nodig om de voortgaande kusterosie te compenseren. De ligging van de momentane kustlijn (MKL) en morfologische ontwikkelingen van de Noordzeekust van Texel zijn door QUATAERT et al. (2020) in Figuur 8 samengevat.

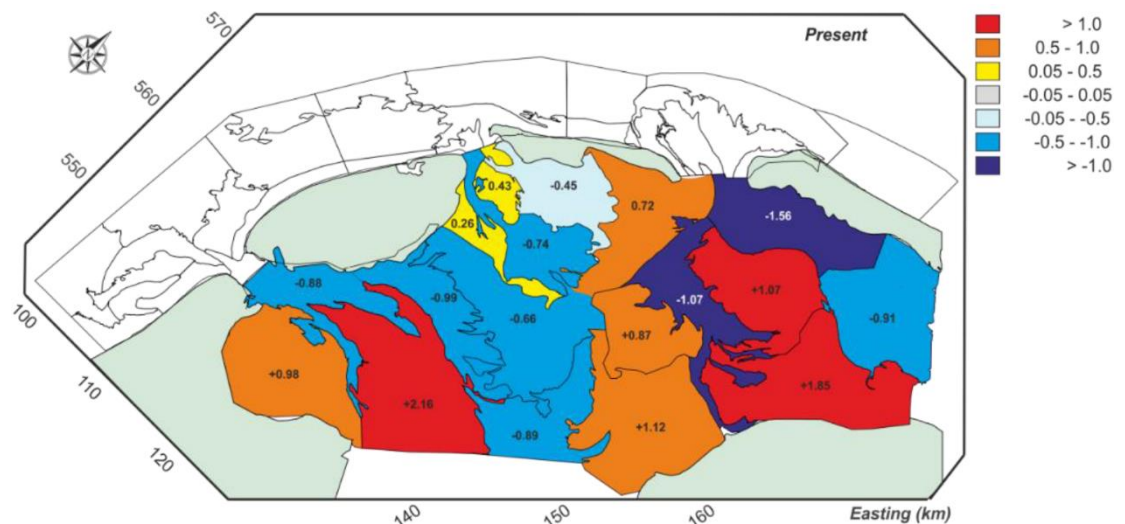
ELIAS (2019) vergelijkt de schattingen voor de langstransporten langs de Noordzeekust van Texel uit verschillende studies. De resultaten laten een behoorlijke spreiding zien: van jaarlijks 0,1 mln m<sup>3</sup> zuidwaarts tot 0,7 mln m<sup>3</sup> noordwaarts. Deze spreiding wordt deels verklaard door verschillen in rekenmethode. Daarnaast spelen ruimtelijke variaties ook een grote rol. Rond de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks ligt een divergentiepunt. Ten zuiden hiervan is het transport hoofdzakelijk richting het Zeegat van Texel gericht, ten noorden daarvan hoofdzakelijk in noordelijke richting. Eerdere studies hielden geen of beperkt rekening met getij-golf interactie. ELIAS (2019) komt met deze constatering en na combinatie van inzichten uit de bestudeerde studies tot een schatting van de langstransporten voor de centrale eilandkust van Texel van 1,0 mln m<sup>3</sup> per jaar (noordwaarts, gevisualiseerd in Figuur 6).

De duinen van Texel zijn over de periode 1965–2016 met ongeveer een kwart in volume toegenomen. De suppleties hebben hier na 1990 een grote rol in gehad. Slechts op een enkele locatie in het centrale deel van de kust van Texel vond kustafslag plaats.



#### 4.2.2 Bekken van het Zeegat van Texel

Het bekken van het Zeegat van Texel is transport capaciteit gelimiteerd (WANG et al. 2018). Dit wil zeggen dat de sedimentinvoer naar het bekken niet beperkt wordt door de hoeveelheid sediment dat daarvoor beschikbaar is maar door de transport capaciteit van het getij. Dat er relatief weinig laag energetische plekken zijn in de westelijke Waddenzee waar sediment kan bezinken speelt hierin ook mee. Door de afsluiting van de Zuiderzee met de Afsluitdijk (1932) past de morfologie van de Westelijke Waddenzee zich aan. In reactie hierop vult het bekken op met sediment. ELIAS (2019) heeft, op basis van metingen, berekend dat de volumeverandering van het bekken van het Zeegat van Texel over 1991–2015 jaarlijks gemiddeld 0,84 mln m<sup>3</sup> betrof (sedimentatie). Dit is slechts 31 % van de jaarlijks gemiddelde sedimentatie over de periode 1933–2015. Hoewel de sedimentatie dus nog steeds voortzet, is deze minder dan in de decennia direct na de voltooiing van de Afsluitdijk. Direct na de afsluiting vulden de grote geulen zich op met vooral slib en zand dat van de omliggende platen afkwam. Met de tijd is het stromingspatroon aangepast (van noord-zuid naar west-oost) waarop de morfologie zich heeft aangepast. Tegelijkertijd is de sedimentatie in omvang afgenomen. Overigens is de netto sedimentatie in het bekken groter dan de gemeten volumeverandering omdat er ook bodemdaling optreedt. Over de periode 1991–2015 betrof de netto resulterende sedimentatie in dit bekken jaarlijks gemiddeld 1,23 mln m<sup>3</sup> (combinatie van volumeverandering Marsdiep en bodemdaling). ELIAS (2019) heeft ook onderzocht in welke delen van dit bekken (en de andere bekkens van de Westelijke Waddenzee) sedimentatie plaatsvond. Een samenvatting van de trends over de periode 1991–2015 is weergegeven in Figuur 9. Duidelijk is dat, wat betreft het bekken van het Zeegat van Texel, de sedimentatie voornamelijk plaatsvindt in het zuidwesten en in het oosten van het bekken.

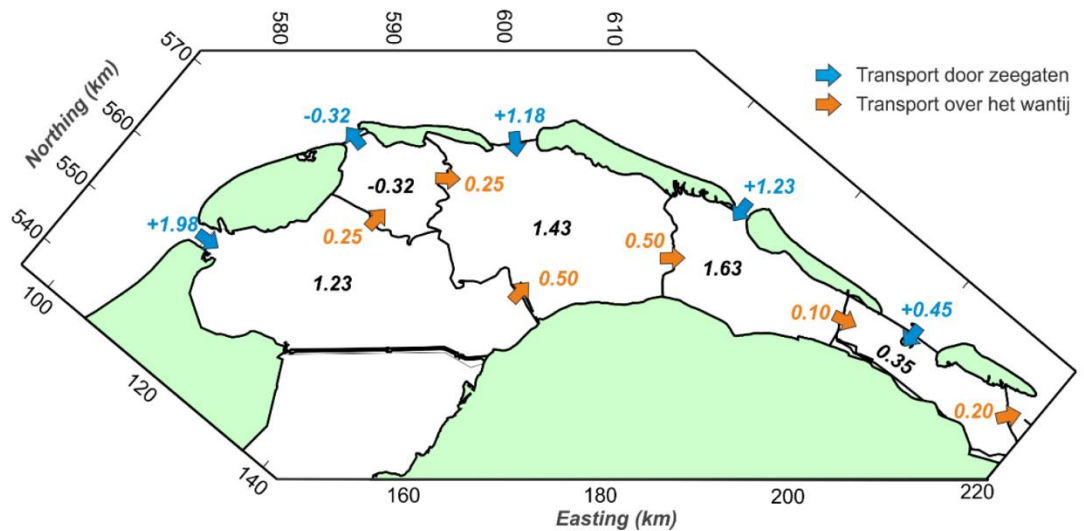


Figuur 9: Trends van sedimentvolumeveranderingen over de periode 1991–2015 voor verschillende deelgebieden binnen de Westelijke Waddenzee. De volumeveranderingen zijn in miljoenen m<sup>3</sup> per jaar aangegeven (overgenomen uit ELIAS 2019). Positieve getallen zijn sedimentatie, negatieve getallen erosie.

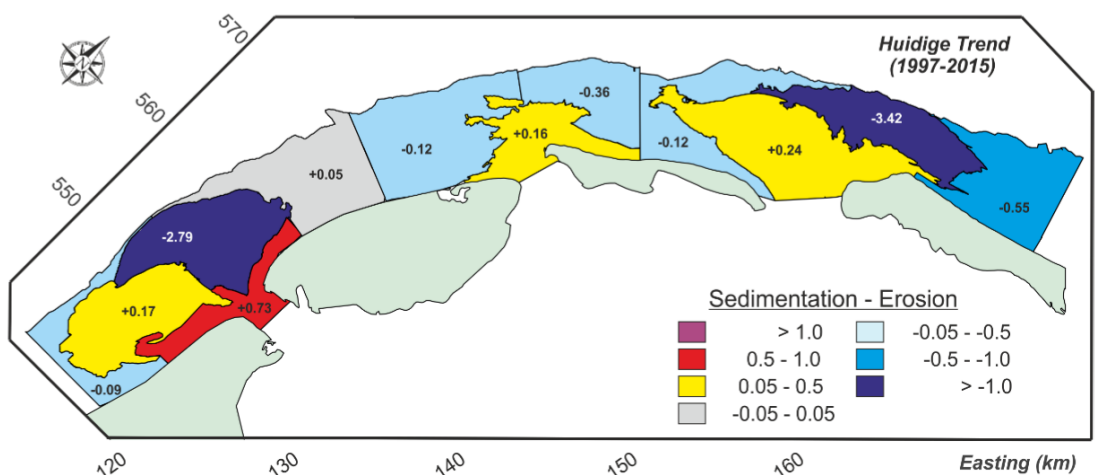
Ook relevant is hoeveel sediment er met de aangrenzende systemen wordt uitgewisseld. ELIAS (2019) heeft de uitwisseling van sediment tussen de Westelijke Waddenzee en de Noordzee en de bekkens onderling berekend. Dit is samengevat in Figuur 10. Op basis van de bodemveranderingen binnen het bekken is berekend dat er een netto import naar het bekken van het Zeegat van Texel plaatsvindt door het zeegat van gemiddeld 1,98 mln m<sup>3</sup> sediment per jaar (waarvan 1,88 mln m<sup>3</sup> zand; deze waarde is overgenomen in Kustgenese 2.0, NOLTE et al. 2020). Dit is de grootste netto import van alle zeegaten van de Westelijke Waddenzee. Verder is er ook netto uitwisseling van sediment met de aangrenzende bekkens. Er vindt gemiddeld 0,25 mln m<sup>3</sup> per jaar export plaats naar het Eierlandse Gat en 0,50 mln m<sup>3</sup> per jaar export naar het Zeegat van het Vlie. Dit transport vindt dus plaats over de wantijen waar wind-gedreven

stroming waarschijnlijk een belangrijke rol in speelt. Belangrijk om te vermelden is dat niet al het verplaatste sediment zand is. ELIAS (2019) onderschrijft dit en geeft aan dat het aandeel slib in de eerder genoemde getallen waarschijnlijk ten minste 8 % is (maar ook tientallen procenten kan zijn). Verwezen wordt naar OOST et al. (2021) voor nadere details over het aanbod, transport en de afzetting van slib in de Waddenzee.

De netto import door het Zeegat van Texel is een directe verliespost voor de buitendelta en aangrenzende kust. In Figuur 11 heeft ELIAS (2019) de huidige trends in de buitendelta van het Zeegat van Texel weergegeven. De grootste netto erosie vindt plaats in het polygoon waarbinnen Noorderhaaks valt (2,79 mln m<sup>3</sup> per jaar). Opgemerkt wordt dat de ontwikkelingen getoond in Figuur 11 inclusief de uitgevoerde suppleties zijn. Het is aan de suppleties te danken is dat bepaalde gebieden netto niet aan erosie onderhevig zijn (ELIAS & VAN DER SPEK 2017). Dit laat onverlet dat binnen de huidige praktijk de sedimentvraag van het bekken van het Zeegat van Texel vooral door de buitendelta vervuld wordt.



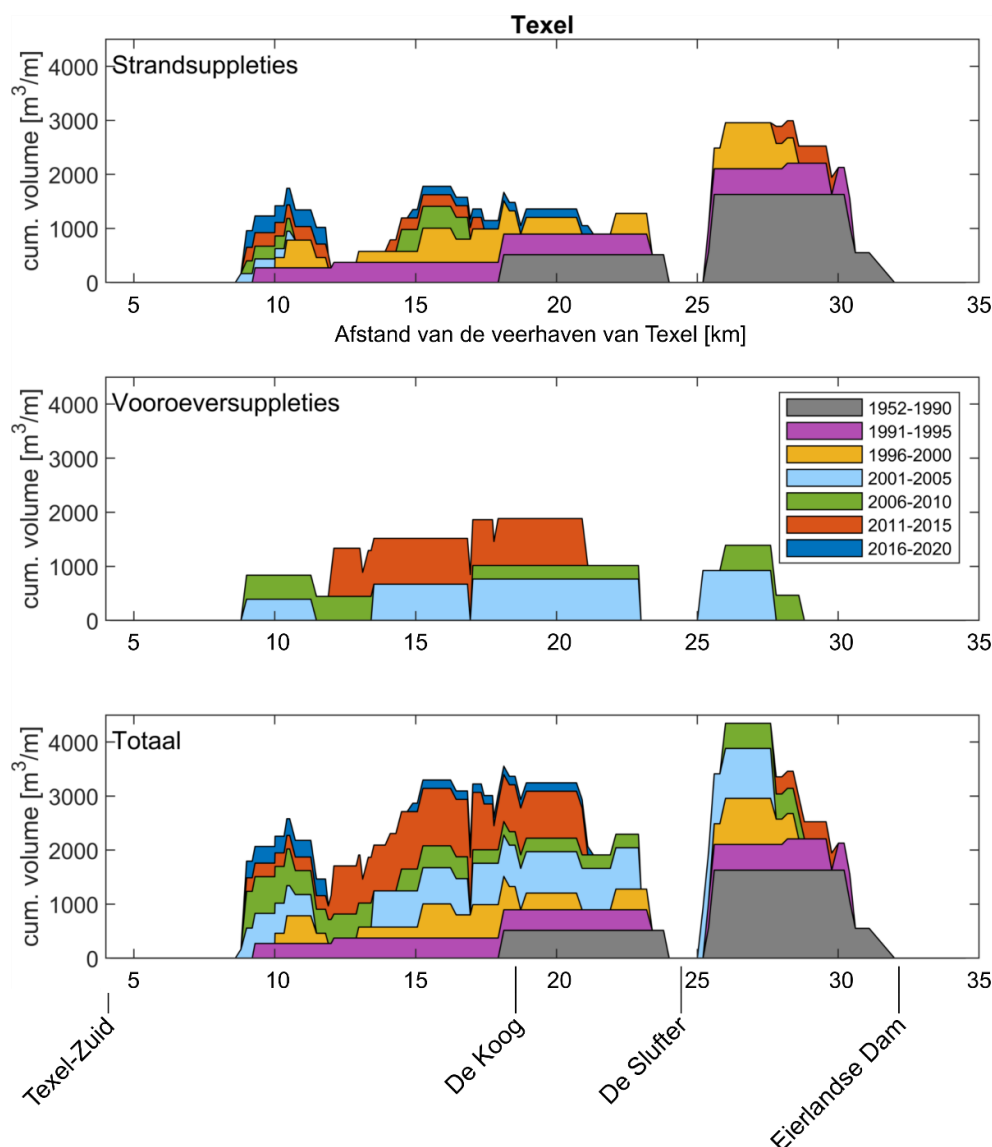
Figuur 10: Sedimentbalansmodel over de periode 1991–2015 (representatief voor de huidige ontwikkeling). De sedimenttransporten (blauw en oranje) en volumeveranderingen (zwart) zijn in miljoenen m<sup>3</sup> per jaar (overgenomen uit ELIAS 2019).



Figuur 11: Trends van sedimentvolumeveranderingen over de periode 1997–2015 voor de verschillende deelgebieden buiten de Westelijke Waddenzee (overgenomen uit ELIAS 2019). De getallen geven de volumeveranderingen in mln m<sup>3</sup> per jaar weer. De getoonde volumeveranderingen zijn inclusief de uitgevoerde suppleties en gecorrigeerd voor bodemdaling.

### 4.3 Uitgevoerde suppleties

In deze paragraaf wordt een kort overzicht gegeven van de uitgevoerde suppleties in het kustvak Texel op basis van de beheerbibliotheek van QUATAERT et al. (2020). Langs de kust van Texel wordt sinds 1979 gesuppleerd. Deze suppleties bestaan uit een combinatie van strandsuppleties (sinds 1979) en vooroeversuppleties (sinds 2002). De ruimtelijke verdeling van deze suppleties langs Texel en de perioden waarin deze zijn uitgevoerd zijn in Figuur 12 gepresenteerd. In noordelijke richting nemen de suppletiehoeveelheden toe. Rond De Slufter wordt niet gesuppleerd om verstoringen van dit gebied te minimaliseren en te voorkomen dat de monding van De Slufter dichtgaat. Noordelijk van de Slufter is relatief veel gesuppleerd, wel nemen de hoeveelheden richting de Eierlandse Dam af en nemen deze hoeveelheden ook af sinds de aanleg van de dam. Vooroeversuppleties die ten zuiden van de Eierlandse Dam zijn uitgevoerd, migreren naar het noorden in tegenstelling tot de meeste andere onderzochte vooroeversuppleties langs de Nederlandse kust (BRUINS 2016). Direct zuidelijk van de Eierlandse Dam worden geen suppleties uitgevoerd, de kustlijn is daar dankzij deze dam lokaal zeewaarts verschoven. Zoals in Paragraaf 4.2.1 beschreven, verstoren de suppleties het bankgedrag lokaal.



Figuur 12: Overzicht van de cumulatieve strand- (boven), vooroever- (midden) en totale (beneden) suppletiehoeveelheden in m<sup>3</sup>/m uitgevoerd langs de kust tussen Texel-Zuid en Texel-Noord tot en met 2020 (op basis van QUATAERT et al. 2020). Voor de Slufter (rond raai 2400) wordt niet gesuppleerd.

De buitendelta van het Zeegat van Texel is tot nu toe nog niet gesuppleerd voor het onderhoud van de kustlijn. Suppleties in de buitendelta kunnen echter wel meerwaarde bieden. In het kader van Kustgenese 2.0 is bij Ameland reeds een pilotsuppletie uitgevoerd (5 mln m<sup>3</sup> in 2018–2019; Rijkswaterstaat 2019). Nader onderzoek loopt om te bepalen wat het effect van deze pilotsuppletie is op de morfologie van de buitendelta van Ameland. Afhankelijk van de locatie van een suppletie in de buitendelta van het Zeegat van Texel zou deze ook de zuidwestkust van Texel kunnen voeden en daar kunnen bijdragen aan het onderhoud van de kustlijn (ELIAS et al. 2021). Afhankelijk van het ontwerp kan langs de zuidwestkust van Texel kusterosie worden tegengegaan door het voeden van sediment en kan de kust deels tegen golven worden afgeschermd. Voor de effecten van diverse suppletievarianten wordt verwezen naar ELIAS et al. (2021). Bepaling van de invloed van een dergelijke buitendeltasuppletie op de kustindicatoren, de precieze bijdrage aan de kustlijnhandhaving (bijvoorbeeld de mate waarin strandsuppleties verminderd kunnen worden) en de ecologische randvoorwaarden voor de uitvoering vereisen nog verder onderzoek.

## 5 Toekomstprojectie sedimentbehoefte kustfundament en suppletieopgave kustfuncties 2021–2035

In dit hoofdstuk wordt voor de kustvakken Noord-Holland en Texel een toekomstprojectie gegeven voor de periode 2021–2035 van de sedimentbehoefte van het kustfundament en de suppletieopgave (suppletievolume benodigd voor het onderhoud van de kustlijnfuncties). Aan de toekomstprojectie van de sedimentbehoefte van het kustfundament liggen de resultaten van *Kustgenese 2.0* ten grondslag (NOLTE et al. 2020; Rijkswaterstaat, 2020a; zie Paragraaf 5.1.1). De te verwachten suppletieopgave voor deze periode is gebaseerd op een extrapolatie van de uitgevoerde suppletievolumes over de periode 2000–2020 (zie Paragraaf 5.1.2).

Uitgangspunt voor de in dit hoofdstuk gepresenteerde resultaten is een voortzetting van de huidige praktijk. Bijvoorbeeld een continuering van de huidige verdeling tussen strand- en vooroever-suppleties (zie Paragrafen 3.3 en 4.3). Ook de onderliggende kentallen (emissie en kosten per m<sup>3</sup> suppletie) worden voor deze toekomstprojectie onveranderd geacht. Mogelijke toekomstige reducties in emissie van broeikasgassen – die bijvoorbeeld binnen het programma *Innovaties in de Kustlijnzorg* (IKZ) worden onderzocht – vallen dus buiten deze toekomstprojectie maar kunnen dus wel binnen de andere werkpakketten worden verkend.

### 5.1 Methodiek

#### 5.1.1 Bepaling toekomstprojectie sedimentbehoefte kustfundament

NOLTE et al. (2020) heeft voor de Nederlandse kust voor verschillende deelvakken de sedimentbehoefte bepaald die nodig is om het kustfundament met de zeespiegelstijging mee te laten groeien voor de periode 2020–2035. Voor de toekomstprojectie in deze studie wordt de in NOLTE et al. (2020) voor deze periode gedefinieerde voorkeursvariant gevolgd voor de zee-waartse grens (“50 jaar met onzekerheidsmarge”).

Benadrukt wordt dat de sedimentbehoefte van het kustfundament niet leidend is voor de verdeling van de suppletievolumes langs de Nederlandse kust, hiervoor is de instandhouding van de kustlijn leidend (Rijkswaterstaat, 2020a; besproken in Paragraaf 2). De sedimentbehoefte van het kustfundament is voor de toekomstprojectie in deze studie dus vooral van belang met het oog op de lange termijn. Daar waar vanuit de kustfuncties al een volume gesuppleerd wordt dat de sedimentbehoefte van het kustfundament overschrijdt, bestaat er geen noodzaak voor aanvullende suppleties ten behoeve van het meegroeien van het kustfundament met de zeespiegelstijging.

Opgemerkt wordt verder dat de in deze studie gebruikte deelvakken bewust afwijken van de deelvakken zoals gebruikt in NOLTE et al. (2020). De ligging van de zee-waartse en land-waartse grens is hetzelfde, maar de verdeling van de deelvakken is voor deze studie opgezet in lijn met de morfologische deelvakken zoals gedefinieerd in Figuur 1. Deze grenzen geven een betere scheiding aan tussen de gebieden waar wordt gesuppleerd wat van belang is voor de toekomstprojectie van de suppletievolumes (Paragraaf 5.1.2). Daarnaast is de sedimentbehoefte van het kustfundament in deze studie ook berekend voor de gehele kustvakken Noord-Holland en Texel. De sedimentbehoefte van het kustfundament uit NOLTE et al. (2020) is toebedeeld aan de kustvakken en deelvakken van deze studie naar ratio van samenvallen met de deelvakken uit NOLTE et al. (2020).

De sedimentbehoefte van het kustfundament is in NOLTE et al. (2020) bepaald als de som van (1) oppervlakte kustfundament maal de relatieve zeespiegelstijging, (2) zandtransport door de

zeegaten van de Waddenzee, (3) bodemdaling door gas-/zoutwinning, (4) zandtransport over de zeewaartse grens, (5) zandtransport over de landwaartse grens, (6) zandtransport over de landgrenzen en (7) zandtransport in/uit de Westerschelde. Voor de vakken die binnen het interessegebied van deze studie liggen, zijn alleen de eerste 5 onderdelen relevant. Voor het zandtransport over de landwaartse grens is een waarde van 0 mln m<sup>3</sup>/jaar aangenomen. Wegens grote onzekerheden van de grootte van het transport over de zeewaartse grens is ook daarvoor een waarde van 0 mln m<sup>3</sup>/jaar genomen. Wat resteert zijn dus de bijdragen van de zeespiegelstijging, bodemdaling en export naar de Waddenzee (specifiek naar het bekken van het Zeegat van Texel voor deze studie).

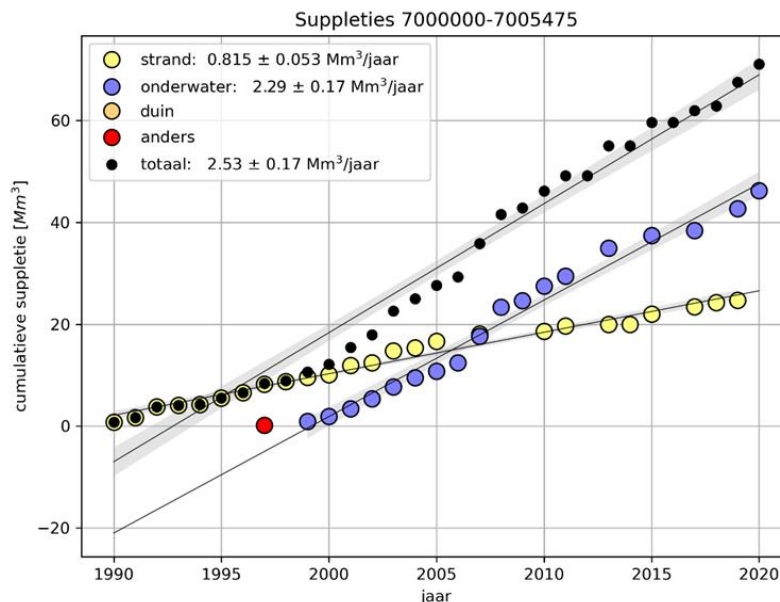
Aangezien het transport naar het bekken van het Zeegat van Texel hoofdzakelijk uit de buitendelta van het Zeegat van Texel afkomstig is (Paragraaf 4.2), is de hieruit volgende sedimentbehoefte voor de toekomstprojectie geheel aan het deelvak Callantsoog – Texel-Zuid toebedeeld. Hoe deze sedimentbehoefte te verdelen over de kustvakken Noord-Holland en Texel is enigszins arbitrair aangezien de grens tussen de kustvakken dwars door de monding van het Zeegat van Texel loopt (waar de noordgrens van het deelvak Callantsoog – Texel-Zuid juist ten noorden van het zeegat loopt; Figuur 1). Omdat het sediment dat naar het bekken van het Zeegat van Texel transporteert hoofdzakelijk uit het kustvak Noord-Holland afkomstig is, is voor deze studie 90 % van deze sedimentbehoefte aan dit kustvak gerelateerd en 10 % van deze sedimentbehoefte aan het kustvak van Texel. Benadrukt wordt dat dit een ruwe schatting is, gebaseerd op de morfologische veranderingen in de buitendelta en omliggende kustzone (dus niet op de langstransporten). Deze schatting heeft alleen impact op de sedimentbehoefte van het kustfundament op kustvakkniveau, niet op de grootte van deze sedimentbehoefte op deelvakkniveau. De resulterende sedimentbehoefte van het kustfundament voor de deelvakken en kustvakken worden in Paragraaf 5.2 gepresenteerd.

### 5.1.2 Bepaling toekomstprojectie suppletieopgave kustfuncties

De toekomstprojectie van de suppletieopgave is berekend op basis van de uitgevoerde suppleties in de periode 2000–2020. Hiertoe zijn de lineaire trends van de cumulatieve strand- en vooroeversuppleties berekend voor zowel de kustvakken Noord-Holland en Texel alsook de deelvakken (Figuur 1). In deze trendberekening zijn de volgende volumes niet meegenomen: (i) de stortvolumes in de stortvakken ten noorden van de IJgeul (voornamelijk slib; zie Paragraaf 3.2) en (ii) de grote strandsuppletie bij de Hondsbossche Duinen van 35 mln m<sup>3</sup> (2014–2015) omdat deze niet onder het reguliere onderhoud van de kustlijn in de periode tot 2035 valt. De berekende lineaire trends zijn vervolgens geëxtrapoleerd om tot een toekomstprojectie van de suppletieopgave voor de periode 2021–2035 te komen.

De analyseperiode 2000–2020 is representatief voor het recente suppletiebeleid in de kustvakken Noord-Holland en Texel. Hoewel de keuze voor deze periode enigszins arbitrair is, is deze periode een goed compromis tussen een voldoende groot aantal suppleties om over te extrapoleren (10 jaar is bijvoorbeeld te kort voor een aantal deelvakken, zie de bijlage) en een periode die recent genoeg is om representatief te zijn voor het huidige beleid. De periode vanaf 2000 is geschikt omdat toen het vigerende suppletiebeleid is gestart met de toepassing van vooroeversuppleties vanaf 1999. Figuur 13 illustreert voor het kustvak Noord-Holland de verschillen met de periode daarvoor.

Om onzekerheden in de schatting als gevolg van de spreiding in de trends aan te geven, is voor de lineaire trends een 95 % betrouwbaarheidsinterval bepaald voor de strand-, vooroevers- en totale suppletiehoeveelheden. Voor elk deelvak is de onzekerheidsmarge bepaald tenzij er minder dan drie suppletiecampagnes uitgevoerd zijn binnen de periode 2000–2020. Indien er in deze periode slechts twee suppleties zijn uitgevoerd, is alleen de trend bepaald. Bij slechts één suppletie in deze periode is de jaarlijks-gemiddelde suppletieopgave geschat door het zandvolume over deze periode te spreiden.



Figuur 13: Cumulatieve suppletievolumes en lineaire trend tussen 1990 en 2020 voor het kustvak Noord-Holland. Rond 2000 is een trendbreuk zichtbaar in het totaal gesuppleerde volume. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.

De herhalingstijd van de suppleties is per raai en per deelvak bepaald op basis van de suppleties in de periode 2000–2020. De herhalingstijd houdt geen rekening met de gesuppleerde zandvolumes, maar is in de vorm van een frequentie berekend als het aantal campagnes binnen de periode 2000–2020 gedeeld door de lengte van deze periode.

De resultaten van de analyse worden samengevat in Paragraaf 5.2. Aanvullende figuren van de uitgevoerde analyse staan in de bijlage. Opgemerkt wordt dat de toekomstprojectie van de suppletieopgave voor 2021–2035 bepaald is op data tot en met 2020. Op het moment van schrijven zijn er al nieuwe suppleties uitgevoerd of geprogrammeerd zoals getoond in Tabel 1. In 2021 wordt er in totaal 1,1 mln m<sup>3</sup> langs de Noord-Hollandse kust gesuppleerd en 7 mln m<sup>3</sup> langs de kust van Texel.

Tabel 1: Suppleties in 2021 voor de kustvakken Noord-Holland en Texel. Dit overzicht is op 23 juli 2021 verkregen van de Rijkswaterstaat website <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterbeheer/bescherming-tegen-het-water/maatregelen-om-overstromingen-te-voorkomen/kustonderhoud/planning-en-aanpak.aspx>.

Kustvak	Locatie	Type suppletie	Volume	Tijdvak
Noord-Holland	Julianadorp	Strandsuppletie	1,1 mln m <sup>3</sup>	December 2020 t/m april 2021 (gereed)
Texel	Texel-Zuidwest	Strandsuppletie	1 mln m <sup>3</sup>	April t/m juni 2021 (gereed)
Texel	Texel-Midden	Vooroeversuppletie	4,5 mln m <sup>3</sup>	Maart t/m december 2021
Texel	Texel-Noord	Vooroeversuppletie	1,5 mln m <sup>3</sup>	Maart t/m september 2021

## 5.2 Toekomstprojectie suppletievolumes en -frequentie

De te verwachten suppletieopgave en de sedimentbehoefte van het kustfundament zijn, met de methode zoals beschreven in Paragraaf 5.1, berekend voor zowel de kustvakken Noord-Holland en Texel alsook de in deze studie gedefinieerde deelvakken. Tabel 2 toont deze volumes voor de periode 2021–2035 voor beide kustvakken, inclusief een schatting van de onzekerheid van de suppletieopgave (bepaald als variatie van de bepaalde trend). Voor het kustvak Noord-Holland is 45±3 mln m<sup>3</sup> aan suppleties ten behoeve van de kustfuncties voorzien,

waarvan 76 % vooroever-suppleties. Dit is meer dan de lokale sedimentbehoefte van het kustfundament voor dit kustvak (39 mln m<sup>3</sup> over deze periode, waarvan 67% de export naar het bekken van het Zeegat van Texel). Opgemerkt wordt dat er jaarlijks gemiddeld 2,7 mln m<sup>3</sup> aan baggerspecie (voornamelijk slib) in de stortvakken ten noorden van de IJgeul gestort wordt (Paragraaf 3.2), wat mogelijk een substantiële sedimentbron voor de kustlijn vormt. Als er in de toekomst minder of niet meer gestort wordt, zou dat tot een toename van de suppletieopgave in het kustvak Noord-Holland kunnen leiden (zie ook Paragraaf 7.1). Voor het kustvak Texel is ruim 25±3 mln m<sup>3</sup> aan suppleties ten behoeve van de kustfuncties voorzien, waarvan 80 % vooroever-suppleties. Ook dit is meer dan de sedimentbehoefte van het kustfundament (8 mln m<sup>3</sup> over deze periode).

Bij de suppletieopgave is hier ook een eerste invulling gegeven aan mogelijk aanvullende suppleties in het Waddengebied. Binnen Kustgenese 2.0 is namelijk geopperd dat, naast het voortzetten van de huidige praktijk, het waarschijnlijk nodig is langs de Noordzeekust van het Waddengebied aanvullend te suppleren om in de sedimentbehoefte van die regio te blijven voorzien (Variant B in Rijkswaterstaat 2020a). Voor deze studie is simpelweg 1/5<sup>e</sup> – uitgaande van een gelijke verdeling over alle zeegaten – van het in Kustgenese 2.0 geopperde suppletievolume opgelegd aan de buitendelta van het Zeegat van Texel. Dit komt daar neer op orde 3 mln m<sup>3</sup> voor de periode 2021–2035. Dit is ter illustratie en nog geen besluit en dus vooruitlopend op het beleid.

In Tabel 3 zijn de bovengenoemde volumes onderverdeeld over de in deze studie gedefinieerde deelvakken. Voor vrijwel alle deelvakken wordt voorzien dat er voor het behoud van de kustfuncties, hoofdzakelijk de ligging van de kustlijn, meer sediment nodig is dan de sedimentbehoefte van het kustfundament. Binnen het deelvak Texel-Zuid – Slufter wordt verwacht dat er wel 7 keer zoveel sediment nodig is voor het behoud van de kustlijn dan dat er voor de sedimentbehoefte van het kustfundament lokaal nodig is. Daarentegen wordt binnen het deelvak Callantsoog – Texel-Zuid ongeveer de helft aan suppleties voorzien vergeleken met de lokale sedimentbehoefte van het kustfundament. De vraag is wel of het noodzakelijk is dat de buitendelta geheel meegroeit met het kustfundament. Als dat niet het geval is, kan het te verantwoorden zijn lokaal wat minder suppleren dan de sedimentbehoefte van het kustfundament. Voor een verdere detaillering/voor de visualisatie van de suppletievolumes wordt naar Tabel 3 en Figuur 14 tot en met Figuur 17 verwezen.

Figuur 14 toont de toekomstprojectie van de gemiddelde strand- en vooroever-suppletievolumes per jaar voor elke JarKus-raai (raaien waarlangs in het kader van het JarKus programma jaarlijks hoogte- en dieptemetingen worden verricht) ten behoeve van de kustfuncties in het kustvak Noord-Holland voor de periode 2021–2035. In Figuur 15 is de bijbehorende geprojecteerde suppletiefrequentie (aantal te verwachten suppleties in deze periode) weergegeven. De ruimtelijke verdeling van de geprojecteerde suppleties (afgeleid van de periode 2000–2020; zie Paragraaf 5.1.2 voor de methodiek) is ruwweg in lijn met de ruimtelijke verdeling van de aangebrachte suppleties over de periode 1962–2020 (Paragraaf 3.3). De pieken in suppletievolumes en -frequentie zijn dus vooral in de erosiegebieden Egmond, Bergen, Callantsoog en Julianadorp – Den Helder te vinden. Voor de meeste raaien worden grotere vooroever-suppletievolumes dan strandsuppletievolumes voorzien (zie ook Paragraaf 2 en 3.3). Het maximale geprojecteerde strandsuppletievolume per raai bedraagt 0,015 mln m<sup>3</sup>/jaar (bij de Hondsbossche Duinen), het maximale vooroever-suppletievolume per raai bedraagt 0,036 mln m<sup>3</sup>/jaar (bij Den Helder) en het maximale totale suppletievolume per raai ligt bij 0,046 mln m<sup>3</sup>/jaar (bij Den Helder). Terwijl de volumes van de vooroever-suppleties over het algemeen groter zijn dan van de strandsuppleties, zullen de strandsuppleties in veel gebieden langs de Noord-Hollandse kust vaker aangebracht moeten worden (Figuur 15). Dit geldt vooral voor de kust tussen Julianadorp en Den Helder, waar de grote geulen van het zeegat nabij het strand liggen en landwaarts opdringen. Voor dit gebied wordt de maximale strandsuppletiefrequentie verwacht met 3,6 suppleties in de periode 2021–2035. De maximale vooroever-suppletiefrequentie (3,6 suppleties tussen 2021 en 2035) wordt bij Bergen aan Zee en Callantsoog verwacht.



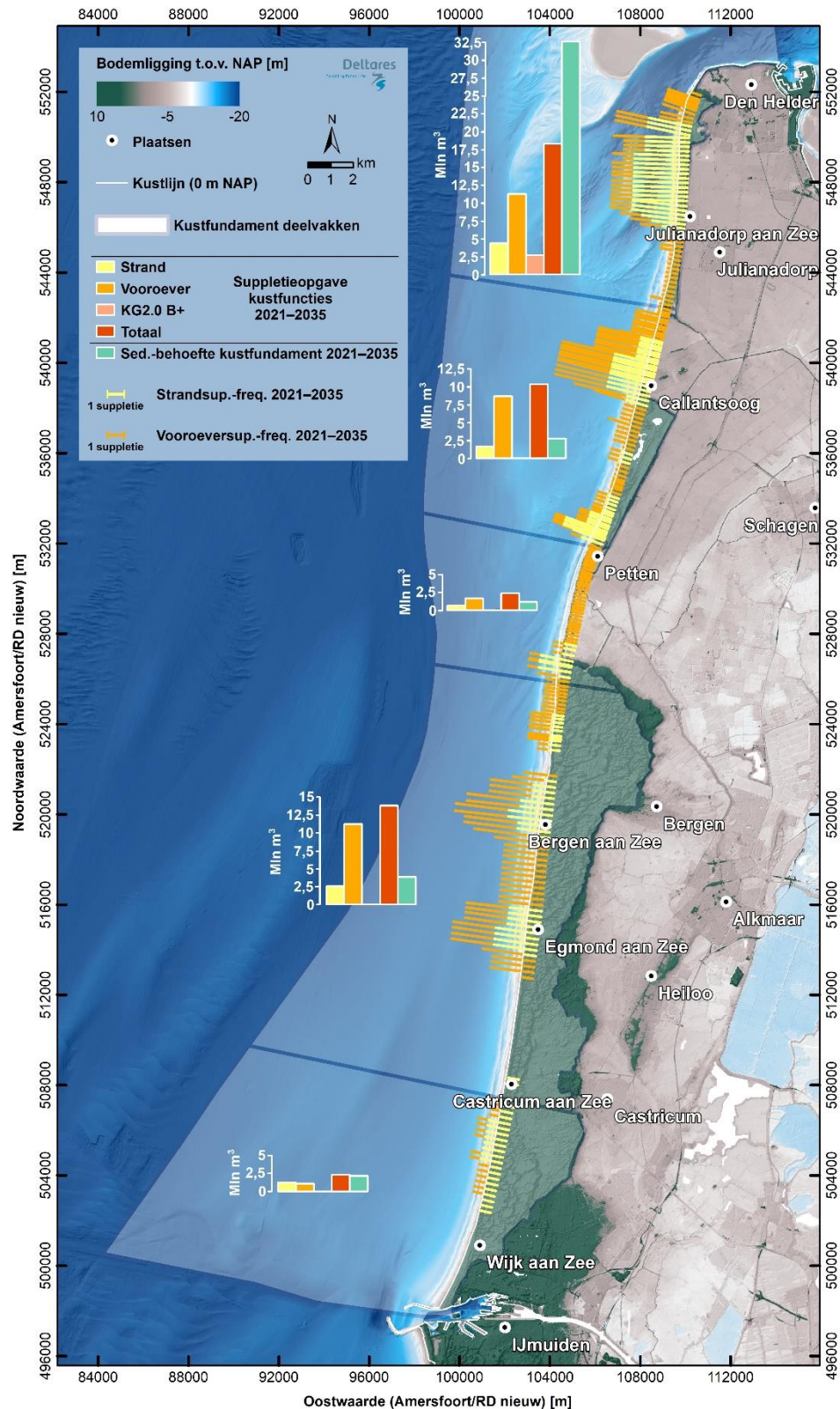
Tabel 2: Totale sedimentbehoefte kustfundament en suppletieopgave ten behoeve van de kustfuncties voor de kustvakken Noord-Holland en Texel over de gehele periode 2021-2035. Een onderverdeling is gemaakt tussen strand- en vooroeveroppleties met een schatting van de onzekerheid. Een conceptuele uitwerking van de mogelijke extra suppleties ten behoeve van variant B uit Kustgenese 2.0 (Rijkswaterstaat 2020a) is tussen haakjes weergegeven. Een toelichting van de berekening van de kosten, CO<sub>2</sub> uitstoot en MKI met bijbehorende kentallen is in paragrafen 5.3 en 5.4 gegeven. MKI staat voor MilieuKostenIndicator en wordt uitgedrukt als schaduwkosten (s€).

		Kustvak Noord-Holland		Kustvak Texel			Totaal
<b>Sedimentbehoefte kustfundament</b>	mln. m <sup>3</sup>	39		8			47
<b>Suppletieopgave kustfuncties</b>		Strand	Vooroever	Strand	Vooroever	KG2 B+	
Volumes	mln. m <sup>3</sup>	10,7±1,3	34,4±2,9	5,1±1,4	20,2±2,7	(2,7)	70 (73)
Kosten	mln. € incl. btw	59	120	28	71	(9)	278 (287)
CO <sub>2</sub> uitstoot	kton CO <sub>2</sub>	51	103	25	61	(8)	240 (248)
MKI	mln. s€	9	25	4	15	(2)	54 (56)

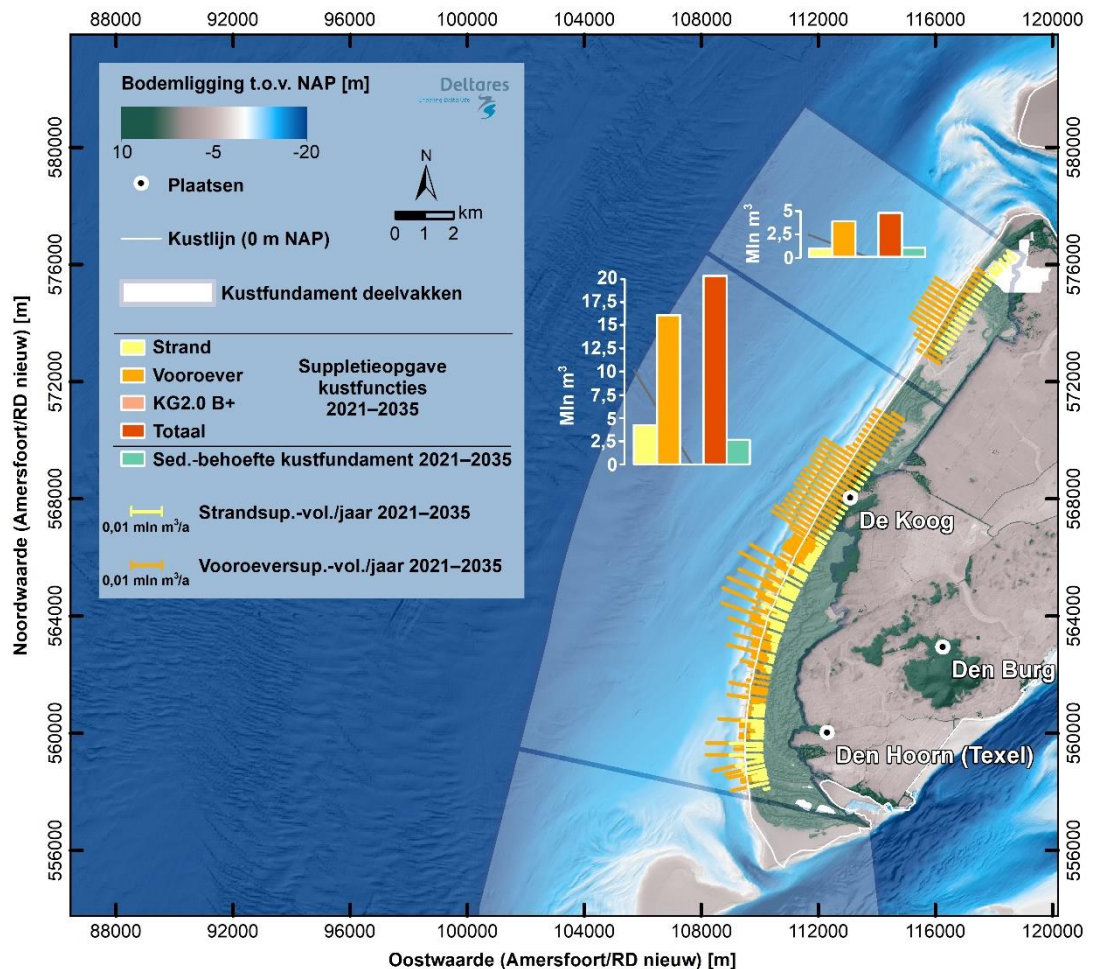
Tabel 3: Onderverdeling van Tabel 2 naar de verschillende deelvakken zoals gevisualiseerd in Figuur 1. Als er voor de bepaling van de suppletieopgave slechts twee suppleties in de referentieperiode binnen een bepaald deelvak zijn uitgevoerd, is een schatting van de onzekerheid als variatie van de trend niet mogelijk en is de schatting oranje gemarkeerd. HD = Hondsbossche Duinen. \*Opgemerkt wordt dat de schatting voor de suppletieopgave van de kustfuncties voor deelvak 3 onbetrouwbaar is omdat deze gebaseerd is op de periode voor aanleg van de HD.

		Deelvak 1 IJmuiden – Castricum		Deelvak 2 Castricum – HD-Zuid		Deelvak 3 HD-Zuid – HD-Noord		Deelvak 4 HD-Noord – Callantsoog		Deelvak 5 Callantsoog – Texel-Zuid (Zeegat van Texel)			Deelvak 6 Texel-Zuid – Slufter		Deelvak 7 Slufter – Texel-Noord		Totaal
<b>Sedimentbehoefte kustfundament</b>	mln. m <sup>3</sup>	2,2		3,9		1,2		2,8		33,0			2,7		1,0		47
<b>Suppletieopgave kustfuncties</b>		Strand	Vooroever	Strand	Vooroever	Strand	Vooroever	Strand	Vooroever	Strand	Vooroever	KG2 B+	Strand	Vooroever	Strand	Vooroever	
Volumes	mln. m <sup>3</sup>	1,3	1,1	2,6±0,6	11,4±1,2	0,7±1,5*	1,7*	1,7±0,7	8,8±2,5	4,4±1,8	11,4±3,8	(2,7)	4,3±1,0	16,3±2,1	0,9	3,9	70 (73)
Kosten	mln. € incl. btw	7	4	14	40	4	6	9	31	24	40	(9)	23	57	5	14	278 (287)
CO <sub>2</sub> uitstoot	kton CO <sub>2</sub>	6	3	13	34	3	5	8	26	21	34	(8)	20	49	4	12	240 (248)
MKI	mln. s€	1	1	2	8	1	1	1	6	4	8	(2)	4	12	1	3	54 (56)





Figuur 15: Toekomstprojectie van de strand- (geel) en vooroeversuppletiefrequenties (oranje) per JarKus-raai ten behoeve van de kustfuncties in het kustvak Noord-Holland voor de periode 2021–2035. De frequentie is hier gedefinieerd als het aantal te verwachten suppleties in deze 15 jaar. De staafdiagrammen geven de suppletieopgave ten behoeve van de kustfuncties en de sedimentbehoefte voor het kustfundament per deelvak zoals in Tabel 3 vermeld weer. Een toelichting op de berekening van de toekomstprojectie is in paragrafen 5.1.1 en 5.1.2 gegeven.

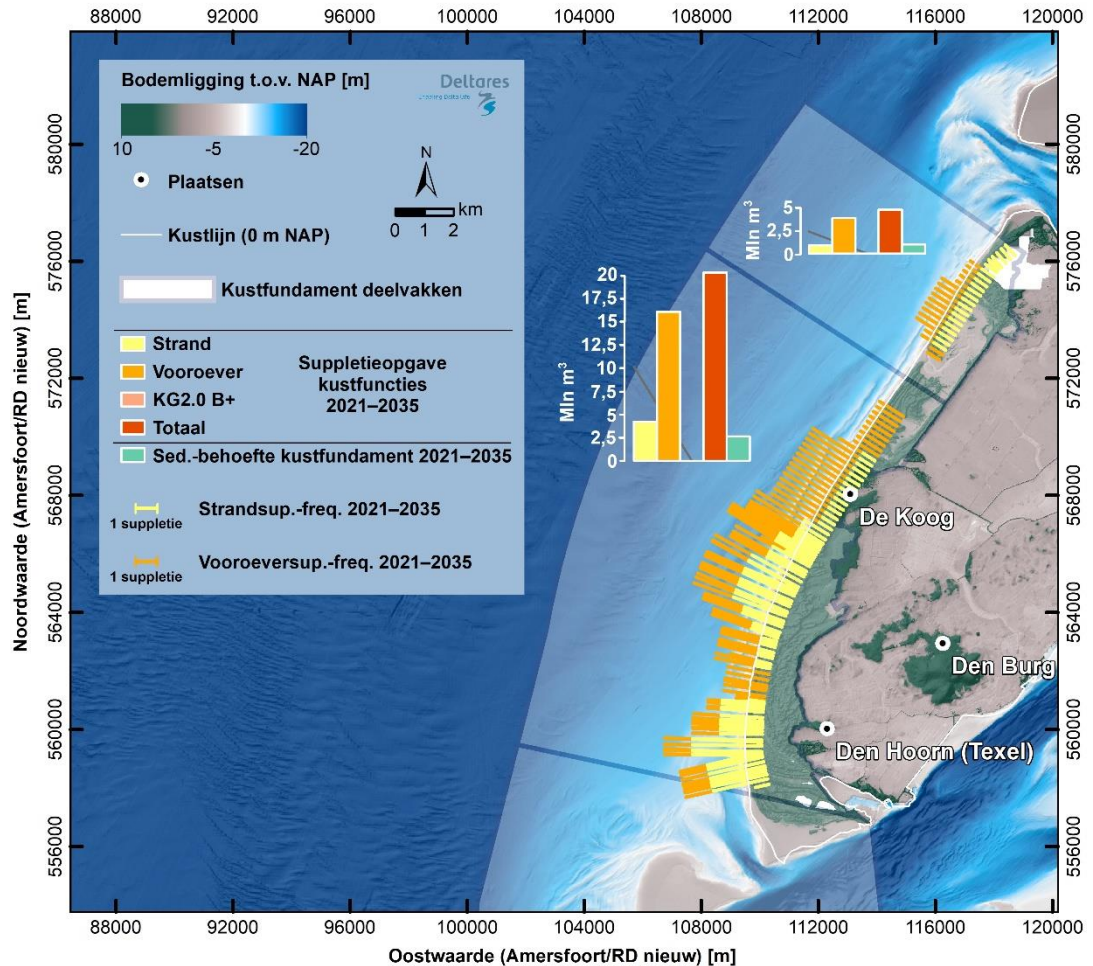


Figuur 16: Toekomstprojectie van de gemiddelde strand- (geel) en vooroever<sup>suppletievolumes</sup> (oranje) per JarKus-raai per jaar ten behoeve van de kustfuncties in het kustvak Texel voor de periode 2021–2035. De staafdiagrammen geven de suppletieopgave ten behoeve van de kustfuncties en de sedimentbehoefte voor het kustfundament per deelvak zoals in Tabel 3 vermeld weer. Een toelichting op de berekening van de toekomstprojectie is in paragrafen 5.1.1 en 5.1.2 gegeven.

Opgemerkt moet worden dat de geprojecteerde volumes en frequenties per raai langs de Hondsbossche Duinen veel minder betrouwbaar zijn dan voor de rest van de Noord-Hollandse kust, omdat hier tussen 2014–2015 een grote strandsuppletie aangebracht is (Paragraaf 3.3), waardoor in dit gebied in de recente jaren geen kustlijn<sup>zorg</sup> nodig is en de uitgevoerde suppleties in dit gebied geen betrouwbaar beeld geven voor de toekomstige suppletieopgave. De toekomstige suppleties worden hier vooral gestuurd door het onderhoud van de Hondsbossche Duinen.

De toekomstprojecties van de strand- en vooroever<sup>suppletievolumes</sup>/frequenties per JarKus-raai voor de periode 2021–2035 voor het kustvak Texel zijn in Figuur 16 en Figuur 17 weergegeven. Ook voor de kust van Texel komt de ruimtelijke verdeling van de geprojecteerde suppletievolumes en -frequentie (afgeleid van de periode 2000–2020; zie Paragraaf 5.1.2 voor de methodiek) op hoofdlijnen overeen met de ruimtelijke verdeling van de aangebrachte suppleties over de periode 1952–2020 (Paragraaf 4.3). Wel is er na aanleg van de Eierlandse Dam in 1995 relatief wat minder gesuppleerd in het noordelijke deel van dit kustvak (Paragraaf 4.2.1). Er worden vooral grote onderhoudsinspanningen in vrijwel het gehele deelvak 6 (Texel-Zuid – Slufter) verwacht en in mindere mate ten noorden van de Slufter. Wel is het de

verwachting dat, als gevolg van de aanlanding van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (Paragraaf 4.2.1), de erosie van het zuidwesten van Texel lokaal zal verminderen (ELIAS & VAN DER SPEK 2017) wat in lagere suppletievolumina kan resulteren. Ook langs de Texelse kust zijn de geprojecteerde vooroeversuppletievolumes per raai (maximaal 0,018 mln m<sup>3</sup>/jaar) over het algemeen hoger dan de strandsuppletievolumes (maximaal 0,011 mln m<sup>3</sup>/jaar; Figuur 16). Het maximale totale suppletievolume per raai bedraagt 0,024 mln m<sup>3</sup>/jaar (ca. 4 km zuidwestelijk van De Koog). Terwijl in de zuidelijke helft van Texel de geprojecteerde strandsuppletiefrequentie per raai vaak hoger is dan de vooroeversuppletiefrequentie, is het in de noordelijke helft andersom (Figuur 17). Maximaal worden er 3,6 strandsuppleties per raai voorzien in de periode 2021–2035 (westelijk van Den Hoorn), de maximale vooroeversuppletiefrequentie is 2,9 over deze periode (ca. 1,5 km zuidwestelijk van De Koog).



Figuur 17: Toekomstprojectie van de strand- (geel) en vooroeversuppletiefrequenties (oranje) per JarKus-raai ten behoeve van de kustfuncties in het kustvak Noord-Holland voor de periode 2021–2035. De frequentie is hier gedefinieerd als het aantal te verwachten suppleties in deze 15 jaar. De staafdiagrammen geven de suppletieopgave ten behoeve van de kustfuncties en de sedimentbehoefte voor het kustfundament per deelvak zoals in Tabel 3 vermeld weer. Een toelichting van de berekening op de toekomstprojectie is in paragrafen 5.1.1 en 5.1.2 gegeven.

### 5.3 Toekomstprojectie suppletiekosten

Voor de berekening van de kosten van de geprojecteerde suppleties is uitgegaan van de kentallen verkregen van Rijkswaterstaat zoals ook gebruikt voor de toekomstprojecties tot 2035 binnen het Kustgenese 2.0 project (Rijkswaterstaat 2020a). Strandsuppleties worden voor gemiddeld 5,50 € per m<sup>3</sup> inclusief BTW uitgevoerd, vooroeversuppleties voor gemiddeld 3,50 € per m<sup>3</sup> inclusief BTW. Bij veranderingen in jaarlijkse suppletievolumes vallen de kosten

mogelijk anders uit. Voor de mogelijk aanvullende suppleties ten behoeve van Variant B uit Kustgenese 2.0 (waarschijnlijk uitgevoerd als buitendeltasuppletie) zijn de kosten voor deze berekening gelijk gesteld aan de kosten voor vooroeversuppleties.

De verwachting is dat over 2021–2035 voor ongeveer 278 mln € gesuppleerd zal worden in de beschouwde kustvakken. Voor het kustvak Noord-Holland zullen de kosten ongeveer 179 mln € bedragen en voor het kustvak Texel ongeveer 99 mln €. De aanvullende kosten voor de mogelijke suppleties ten behoeve van Variant B uit Kustgenese 2.0 zouden voor deze kustvakken orde 9 mln € bedragen. Een verdere detaillering van de kosten is in Tabel 2 en Tabel 3 gegeven.

#### 5.4 Toekomstprojectie CO<sub>2</sub>-uitstoot en milieukostenindicator (MKI)

Analoog aan de berekening van de kosten is bij de berekening van de CO<sub>2</sub> emissie uitgegaan van de kentallen zoals gebruikt binnen Kustgenese 2.0. Dit is beperkt tot de CO<sub>2</sub> emissie zelf, CO<sub>2</sub>-equivalenten van andere broeikasgassen zijn hierin dus niet beschouwd. Voor strandsuppleties is in deze berekeningen gerekend met een uitstoot van 4,8 kg CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup> en voor vooroeversuppleties met een uitstoot van 3,0 kg CO<sub>2</sub> per m<sup>3</sup>. Voor de berekening van de aanvullende uitstoot van Variant B van het Kustgenese 2.0 project is uitgegaan van de uitstoot behorend bij vooroeversuppleties.

Naast de CO<sub>2</sub> emissie is ook de bredere milieubelasting van het suppleren beschouwd. In de MilieuKostenIndicator (MKI) is de milieubelasting van het suppletieproces uitgedrukt in schaduwkosten. Dit zijn geen daadwerkelijk gemaakte kosten maar een indicatie van de milieubelasting in kosten. Voor de MKI zijn kentallen overgenomen uit TKI-DCC werkpakket 3 (Hoofdstuk 1) omdat de MKI niet is opgenomen binnen Kustgenese 2.0. Voor strandsuppleties is hier uitgegaan van 0,84 MKI/m<sup>3</sup> en voor vooroeversuppleties van 0,74 MKI/m<sup>3</sup>. Deze kentallen zijn berekend uitgaande van 100 % MDO (marine diesel oil) en een CO<sub>2</sub> equivalent waarde van 103 €/ton. Dit is in lijn met de huidige kustlijnzorg projecten.

De te verwachten uitstoot over de periode 2021–2035 is ongeveer 240 kton CO<sub>2</sub> voor de suppleties binnen de beschouwde kustvakken waarvan ongeveer 154 kton CO<sub>2</sub> voor de suppleties binnen het kustvak Noord-Holland en 86 kton CO<sub>2</sub> voor de suppleties binnen het kustvak Texel. Over deze periode bedragen de schaduwkosten van de MKI 54 mln €, waarvan ongeveer 34 mln € binnen het kustvak Noord-Holland en ongeveer 19 mln € binnen het kustvak Texel. Voor de mogelijk aanvullende suppleties ten behoeve van Variant B uit Kustgenese 2.0 binnen deze kustvakken zou over deze periode kunnen worden uitgegaan van een uitstoot van 8 kton CO<sub>2</sub> en schaduwkosten van de MKI van 2 mln €. Een verdere detaillering van de emissie is in Tabel 2 en Tabel 3 gegeven.

## 6 Relevante ecologische aspecten

In deze fase van het TKI-DCC project is een kwantitatieve analyse van de verwachte ecologische effecten van de toekomstige kustsuppleties (Hoofdstuk 5) nog niet aan de orde. Wel wordt in dit hoofdstuk een kwalitatieve beschrijving gegeven van ecologische aspecten die relevant zijn voor het beoordelen van onderhoudsconcepten en uitvoeringsmethoden. Een kwantitatieve analyse zal mogelijk later op basis van de inzichten en uitkomsten van WP2 – in samenwerking met de andere werkpakketten – uitgevoerd worden.

### 6.1 Bodemdieren

Voor de ecologische impact van kustsuppleties spelen de effecten op de bodemdiergemeenschap een centrale rol. Voor bodemdieren langs de Nederlandse kust geldt dat deze zeer sterk gestuurd worden door het aanwezige sediment, de waterbeweging en de daarbij horende morfodynamica van de bodem (JANSSEN et al. 2004, JANSSEN et al. 2005; HOLZHAUER et al. 2020) maar ook de mate van zuurstofdoordringing in de bodem (redox diepte; onder andere HOLZHAUER et al. ingediend) en troebelheid/hoeveelheid slib in het water zijn van belang. Tevens is de voedselbeschikbaarheid en de verspreiding en vestiging van larven van belang. De gehele set aan omgevingsparameters samen met de mate van verandering in deze omgevingsparameters, continu of enkel tijdens stormen, bepalen uiteindelijk waar welke gemeenschap voorkomt en hoe groot de lokale verschillen zijn (YSEBAERT et al. 2002, FOLMER et al. 2017). Het voorkomen van bodemdieren langs de Noord-Hollandse kust werd onder andere in de studies van KAAG (2004; haven van IJmuiden), JANSEN et al. (2004, 2005; Castricum en Egmond), VAN DALFSEN (2005; Egmond), WIJSMAN & CRAEYMEERSCH (2016; Callantsoog) en VAN DER WAL (2008; Petten, Julianadorp – Den Helder) onderzocht. Vergelijkbare studies voor de Noordzeekust van Texel zijn LEOPOLD (2002a, 2000b, 2003).

Gezien de dynamische omstandigheden bestaat de bodemdiergemeenschap in de ondiepe kustzone voornamelijk uit opportunistische soorten die zich snel kunnen verplaatsen of ingraven in het zand. Dit zijn onder andere kleine (< 1 cm) wormen, kreeftachtigen en schelpdieren samen met grotere (> 1 cm) dieren zoals krabben en zeesterren die zowel in als op het zand leven. Op locaties met hardsubstraat zoals stenen of schelpen kunnen ook hardsubstraat soorten voorkomen zoals de Zeeanjelier of de Slibannemoon. Over het algemeen wordt ervan uitgegaan dat de bodemdiergemeenschap zich binnen 1 tot 5 jaar na suppleren kan herstellen waarbij voor veel soorten geldt dat de biomassa en de dichtheid van voorkomen in slechts ongeveer 1 jaar weer terug zijn op het niveau van voor de verstoring (VERGOUWEN & MEIJER-HOLZHAUER 2016; Rijkswaterstaat 2020a). Hoe groot de impact precies is, hangt onder andere af van de locatie van de suppletie binnen het kustvak (kustlangs en kustdwars).

Op de onderwateroever van een kust met brekerbanken wordt een overgang in bodemdiergemeenschappen waargenomen van een intertidale gemeenschap nabij het strand, overgaand in een bankengemeenschap met rijkere troggen en armere toppen, naar een rijke gemeenschap aan de voet van de brekerbankzone (JANSEN et al. 2004; HOLZHAUER et al. 2020; KRONCKE et al. 2018) om richting dieper water over te gaan in de meer stromingsgedomineerde gemeenschappen van de diepere Noordzee (REISS et al. 2010). Onderzoek aan de buitendelta van Ameland laat zien dat in gebieden met een complexe morfologie zoals een buitendelta, de mate van dynamiek heel sturend is. Een kleine afname in de mate van dynamiek kan resulteren in andere, meer diverse bodemdiergemeenschappen (HOLZHAUER et al. ingediend).

## 6.2 Vogels

De effecten van kustsuppleties op vogels kunnen vooral gerelateerd worden aan verstoring en bedekking van voedsel. Bij verstoring is het type verstoring, de verstoringsafstand, de frequentie van verstoring en het moment van verstoring van belang. De Noordzeekustzone is aangegeven als vogelrichtlijngebied voor onder andere broedvogels zoals de bontbekplevier, strandplevier en de dwergstern. Waarbij de bontbekplevier in de beide kustvakken, Noord-Holland en Texel, broedt en de dwergstern voornamelijk langs de kust van Texel (vogelatlas.nl<sup>1</sup>). Naast broedvogels is het gebied ook aangewezen voor verschillende niet-broedvogels (zie natura2000.nl<sup>2</sup> voor de gehele lijst).

Onder water vormen schelpdieren de belangrijkste voedselbron voor vogels. Het afdekken van grote voorkomens van schelpdieren door suppleties moet zoveel mogelijk vermeden worden. Daarnaast is ook een zeer grote toename van sedimentatie van zand afkomstig van een nabij gelegen suppletie ongunstig voor schelpdieren. Ook een sterke toename van sediment in de waterkolom moet worden voorkomen. Langs het strand zijn vooral wormen (zoals de gemschoornworm) van belang als voedselbron voor strandlopers.

## 6.3 Zeehonden en vis

Er zijn geen directe effecten van suppleties op zeehonden aangetoond. Echter ook hiervoor geldt dat de mate van verstoring sterk afhankelijk is van het type verstoringbron, de verstoringsafstand, de groepssamenstelling en vluchtmogelijkheden. Rustplaatsen nabij Texel zijn onder andere de Noorderhaaks en de wadplaten in het Eierlandse Gat.

Suppleties moeten de leefgebieden van vissen niet aantasten. Er zijn verschillende studies uitgevoerd naar het voorkomen van vis in de ondiepe kustzone. Belangrijkste vragen hierin zijn wat er precies aan vis voorkomt en of er sprake is van een kinderkamer functie waarin de juveniele vis opgroeit. Bij Ameland en langs de Hollandse kust is, in het kader van de suppleties, tussen de brekerbanken gevist. Bij Ameland komen grondel, schol en zeenaald het meest in de ondiepe kust voor (HOLZHAEUER et al. 2014). Verder blijkt dat juveniele Schol zowel in heel ondiep water als ook op tien meter diepte voorkomt. Dit maakt het lastig om de ondiepe kustzone eenzijdig aan te wijzen als kinderkamer voor jonge vis (VAN HALL 2021). Bij de Zandmotor is ook onderzoek gedaan naar juveniele vis in de lagune. Hier bleek dat in beginsel de nieuwe situatie gunstig was voor juvenielen van bijvoorbeeld Schol. Echter werd de situatie snel minder geschikt, mogelijk vanwege veel invang van organisch rijk slib waardoor de bodem slap werd en stonk naar sulfide (o.a. WIJSMAN et al. 2015). In de voordelta is in het kader van de natuurcompensatie ten behoeve van de aanleg van de Tweede Maasvlakte gekeken naar de rol van vissen als belangrijke soorten van habitat H1110B in relatie tot bodemberoerende visserij. Hieruit komt naar voren dat veranderingen in de omgeving (sediment, stroming en golven) sterk bepalen waar vissen voorkomen (PRINS et al. 2020).

## 6.4 Zeereep en achterliggende duinen

Vooroever- en strandsuppleties hebben een doorwerking op de zeereep en daarmee de achterliggende duinen. De belangrijkste verandering is dat door de suppleties er een surplus aan zand beschikbaar is waardoor de kust aangroeit in plaats van afslaat. De praktijk laat zien dat de aangroei van de zeereep sinds de grootschalige uitvoering van suppleties is toegenomen. Daarbij zijn afslagkusten lokaal veranderd in aangroeikusten en is het oppervlak embryonale duinen op het strand toegenomen.

---

<sup>1</sup> <https://www.vogelatlas.nl/atlas/soorten/soort/4700>

<sup>2</sup> <https://www.natura2000.nl/gebieden/friesland/noordzeekustzone/noordzeekustzone-doelstelling>



Bij onderwatersuppleties is het zand dat in de zeereep terecht komt en door kan stuiven niet direct afkomstig van de onderwatersuppleties zelf. Uit onderzoek blijkt dat de hoeveelheid zand die doorstuift naar de achterliggende duinen primair afhankelijk is van de hoeveelheid verstuiving in de zeereep en niet van het gesuppleerde volume zand. Daarbij is het type beheer van de zeereep zeer bepalend (ARENDS et al. 2010; HOLZHAUER et al. 2012; IJFF et al. 2019). Het gesuppleerde zand is over het algemeen wat kalkrijker dan het natuurlijk aanwezige zand in de kalkarme duinen (STUYFZAND et al. 2010). Dit speelt vooral in Noord-Holland ten noorden van Bergen waar de duinen kalkarmer zijn dan in de delta of langs de wadden. Of een verkalming van de duinen door suppleties daadwerkelijk de vegetatie en dieren die leven in de duinbodem beïnvloeden, is moeilijk vast te stellen (IJFF et al. 2019). Langdurige kustuitbouw door zeer grote suppleties (zoals de zandmotor) heeft tot slot laten zien dat een dergelijke interventie invloed heeft op de gehele omliggende morfologie van de bodem maar ook op de grondwaterstand in de duinen en de aangrenzende gebieden.

## 6.5 Cumulatie van verstoringen en permanente veranderingen

Naast de activiteiten voor het op peil houden van de kustlijn door suppleties vinden er nog vele andere activiteiten plaats die invloed op de ecologie in de Nederlandse kustzone hebben. Alle activiteiten samen kunnen cumulatieve effecten tot gevolg hebben. Er zijn twee vormen van cumulatie te onderscheiden. Er is sprake van cumulatie als dezelfde activiteit meerdere malen wordt uitgevoerd (bijvoorbeeld suppletie op suppletie) of als verschillende activiteiten interfereren (bijvoorbeeld suppletie, strand schoonmaken en visserij).

Onder water is er vaak sprake van *cumulatie in de tijd* en op het strand en in de duinen juist van *cumulatie in de ruimte*. Effecten van cumulatie zijn direct of indirect en kunnen chronisch worden. Cumulatie in de tijd kan zich op verschillende manieren ontwikkelen, bijvoorbeeld doordat een gesuppleerd gebied opnieuw gekoloniseerd moet worden waardoor (tijdelijk) een andere gemeenschap aanwezig is. Hierdoor kan bijvoorbeeld specifiek voedsel voor vogels tijdelijk niet aanwezig zijn. Als tijdens het broedseizoen door de vogels moeilijker voedsel gevonden kan worden, kan dat effect hebben op de ontwikkeling van de jongen en daarmee de verdere ontwikkeling van de vogelpopulatie. Dit is een van de redenen waarom suppleren bovenop schelpdiervoorkomens zoveel mogelijk vermeden wordt. Voor de stranden is er vaak sprake van cumulatie in de ruimte en is de cumulatie van aan recreatie gebonden activiteiten (strandreinigen en strandrijden) met suppletieactiviteiten het meest van belang. Voor de vooroever zijn dit voornamelijk kleine visserijactiviteiten en watergebonden recreatie. Verder zijn belastingen uit diffuse bronnen, aangevoerd via rivieren, de zee en door de lucht, van belang voor de aanwezige natuurwaarden.

Wanneer een ingreep zoals bij de Zandmotor dusdanig groot is dat er een nieuw gebied ontstaat, of dat het lang duurt voordat de oorspronkelijke situatie weer terug is, is er sprake van een permanente verandering. Het ecosysteem zal zich aanpassen aan deze nieuwe situatie. Voor de Zandmotor werd bijvoorbeeld een toename van juveniele vis in de lagune geobserveerd. Echter is na enige tijd de verbinding met de open zee weer verdwenen waardoor het inmiddels geen geschikte opgroeiplek meer is (POST et al. 2017). Ook voor bodemdieren op de onderwateroever heeft de Zandmotor meer diversiteit in sediment en stromingen gebracht en daarmee ook een toename van de diversiteit en biomassa van bodemdieren (HERMAN et al. 2021).

## 7 Synthese

Als input voor het TKI-DCC project (in het bijzonder voor WP2 – Onderhoudsconcepten, WP3 – Uitvoeringsmethoden en WP5 – Samenwerking, integratie, afweging en advies; zie Hoofdstuk 1) geeft dit rapport een overzicht van het systeemgedrag van de kustvakken Noord-Holland en Texel en een toekomstprojectie van de te verwachten suppletieopgave, -kosten en -emissies voor de periode 2021–2035 voor deze kustvakken. Deze kennis is relevant voor het ontwikkelen van nieuwe onderhoudsconcepten en de evaluatie van de morfologische en ecologische effecten gerelateerd aan deze concepten. De volgende twee paragrafen geven aanbevelingen voor het gebruik van de in dit rapport gepresenteerde kennis en toekomstprojectie in de andere werkpakketten en suggesties voor mogelijke vervolgstappen.

### 7.1 Aanbevelingen voor gebruik toekomstprojectie

In dit rapport is de sedimentbehoefte van het kustfundament parallel aan de suppletieopgave beschouwd. Zolang het onderhoud van de BKL ten behoeve van de kustfuncties leidend blijft in de verdeling van de suppleties langs de Nederlandse kust, is het hoofdzakelijk de toekomstprojectie van de suppletieopgave die relevant is als input voor de andere werkpakketten. De sedimentbehoefte van het kustfundament wordt waarschijnlijk pas op de langere termijn bij versnelde zeespiegelstijging leidend voor het kustbeleid.

Samenvattend wordt over de periode 2021–2035 een sedimentbehoefte van het kustfundament voorzien voor het kustvak Noord-Holland van ongeveer 39 mln m<sup>3</sup> en voor het kustvak Texel van ongeveer 8 mln m<sup>3</sup> (Tabel 2). De sedimentbehoefte van het kustfundament van beide kustvakken samen bestaat voor 60 % uit de export naar het bekken van het Zeegat van Texel. Het is mogelijk dat de precieze verdeling van de sedimentbehoefte van het kustfundament in werkelijkheid net iets anders ligt. Geconstateerd is dat de sedimentbehoefte van het kustfundament niet leidend is voor de suppletieopgave, maar dat de instandhouding van de kustlijn hierin sturend is. De sedimentbehoefte van het kustfundament wordt momenteel vervuld door de suppleties voor de instandhouding van de kustlijn. Op basis van een extrapolatie van historische suppletietrends en gebruik van kentallen is een suppletieopgave voor de periode 2021–2035 voorzien voor het kustvak van Noord-Holland van 45±3 mln m<sup>3</sup> (waarvan 76 % vooroeversuppleties). De totale kosten voor deze suppleties komen neer op ongeveer 179 mln € met een geschatte emissie van 154 kton CO<sub>2</sub>. De verwachte schaduwkosten van de MKI bedragen ongeveer 34 mln €. Voor het kustvak Texel is voor de periode 2021–2035 een totale suppletieopgave voorzien van 25±3 mln m<sup>3</sup> (waarvan 80 % vooroeversuppleties). Deze zullen ongeveer 99 mln € gaan kosten, in een emissie van 86 kton CO<sub>2</sub> resulteren en de schaduwkosten van de MKI zullen op ongeveer 19 mln € neer gaan komen. Opgemerkt wordt dat de hoeveelheid strandsuppleties dat noodzakelijk is over de jaren kan variëren (zie Paragraaf 5.1.2). Zo was in de laatste vijf jaar het percentage strandsuppleties voor deze kustvakken iets hoger (rond de 30% strandsuppleties en rond de 70% vooroeversuppleties) dan over de afgelopen twintig jaar.

De ruimtelijke verdeling van de geprojecteerde suppletieopgave is in Tabel 3 en in de Figuren Figuur 14–Figuur 17 van dit rapport getoond. Voor het kustvak Noord-Holland worden de grootste suppletiehoeveelheden voorzien in de erosiegebieden Egmond, Bergen, Callantsoog en Julianadorp – Den Helder. Afgezien van de omgeving van De Slufter en direct ten zuiden van de Eierlandsedam worden langs vrijwel de hele Noordzeekust in het kustvak Texel suppleties voorzien.

De gepresenteerde toekomstprojectie van de suppletieopgave, -kosten en -emissie moet gezien worden als een schatting aangezien deze gebaseerd is op een extrapolatie van de historische suppletietrends. Onzekerheden in de suppletievolumes zijn uitgedrukt als variatie van de historische trends. Benadrukt wordt dat deze toekomstprojectie aan meer onzekerheden onderhevig is. Voorbeelden zijn veranderingen in het beleid en waarschijnlijke veranderingen in kosten en emissie per eenheid gesuppleerd sediment. Verder is gekozen voor een extrapolatie van de historische suppletietrends – en niet voor een complexe voorspelling van de toekomstige BKL overschrijdingen – wat betekent dat het mogelijk is dat gebieden waar in de toekomstprojectie geen suppleties voorzien zijn toch gesuppleerd moeten gaan worden. Ook is er in het verleden mogelijk lokaal meer gesuppleerd dan voor de BKL overschrijding precies nodig was, hier is niet voor gecorrigeerd. Ten slotte zullen mogelijke veranderingen in de stortstrategie van de twee kustvakken invloed kunnen hebben op de suppletieopgave. Dit betreft met name het storten van baggerspecie in de stortvakken ten noorden van de IJgeul in Noord-Holland (zie Paragraaf 5.2).

Naar aanleiding van de bovengenoemde onzekerheden is de toekomstprojectie dus vooral bruikbaar als een benchmark waartegen veranderingen in onderhoudsconcepten en uitvoeringsmethoden in de andere werkpakketten afgezet kunnen worden, waarbij rekening gehouden moet worden met de onderliggende aannamen en onzekerheden uit deze rapportage. Deze toekomstprojectie is dus expliciet geen voorspelling van het onderhoud.

## 7.2 Vervolgstappen

Deze paragraaf geeft een overzicht van de mogelijke vervolgstappen binnen WP1 in het verdere verloop van het TKI-DCC project. Ten behoeve van het inzichtelijk maken van de mate waarin de inzichten uit dit project toepasbaar zijn op de andere kustvakken zal, op basis van morfologische en ecologische eigenschappen, een overzicht worden gemaakt van de gelijkenis met andere kustvakken. Dit zal specifiek bepaald worden voor de in de andere werkpakketten ontwikkelde onderhoudsconcepten en uitvoeringsmethoden. Mogelijk kan dit in kaarten worden uitgewerkt waartoe de overzichtskaart van het zanddelend kuststelsel (Rijkswaterstaat 2021) een goed startpunt vormt (Figuur 18). Verder zal, in samenwerking met de andere WPs, geanalyseerd worden in hoeverre de ontwikkelde alternatieve onderhoudsconcepten schaalbaar zijn voor de lange termijn (na 2050) bij versnelde zeespiegelstijging en grotere benodigde suppletievolumes.

Afhankelijk van de gewenste verdere focus van WP1, kan mogelijk ook nog gedacht worden aan het maken van een gedetailleerde schatting van de sedimentlangstransporten. Er zijn namelijk substantiële onzekerheden in de bestaande schattingen van de sedimentlangstransporten in de kustvakken Noord-Holland en Texel. Bovendien zijn deze aan grote ruimtelijke variaties onderhevig. De huidige schattingen geven daarom mogelijk onvoldoende basis voor de forcering en validatie van numerieke modellen in WP2. Er kan overwogen worden een nadere studie uit te voeren binnen dit project waarin de langstransporten nader afgeschat worden. Een mogelijkheid is bijvoorbeeld de langstransporten af te schatten op basis de JarKus-raai metingen (aangevuld met de Vaklodingen voor dieper water), mits er correct gecorrigeerd wordt voor suppleties en verliesposten. Ook aan een dergelijke bepaling zullen haken en ogen zitten, dit vergt nog onderzoek.



Figuur 18: Overzichtskaat van het zanddelend kuststelsme van Nederland en processen die de waterveiligheid van het achterland en het behoud van functies van het kustgebied kunnen beïnvloeden (overgenomen uit Rijks-waterstaat 2015).

# Referenties

- ARENS, S.M., van PUIJVELDE, S.P., & BRIÈRE, C.D.E. (2010). Effecten van suppleties op duinontwikkeling. Geomorfologie. Bureau voor strand- en duinonderzoek, Amsterdam.
- BRUINS, R.J. (2016): Morphological behaviour of shoreface nourishments along the Dutch coast. Data analysis of historical shoreface nourishments for a better understanding in the future. MSc thesis, TU Delft.
- COHEN, A.B. & BRIERE, C. (2007): Evaluatie van de uitgevoerde suppleties bij Egmond op basis van Argus video waarnemingen. WL Delft Hydraulics rapport, Z4212.00.
- DE GANS, W. (1991): Kwartair geologie van West-Nederland. Grondboor en Hamer, November 1991, pp. 103–124.
- DE KRUIF, A.C. & KEIJER, A.M. (2003): Evenwichtsligging Kennemerstrand en aanzanding havenmond IJmuiden. Een analyse van de morfologische ontwikkelingen in het kustgebied rondom IJmuiden. Rapport Rijksinstituut voor Kust en Zee/2003.054
- DE MULDER, E.F.J. (1983) Geologische geschiedenis van de Hondsbossche Zeewering. Derde uitgave van 'Vrienden van de Hondsbossche', 15 pp.
- DE SONNEVILLE, B. & VAN DER SPEK, A.J.F. (2012): Sediment- and Morphodynamics of shoreface nourishments along the North-Holland coast. Proceedings of ICCE 2012, Santander, Spain.
- DONKER, J.; VAN MAARSEVEEN, M.; RUESSINK, G. (2018): Spatio-Temporal Variations in Fore-dune Dynamics Determined with Mobile Laser Scanning J. Mar. Sci. Eng. 6, no. 4: 126.
- ELIAS, E.P.L. (2019): Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002.
- ELIAS E.P.L. & VAN DER SPEK A.J.F. (2017): Dynamic Preservation of Texel Inlet, the Netherlands. Understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. Netherlands Journal of Geosciences 96 (4): 293-317.
- ELIAS E.P.L. & VAN DER SPEK A.J.F. (2020): Morfologische ontwikkeling van De Hors – Texel. Deltares rapport 11204540-000-ZKS-0007.
- ELIAS, E.P.L., VONHÖGEN-PEETERS, L., & BRUENS, A. (2013): Ontwikkeling suppletie tussen Den Helder en Julianadorp 2007. Deltares rapport (project 1206171-000).
- ELIAS, E.P.L., ROELVINK, F., & PEARSON, S.G. (2021): Systeemsuppleties op Eilandkoppen, synthese. Deltares rapport, 11205236-005-ZKS-0009.
- FOLMER, E., DEKINGA, A., HOLTHUIJSEN, S., VAN DER MEER, J., MOSK, D., PIERSMA, T., & VAN DER VEER, H. (2017). Species Distribution Models of Intertidal Benthos. Tools for Assessing the Impact of Physical and Morphological Drivers on Benthos and Birds in the Wadden Sea. NIOZ report.
- GLIM, G.W. (1980): Korrelgrootte strandmonsters Noord-Holland en waddeneilanden. Rijkswaterstaat rapport, H7919B.
- HERMAN, P.M.J., MOONS J.J.S., WIJSMAN, J.W.M., LUIJENDIJK, A.P., & YSEBAERT, T. (2021). A Mega-Nourishment (Sand Motor) Affects Landscape Diversity of Subtidal Benthic Fauna. *Frontiers in Marine Science*, 8.
- HOLZHAUER, H., BORSJE, B.W., van DALFSEN, J.A., WIJNBERG, K.M., HULSCHER, S.J.M.H., & HERMAN, P.M.J. (2020). Benthic species distribution linked to morphological features of a barred coast. *J. Mar. Sci. Eng.* 8.
- HOLZHAUER, H., BORSJE, B.W., HERMAN, P.M.J., SCHIPPER, C.A., WIJNBERG, K.M. (ingediend) The geomorphology of an ebb-tidal-delta linked to benthic species distribution and functionality. *Ocean and Coastal Management*
- HOLZHAUER, H., VANAGT, T.J., LOCK, K., VAN OEVEREN, M.C., DE BACKER, A., HOSTENS, K., van DALFSEN, J.A., & REINDERS, J. (2014). Ecologische effecten suppletie Ameland 2009-2012. Interim rapportage ihkv KPP B&O Kust Ecologie. Deltares, Delft.
- IJFF, S., SMITS, B., VAN ZELST, V., & ARENS, B. (2019). Natuurlijk Veilig - Landschapsvormende processen Invloed van suppleties en beheer op dynamiek in de zeeoep Deltares, Delft

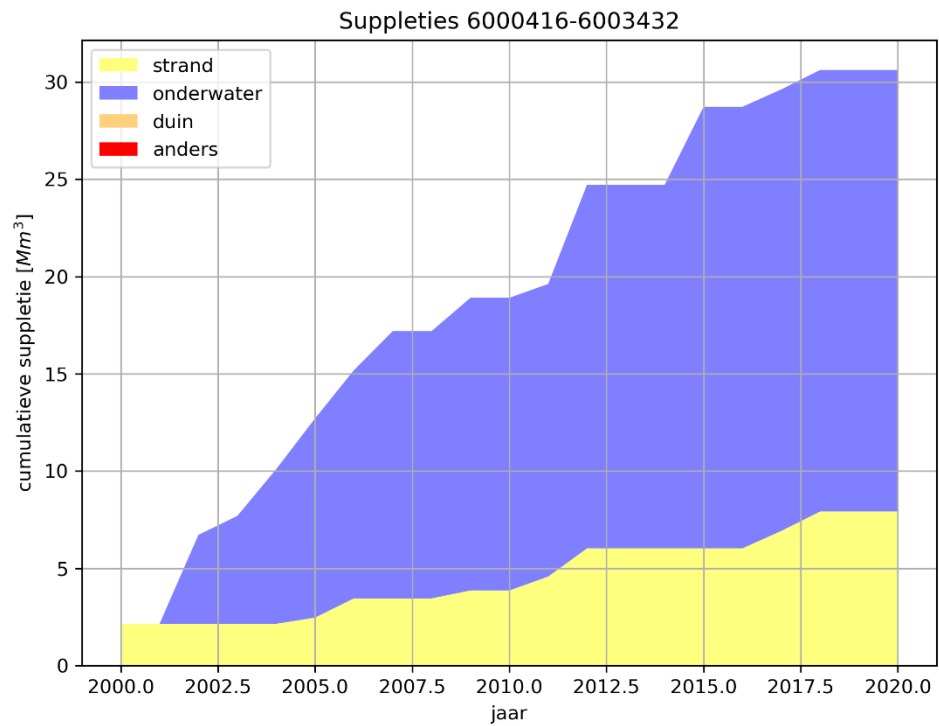
- JANSSEN, G.M. & MULDER, S. (2004). De ecologie van de zandige kust van Nederland. Inventarisatie van het macrobenthos van strand en brandingszone. RIKZ, Haren.
- JANSSEN, G.M. & MULDER, S. (2005). Zonation of macrofauna across sandy beaches and surf zones along the Dutch coast. *Oceanologia* 47, 265–282.
- KAAG, N.H.B.M. (2004). Beschrijving macrofauna Buitenhaven IJmuiden (nulmeting). TNO report.
- KRÖNCKE, I., BECKER, L.R., BADEWIEN, T.H., BARTHOLOMÄ, A., SCHULZ, A.-C., & ZIELINSKI, O. (2018). Near- and Offshore Macrofauna Communities and Their Physical Environment in a South-Eastern North Sea Sandy Beach System. *Front. Mar. Sci.* 5, 1–11.
- LEOPOLD, M.F. (2002a). Nulmeting vogels en benthos in de Texelse vooroever (KUST-ADV\*NH), Alterra-Texel.
- LEOPOLD, M.F. (2002b). T-1 meting benthos en vissen in de Texelse vooroever (KUST-ADV\*NH), september 2002, Alterra-Texel.
- LEOPOLD, M.F. (2003). T-2 meting: vogels, vissen en benthos in de Texelse vooroever (KUST-ADV\*NH), februari 2003, Alterra-Texel.
- LODDER, Q. (2015). Een conceptuele beschrijving van de import van de Nederlandse getijdenbekkens. Internal memorandum Rijkswaterstaat (Lelystad).
- LODDER, Q. (2016). Memo: Rekenregel suppletievolumen. Rijkswaterstaat, WVL.
- LODDER, Q.J., SLINGER, J.H., WANG, Z.B. & VAN GELDER, C. (2019). Decision making in Dutch coastal research based on coastal management policy assumptions. In: Hardiman, N., Institution of Civil Engineers (Ed.), *Coastal Management 2019: Joining forces to shape our future coasts*. Proceedings of the 9th Coastal Management Conference, September 24–26, 2019, La Rochelle, France, pp. 291–300. Institution of Civil Engineers, ICE Publishing.
- MASTBERGEN, D., NEDERHOFF, K., VAN DER VALK, B. & MAARSE, M. (2017): Beheerbibliotheek Noord-Holland. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Deltares rapport, 11200538-002-ZKS-0005.
- NOLTE, A., VAN OEVEREN-THEEUWES, C., VAN DER WERF, J., TONNON, P.K., GRASMEIJER, B., VAN DER SPEK, A., ELIAS, E. & WANG, Z.B. (2020): Technisch advies sedimentbehoefte kustfundament. Ten behoeve van het beleidsadvies Kustgenese 2.0. Deltares rapport, 1220339-009-ZKS-0014.
- OOST, A., CLEVERINGA, J. & TAAL, M. (2019): Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019. Deltares rapport, 11203669-000-ZKS-0006
- OOST, A., COLINA ALONSO, A., ESSELINK, P., WANG, Z.B., VAN KESSEL, T. & VAN MAREN, B. (2021): Where Mud Matters. Towards a Mud Balance for the Trilateral Wadden Sea Area: Mud supply, transport and deposition. Waddenacademie report, 2021-02.
- POST, H.M., BLOM, E., CHEN, C., BOLLE, L.J., & BAPTIST, M.J. (2017). Habitat selection of juvenile sole (*Solea solea* L.): Consequences for shoreface nourishment, *Journal of Sea Research*, Volume 122, Pages 19-24.
- POT, R. (2011). System-description Noord-Holland Coast. “a review of the nourishment strategy applied”. MSc. Thesis. Delft University of Technology, Delft.
- PRINS, T., VAN DER MEER, J., & HERMAN, P. (2020). Eindrapportage monitoring- en onderzoeksprogramma Natuurcompensatie Voordelta (PMR-NCV). Deltares, Delft.
- QUATAERT, E., OOST, A., HIJMA, M. & ELIAS, E. (2020): Beheerbibliotheek kust Texel. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Deltares rapport, 11205236-001-ZKS-0003.
- RAKHORST, H.D. (1984): Werking strandhoofden Noord-Holland, Texel, Vlieland, Rijkswaterstaat, adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-84.H007.
- REISS, H., DEGRAER, S., DUINEVELD, G.C.A., KRÖNCKE, I., ALDRIDGE, J., CRAEYMEERSCH, J.A., EGGLETON, J.D., HILLEWAERT, H., LAVALEYE, M.S.S., MOLL, A., POHLMANN, T., RACHOR, E., ROBERTSON, M., VANDEN BERGHE, E., VAN HOEY, G., REES, & H.L. (2010). Spatial patterns of infauna, epifauna, and demersal fish communities in the North Sea. *Ices J. Mar. Sci.* 67, 278–293.

- Rijkswaterstaat (2013): Kenmerkende waarden getijgebied 2011.0. [https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC\\_159573\\_31/](https://puc.overheid.nl/rijkswaterstaat/doc/PUC_159573_31/). (2021-06-11).
- Rijkswaterstaat (2015): Nationaal Waterplan 2016–2021.
- Rijkswaterstaat (2019): Tussenrapportage Pilotsuppletie Buitendelta Amelander Zeegat. Rijkswaterstaat rapport (zonder nummer).
- Rijkswaterstaat (2020a): Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust. Rijkswaterstaat rapport (zonder nummer).
- Rijkswaterstaat (2020b): Kustlijnkaarten 2021. Rijkswaterstaat rapport (zonder nummer).
- Rijkswaterstaat (2021): Servicedesk Data. <https://www.rijkswaterstaat.nl/formulieren/contact-formulier-servicedesk-data> (contactpersoon: Jeroen van Berge).
- ROELSE, P. (1996): Evaluatie van zandsuppleties aan de Nederlandse kust 1975-1994; een morfologische beschouwing. Rapport RIKZ-96.028, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee RIKZ (Middelburg): 73 pp.
- ROELSE, P. (2002): Water en Zand in Balans. Evaluatie Zandsuppleties na 1990; Een Morfologische Beschouwing. Rapport RIKZ/2002.003, Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee RIKZ (Middelburg): 108 pp.
- SCHOORL, H. (1999): De Convexe Kustboog. 187 pp.
- SPANHOFF, R., de KEIJZER, S., WALBURG, A.M. & BIEGEL, E.J. (2004): Evaluatie vooroeversuppleties Egmond en Bergen Januari 2004. Werkdocument RIKZ/OS/2004/112W.
- STIVE, M. J. F.; ROELVINK, J. A., & DE VRIEND, H. J. (1990): Large-scale coastal evolution concept. Proceedings 22nd International Conference on Coastal Engineering, Delft.
- STUYFZAND, P.J., ARENS, S.M., & OOST, A.P. (2010). Geochemische effecten van zandsuppleties langs Hollands kust. KWR, Nieuwegein.
- VAN DER SPEK, A.J.F & ELIAS, E.P.L. (2013): The effects of nourishments on autonomous coastal behaviour. Proceedings Coastal Dynamics 2013, paper 221.
- VAN DER WAL, J.T. & VAN DALFSEN J.A. (2008). Monitoring kustsuppleties. Report No. C014/08, Wageningen IMARES, Den Helder.
- VAN DALFSEN, J.A. (2005). Inventarisatie brandingszone zandige kust. Apeldoorn.
- VAN DUIN, M.J.P. & N.R. WIERSMA (2002): Evaluation of the Egmond shoreface nourishment. Part I: Data analysis. WL Delft Hydraulics project Z3054/Z3148.
- 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, 813–837.
- VAN HALL, R. (2021). Presentatie: Hoe beïnvloedt suppletie de ecologische functie van de ondiepe kustzoen (kinderkamerfunctie voor vis)? [www.natuurlijkveilig.nl/over-natuurlijk-veilig/onderzoek-vooroever](http://www.natuurlijkveilig.nl/over-natuurlijk-veilig/onderzoek-vooroever).
- VAN RIJN, L.C. (1995): Sand budget and coastline changes of the central coast of Holland between Den Helder and Hoek van Holland period 1964–2040. Delft Hydraulics report H2129.
- VAN RIJN, L. C. (1997): Sediment transport and budget of the central coastal zone of Holland. Coastal Engineering 32, 61-90.
- VERGOUWEN, S.A. & MEIJER-HOLZHAUER, H. (2016). Ontwikkeling van het bodemleven in de vooroever na aanleg van een onderwatersuppletieling van het bodemleven in de vooroever na aanleg van een onderwatersuppletie. Case studie Ameland en Schiermonnikoog 2009-2014. Delft.
- VERMAAS, T. (2010): Morphological behaviour of the deeper part of the Holland coast. Deltares, Delft.
- VERMAAS, T. (2012): Analyse bruikbaarheid gecombineerde hoogtedata Hollandse kust; Pilotstudie naar het combineren van hoogtedata uit verschillende bronnen. Wageningen, Alterra, Alterra-rapport 2378. 36 blz.
- VOLLEBREGT, A. & DE BOER, W. (2020): Dutch Coastline Challenge. Projectvoorstel LWV20.377.
- WANG, Z., ELIAS, E., VAN DER SPEK, A., & LODDER, Q. (2018): Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: Impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. Netherlands Journal of Geosciences, 97(3), 183–214. doi:10.1017/njg.2018.8.

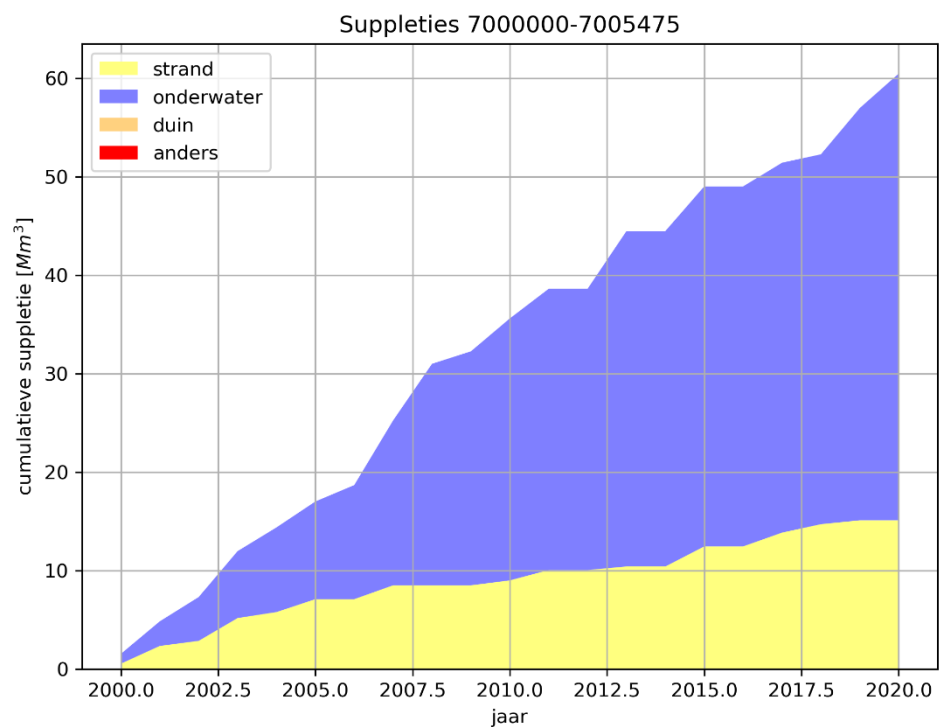
- WIJNBERG, K.M. (2002): Environmental controls on decadal morphologic behavior of the Holland coast. *Marine Geology*, 189: 227–247.
- WIJSMAN, J.W.M. & CRAEYMEERSCH, J.A. (2016). Effect van diepe vooroeversuppletie bij Callantsoog op de benthosgemeenschap. Resultaat T0-bemonstering najaar 2015. Yerseke.
- WIJSMAN, J.W.M., VAN HAL, R., & JONGBLOED, R.H. (2015). Monitoring en evaluatie Pilot Zandmotor Fase 2. Evaluatie benthos, vis, vogels en zeezoogdieren 2010 – 2014.
- YSEBAERT, T. & HERMAN, P.M.J. (2002). Spatial and temporal variation in benthic macrofauna and relationships with environmental variables in an estuarine, intertidal soft-sediment environment. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 244, 105–124.



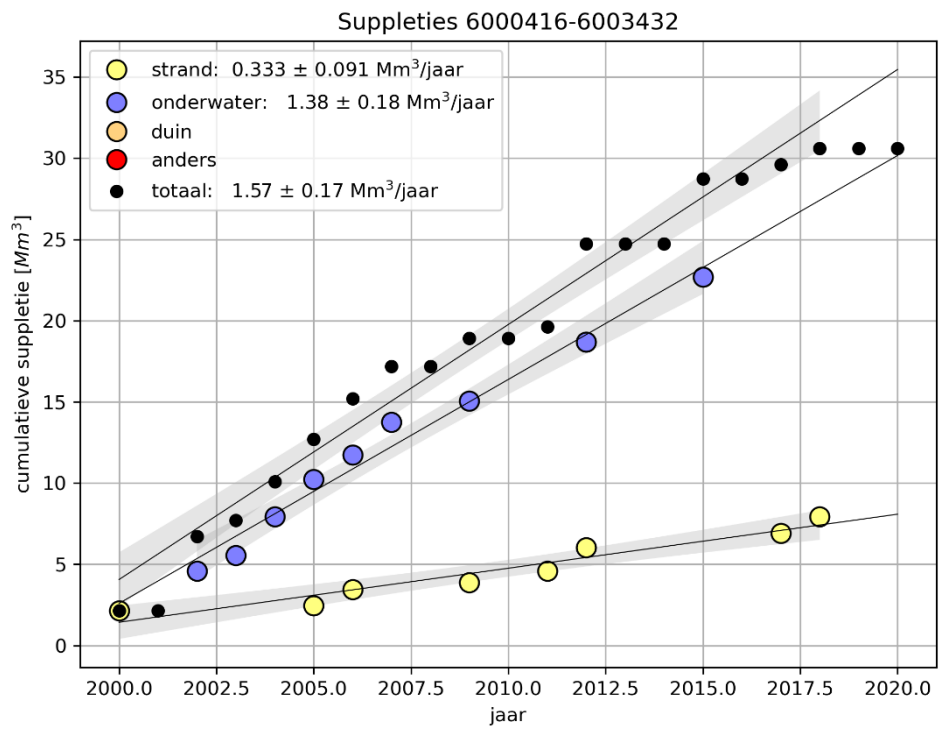
# Bijlage



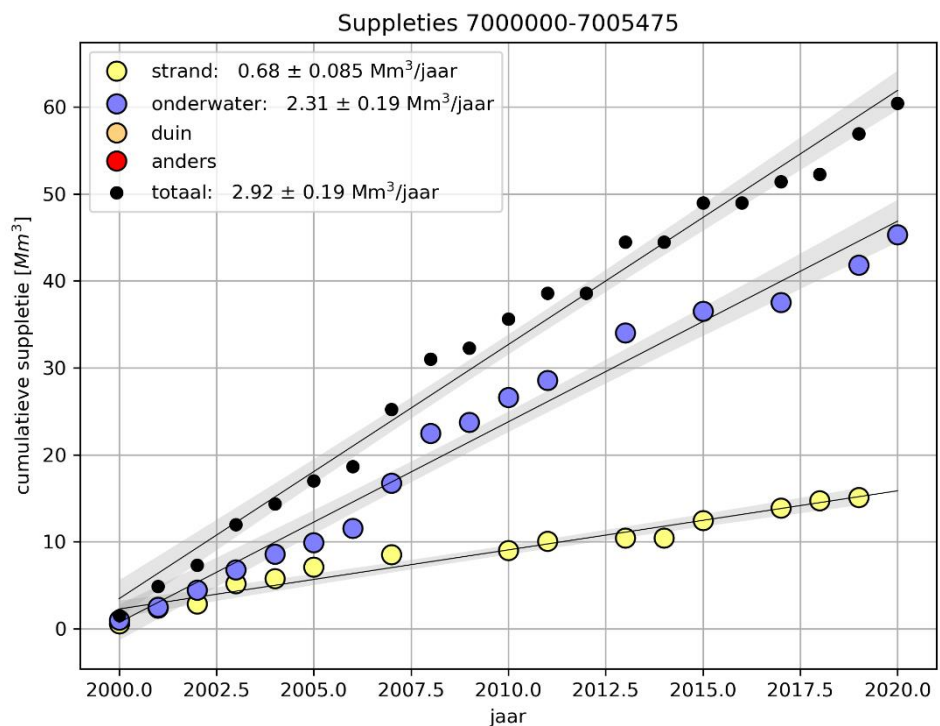
Figuur 19: Cumulatieve suppletievolumes in het kustvak Texel tussen 2000 en 2020.



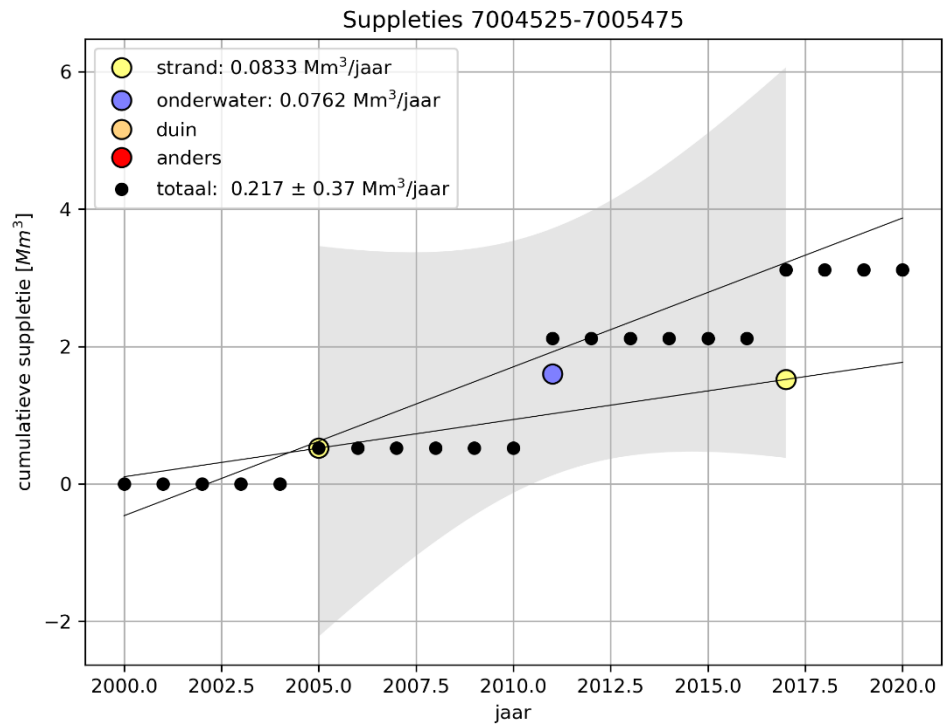
Figuur 20: Cumulatieve suppletievolumes in het kustvak Noord-Holland tussen 2000 en 2020.



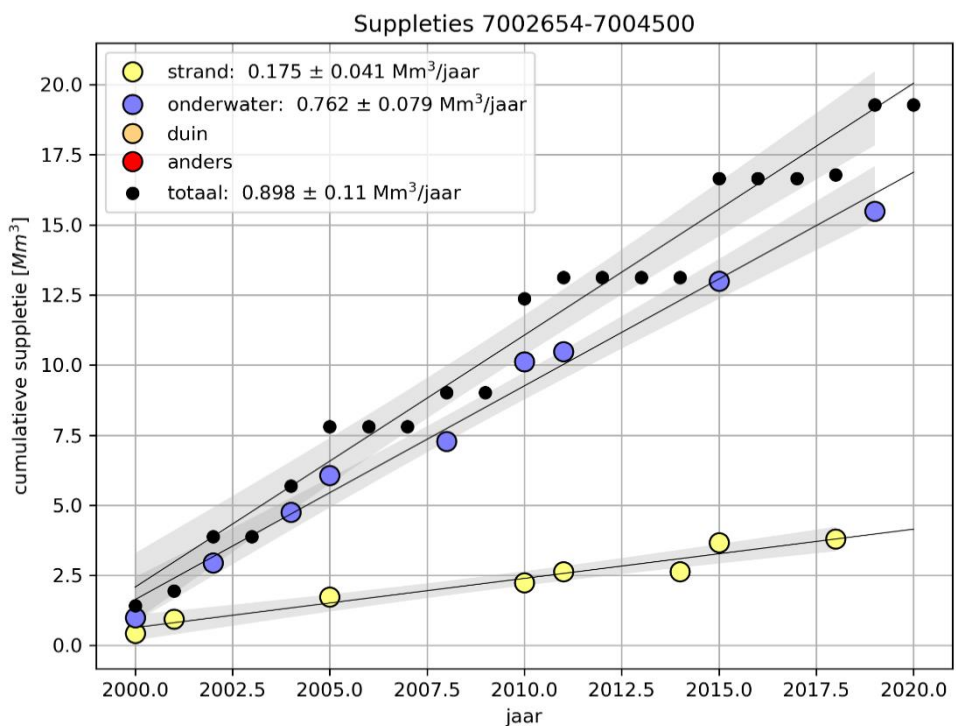
Figuur 21: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in het kustvak Texel tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.



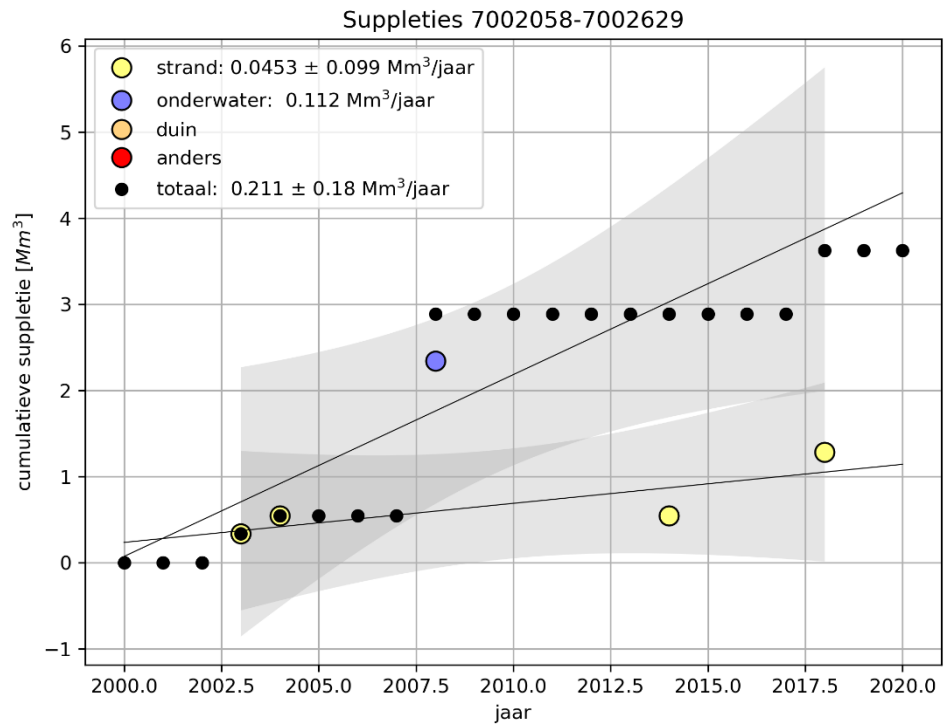
Figuur 22: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in het kustvak Noord-Holland tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.



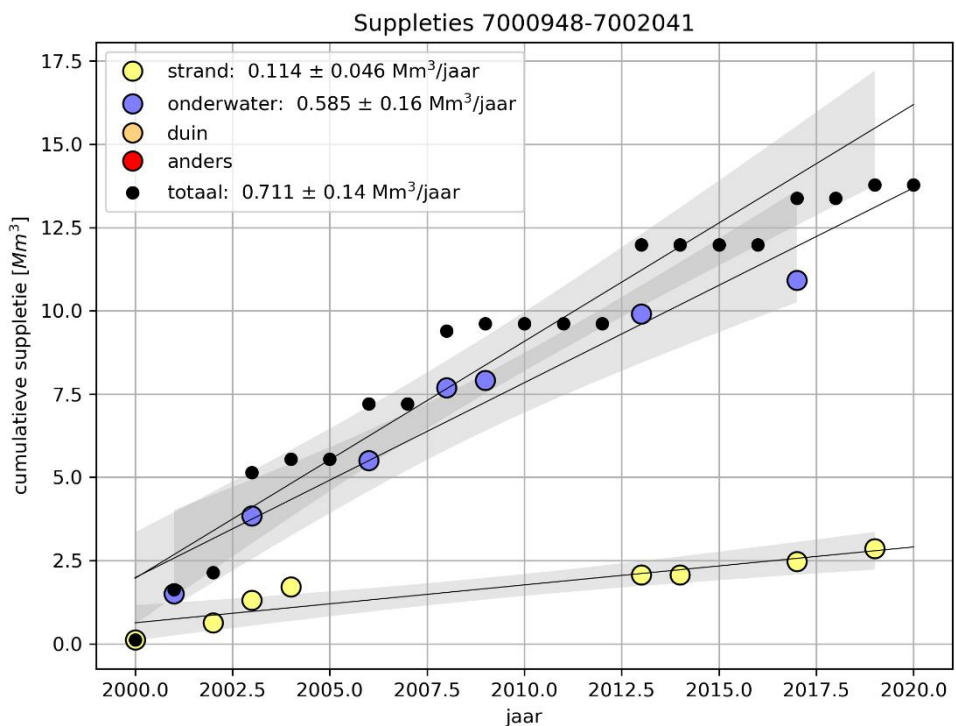
Figuur 23: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in Deelvak 1 (zie Figuur 1) tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.



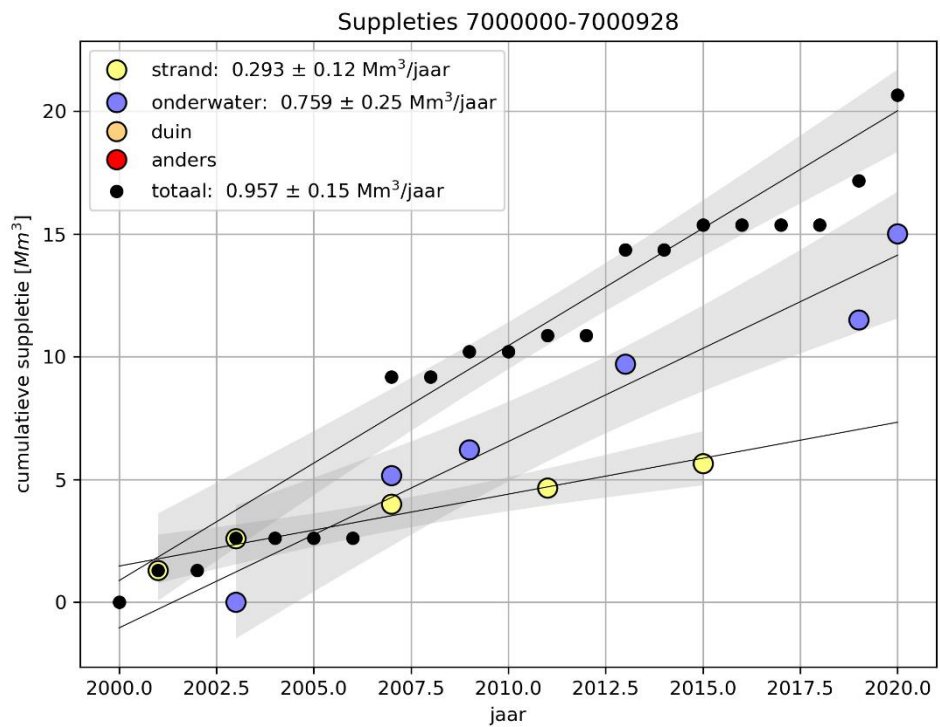
Figuur 24: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in Deelvak 2 (zie Figuur 1) tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.



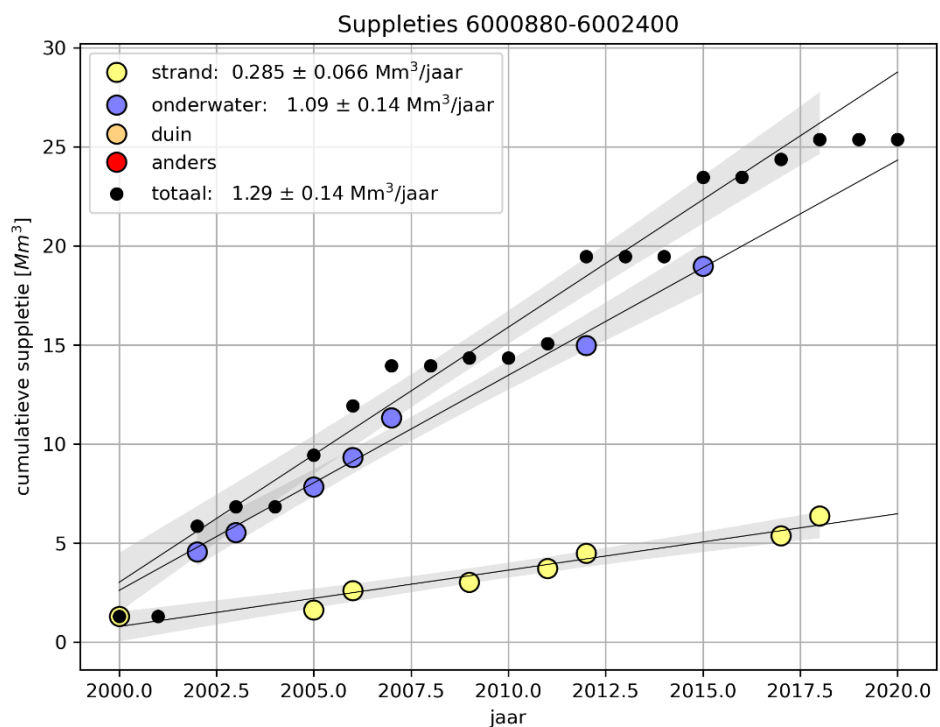
Figuur 25: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in Deelvak 3 (zie Figuur 1) tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.



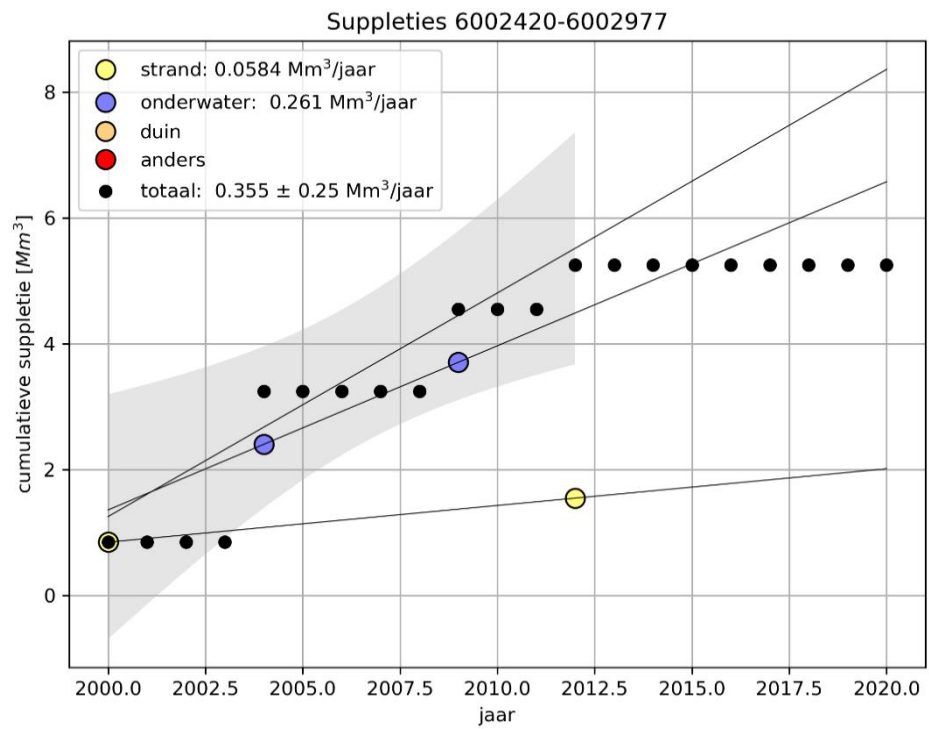
Figuur 26: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in Deelvak 4 (zie Figuur 1) tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.



Figuur 27: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in Deelvak 5 (zie Figuur 1) tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.



Figuur 28: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in Deelvak 6 (zie Figuur 1) tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.



Figuur 29: Lineaire trends met onzekerheidsmarge voor de cumulatieve suppletievolumes in Deelvak 7 (zie Figuur 1) tussen 2000 en 2020. De richtingscoëfficiënten van de regressielijnen zijn aangegeven in de legenda.

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

**Deltares**

[www.deltares.nl](http://www.deltares.nl)