

## Memo

**Aan**

Stefan Pluis / Evelien Brand

**Datum**

10 maart 2023

**Ons kenmerk**

11208035-001-ZKS-0002

**Aantal pagina's**

1 van 15

**Contactpersoon**

Ellen Quataert

**Doorkiesnummer**

+31(0)88 335 8516

**E-mail**

Ellen.Quataert@deltares.nl

**Onderwerp**

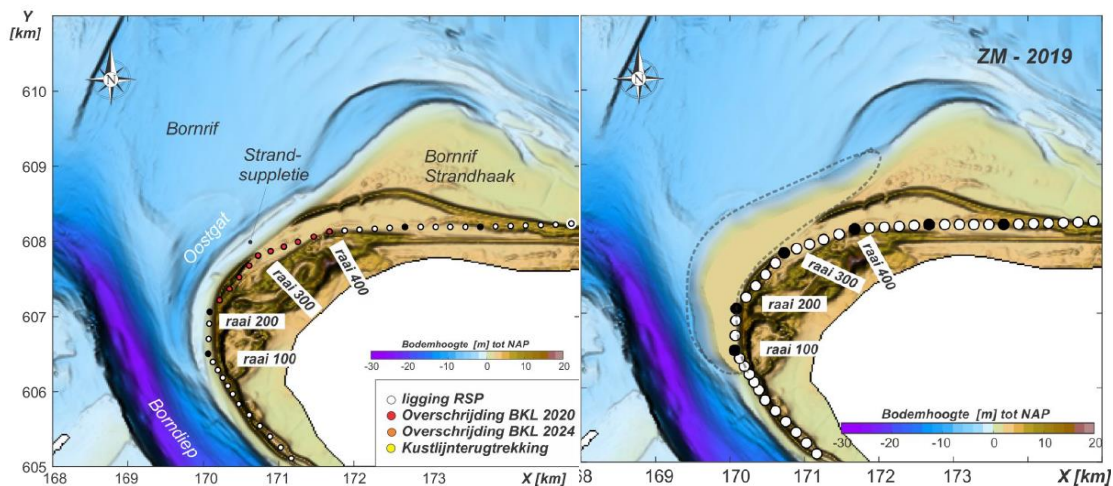
Inschatting levensduur Zandmotorsuppletie Ameland West

Binnen KPP B&O Kust wordt binnen het deelprogramma 'Regionaal advies op maat' specifieke vragen opgepakt ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de Nederlandse Kust. Deze memo is opgesteld naar aanleiding van een vraag van Rijkswaterstaat (per mail, 6 oktober 2022) over de levensduur van een mogelijke Zandmotorsuppletie bij Ameland NW. De memo bevat een inschatting van de levensduur van vier ontwerpvarianten en een beschrijving van de relevante processen die de levensduur beïnvloeden.

## 1 Inschatting levensduur Zandmotorsuppletie Ameland West

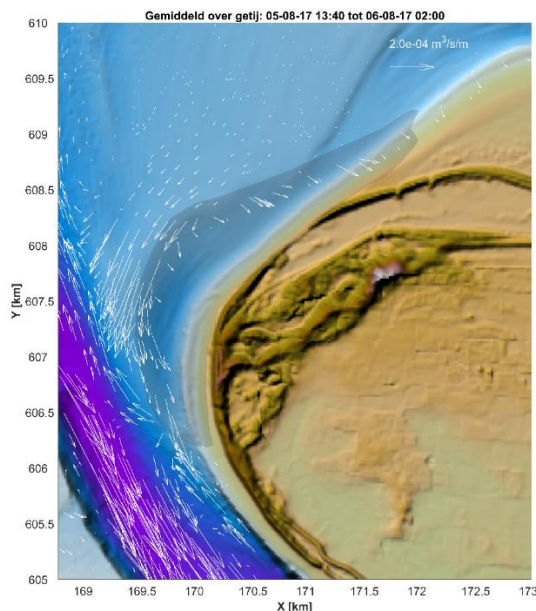
### 1.1 Aanleiding en doelstelling van het onderzoek

Aan de Noordwestzijde, voor de kust van Ameland Noordwest bevindt zich een groot, ondiep bankengebied, het Bornrif (Figuur 1-1, links). Periodiek is er door het aanlanden van zandbanken vanaf het Bornrif met de kustlijn van Ameland sprake van (veel) zanduitwisseling. Initieel geeft de aanlanding een grote, bijna instantane, zeewaartse sprong van de kustlijn. Na een aanlanding volgt weer een langdurige periode van kustlijnerosie. In 1986 vond de laatste aanlanding plaats op de eilandkop (Elias et al. 2019). De Bornrif Strandhaak ontstond doordat een groot zandvolume vanaf het Bornrif verbinding maakte met de kust van Noordwest Ameland (ten zuiden van raai 400). De aangelande bank is nog steeds terug te zien als een grote zeewaartse sprong in de kustlijn. Sinds aanlanding verplaatst de bank in westelijke richting en het gebied tussen de Strandhaak en het Borndiep, raaien 100-400 wordt gekenmerkt door een structureel smalle kustzone die gevoelig is voor erosie. Als gevolg van de doorgaande erosie is ook de eerste duinenrij bij raai 200 doorgebroken, en stroomt de duinvallei erachter regelmatig vol met water. Uit de veiligheidsoordeel volgt dat de duinen van Ameland (dijktraject 2-1) momenteel niet voldoet aan de wettelijke veiligheidsnorm (Arcadis 2022, [www.waterveiligheidsportaal.nl](http://www.waterveiligheidsportaal.nl)). Om de erosie tegen te gaan, is, gemiddeld genomen, elke 4 jaar een strandsuppletie nodig om de kustlijn met de Basiskustlijn (BKL) als referentie te onderhouden. Deze strandsuppleties zijn relatief groot in omvang. Zo had de meest recente strandsuppletie in 2019 een volume van 2,5 miljoen m<sup>3</sup>.



Figuur 1-1 De bodem in 2019 en de ligging van de raaien 100, 200, 300 en 400 (links). De rode cirkels geven de ligging van de RSP weer en de resultaten van de 2019-toetsing van de kustlijn. Rechts: een zandmotor suppletie bij Ameland Noordwest. De suppletielocatie is aangegeven middels de gearceerde lijn. Bron: Elias et al. (2021).

Een mogelijkheid voor een meer efficiëntere kustlijnhandhaving bij Ameland NW is een systeemsuppletie op kortere tijdschaal (Pluis, 2022). Hierbij wordt in één keer een groter volume zand gesuppleerd, in tegenstelling tot het frequent aanbrengen van strandsuppleties. In de studie 'systeemsuppleties op eilandkoppen' (Elias et al., 2021) is een 'Zandmotor' variant voor Ameland uitgewerkt (Figuur 1-1, rechts). Het volume van dit ontwerp bedroeg 9,1 Mm<sup>3</sup> en een aanleghoogte +2 m NAP, de levensduur werd geschat op 5 – 6 jaar. Dit is slechts een beperkte toename in levensduur, vergeleken met de huidige 2,5 – 3 miljoen m<sup>3</sup> elke 4 jaar. Dit wordt veroorzaakt doordat initieel de erosie veel hoger zal zijn door contractie en toename van stromingen en sedimenttransporten rondom de kop van de zandmotor-suppletie (Figuur 1-2).



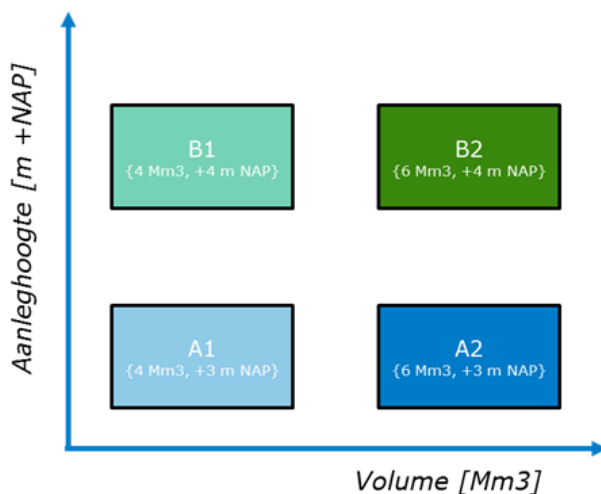
Figuur 1-2 Model (Delft3D) simulatie van het residueel getij-gemiddeld sedimenttransport, representatief voor de jaarlijkse condities ter hoogte van Ameland NW. Het donkere gebied geeft de ligging van de Zandmotor-suppletie aan. Bron: Elias et al. (2021).

Met de lessen uit de Elias et al. (2021) studie is een alternatief ontwerp van de Zandmotor-systeemsuppletie bij Ameland NW gemaakt in Pluis (2022). Uitgangspunt hierbij is een Zandmotor met een meer vloeiende uitbouw ten opzichte van de huidige kustlijn. Daarnaast is het voorstel om de suppletie hoger in het profiel aan te leggen. De hogere aanleghoogte zorgt potentieel voor een langere levensduur van de suppletie en draagt bij aan het verminderen van het waterveiligheidsprobleem. Er zijn vier ontwerpvarianten gemaakt door Rijkswaterstaat voor de Zandmotorsuppletie bij Ameland NW; A1, A2, B1 en B2. De ontwerpvarianten variëren in volume (4 of 6 Mm<sup>3</sup>) en aanleghoogte (+3m en +4m NAP), zie Figuur 1-3.

De doelstelling van deze memo is het beantwoorden van de hoofdvraag:

*Wat is de geschatte levensduur van elke ontwerpvariant van de Zandmotorsuppletie bij Ameland NW?*

Om deze vraag te beantwoorden, worden in deze memo eerst de vier ontwerpvarianten weergegeven op de bodemkaarten om een beeld te geven van het ontwerp (H1.2). Vervolgens wordt de levensduur van elke variant geschat, en wordt verkend wat het effect van volume en aanleghoogte is op de levensduur van de suppleties (H1.3).

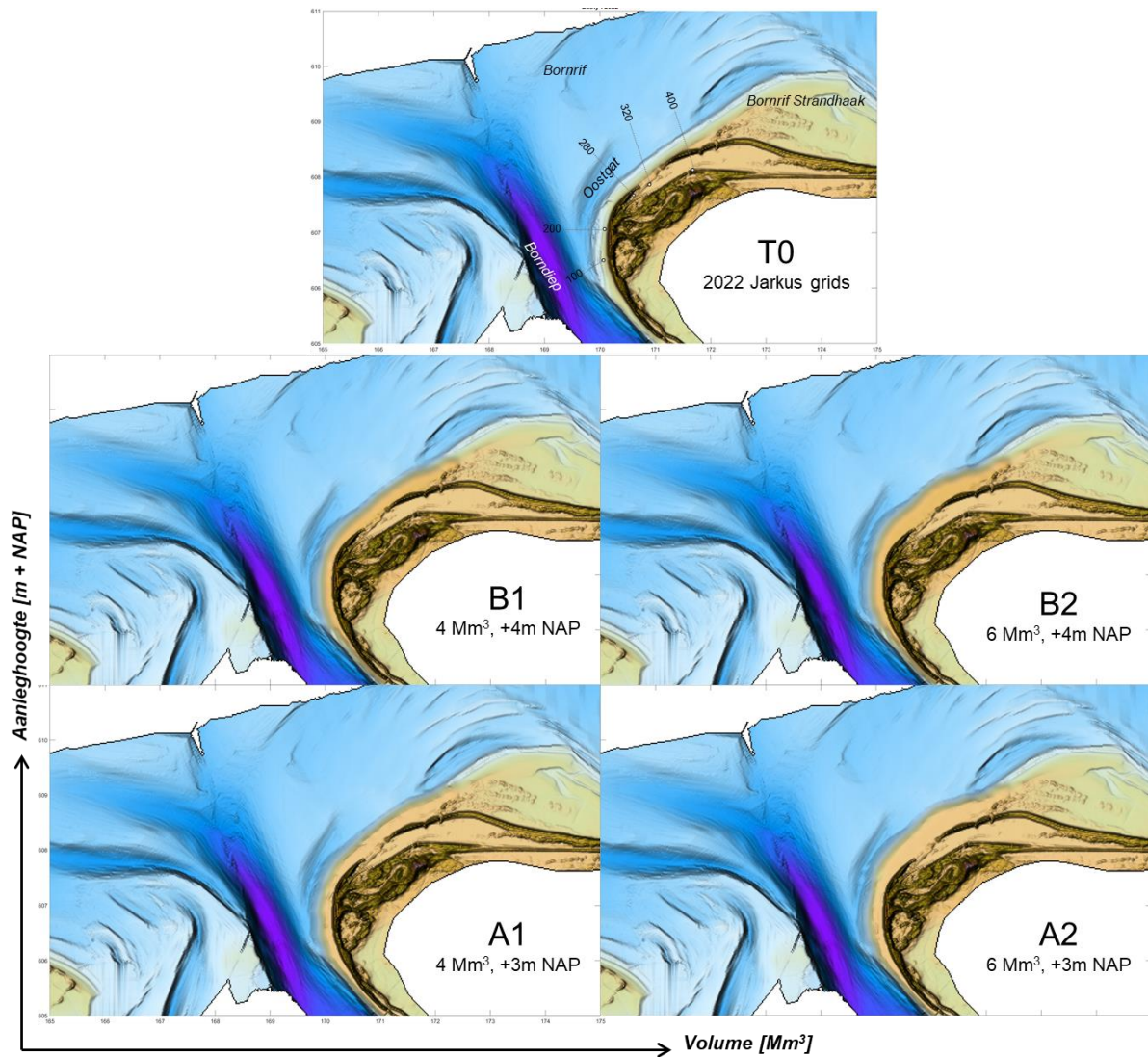


Figuur 1-3 Conceptuele weergave van de vier ontwerpvarianten voor de Zandmotorsuppletie bij Ameland NW.

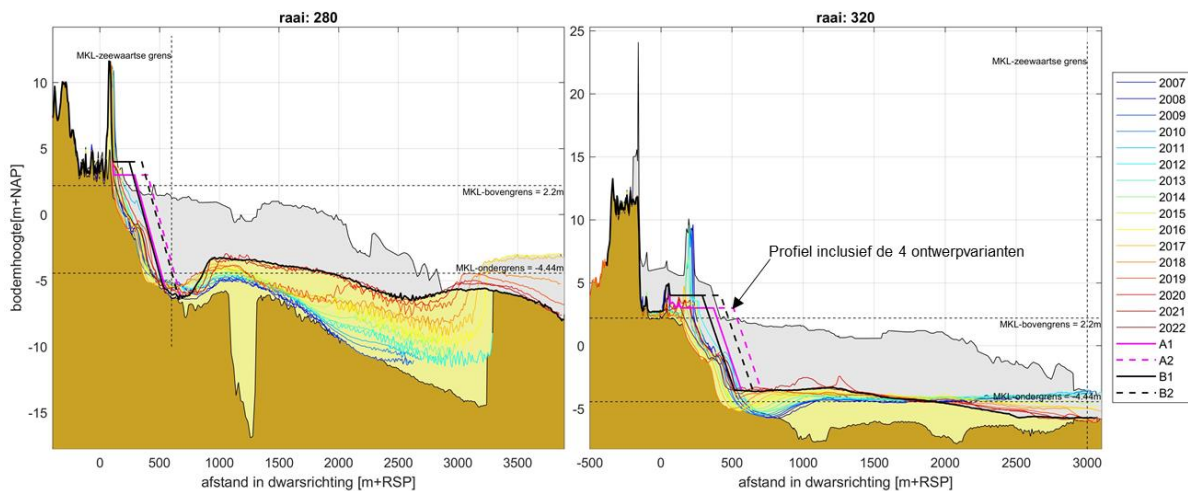
## 1.2 Ontwerpvarianten

De meest recente bodemkaarten op basis van de Jarkus-data van 2022 zijn gebruikt als basiskaart (Figuur 1-4, T0). De vier ontwerpvarianten zijn vervolgens geprojecteerd op de T0-bodem. Het bovenaanzicht is te zien in Figuur 1-4 voor varianten A1, A2, B1 en B2. In dit bovenaanzicht is te zien dat alle ontwerpvarianten de voorliggende ontgrondingskuil (Oostgat) gedeeltelijk dichtzetten, maar dit gebeurt voornamelijk bij varianten met een volume van 6 Mm<sup>3</sup> (A2 en B2). Dit verschil in kustuitbouw per variant is duidelijker te zien in dwarsprofielen van raaien 280 en 320 (Figuur 1-5).

Een belangrijk verschil tussen de ontwerpvarianten is dat bij een hogere aanleghoogte van +4m NAP het totale suppletievolume hetzelfde blijft, en er dus wat minder zeewaarts wordt uitgebouwd dan bij de +3m NAP aanleghoogte (Figuur 1-5).



Figuur 1-4. Bovenaanzicht van de vier ontwerpvarianten (A1, A2, B1 en B2) op de T0-bodem (2022 Jarkus grids).



Figuur 1-5 Dwarsprofielen van Jarkus raaien 280 (links) en 320 (rechts) over de periode 2007-2022. De positie van ontwerpvarianten A1 (magenta lijn), A2 (magenta stippellijn), B1 (zwarte lijn) en B2 (zwarte stippellijn) zijn toegevoegd. De bruine vlakke geeft de minimale bodemligging sinds 1965 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1965, en de gele vlakke de meest recente 2022 bodemligging.



## 1.3 Inschatting levensduur van de vier suppletieontwerpen

De levensduur van de vier ontwerpvarianten is bepaald door middel van twee methoden;

- 1 Levensduur op basis van jaar van BKL-overschrijding na de ontwerpsuppletie (H1.3.1)
- 2 Levensduur op basis van trends in volumeontwikkeling (H1.3.2)

Voor de berekening worden de geobserveerde trends in erosie na de strandsuppleties van 2011, 2015 en 2019 (Tabel 1-1) gebruikt om een schatting van de te verwachte erosietrends te geven. Deze strandsuppleties zijn gekozen omdat er relatief veel volume zand is aangebracht op het strand, 1.3 – 2.5 miljoen m<sup>3</sup>, en daarom (op dit moment) de meest representatieve erosietrends geeft voor Ameland NW na een grote suppletie.

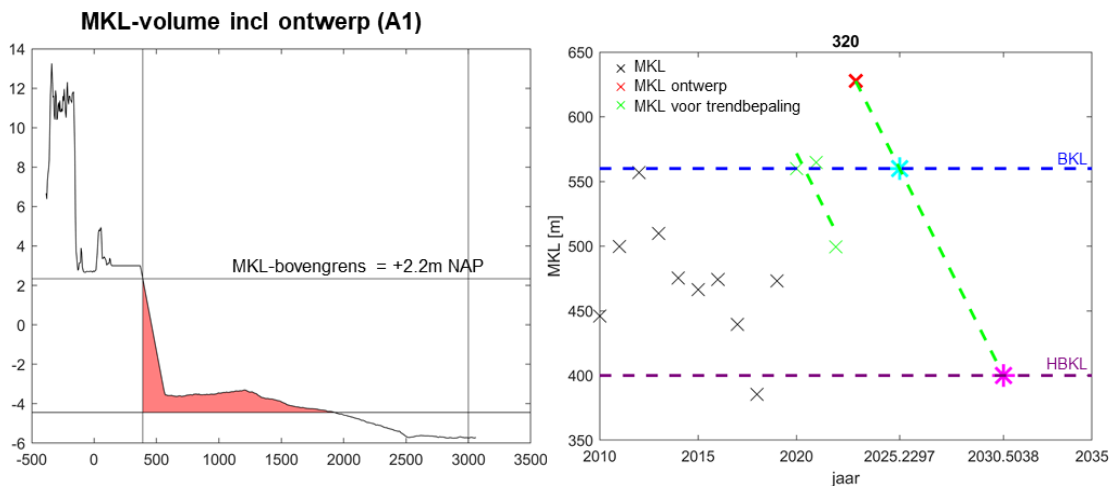
Het is de verwachting dat dit niet helemaal representatief is voor de te verwachte ontwikkeling van de vier ontwerpsuppleties. De ontwerpsuppleties zijn groter in volume en zorgen voor een sterkere zeewaartse verplaatsing van de kustlijn, vergeleken met de voorgaande suppleties. In H1.3.3 worden de andere processen beschreven die de levensduur van de suppletieontwerpen zullen beïnvloeden.

Tabel 1-1 Suppleties bij Ameland NW, uit de suppletiedatabase van RWS. Blauwe rijen geven de strandsuppleties aan die gebruikt zijn voor het bepalen van de erosie trends.

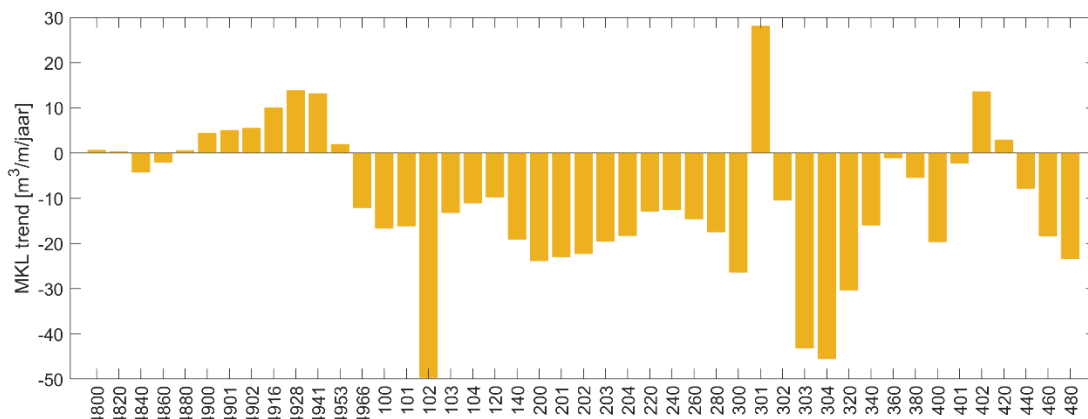
Locatie	Jaar	Begin Raai	Eind Raai	Lengte	Type	Volume (situ) m3	Volume [m3/m]
Hollum	1979	1.60	2.20	600	strandsuppletie	300,000	500
Ameland-west	1994	48.60	49.60	1000	strandsuppletie	190,000	190
Hollum	1997	1.20	3.00	1800	strandsuppletie	510,804	284
Hollum	2000	1.00	2.60	1600	strandsuppletie	401,002	251
Noordwest	2004	2.00	3.20	1200	strandsuppletie	403,636	336
Westkop	2007	1.95	3.02	1070	vooreversuppletie	1,201,234	1123
Westkop	2007	2.00	3.20	1200	strandsuppletie	303,444	253
West	2010-2011	2.00	4.00	2000	strandsuppletie	1,888,934	944
West	2015	1.40	4.02	2620	strandsuppletie	1,300,000	496
Zuidwest	2017-2018	46.20	48.20	2000	geulwandsuppletie	2,500,000	1250
Ameland west	2019	1.20	4.20	3000	strandsuppletie	2,542,000	847
<b>Totaal</b>						<b>11,541,054</b>	

### 1.3.1 Levensduur op basis van jaar van BKL-overschrijding na de ontwerpsuppletie

Door middel van de MKL-methodiek wordt de levensduur van elk suppletieontwerp in relatie tot het kustlijnonderhoud bepaald. De nieuwe (fictieve) momentane kustlijn (MKL) positie is berekend met het Jarkusprofiel van 2022 inclusief suppletieontwerp (parse kruis 'MKL ontwerp' in Figuur 1-6). Hierbij wordt de MKL-rekenschijf van de laatste (1-1-2023) kustlijntoetsing gebruikt. Op basis van de MKL-trend na de meest recente strandsuppletie (trendperiode van 2019 tot 2022, groene lijn in Figuur 1-6), is het moment bepaald waarop de basiskustlijn (BKL) wordt overschreden in de toekomst (groene ster in Figuur 1-6). De resulterende MKL-trends (groene lijn in Figuur 1-6) per raai zijn weergegeven in Figuur 1-7.



Figuur 1-6 Voorbeeld berekening MKL volumes voor raai 320 bij Ameland. Links: 2022 Jarkusprofiel inclusief suppletie ontwerp van variant A1. Rode vlak geeft MKL-volume weer op basis van de MKL rekenschijf volgens de kustlijnbeoordeling 1-1-2023 (zwarte lijnen). Rechts: MKL-ontwikkeling voor jaren 2010 – 2022. De MKL-positie inclusief A1 ontwerp (rode kruis), en trendlijn (groene stippellijn) geven het jaar van BKL overschrijding (blauwe ster) en HBKL overschrijding (magenta ster).



Figuur 1-7 Trend in MKL-positie over de trendperiode voor raaien 200 – 340 bij Ameland. De trend is bepaald over de trendperiode 2019-2022, na de meest recente strandsuppletie, groene lijn in Figuur 1-6.

Het jaar van BKL overschrijding is bepaald voor raaien 200 – 360 (Figuur 1-8, links), hierbij is gebruik gemaakt van de trends zoals weergegeven in Figuur 1-7. Voor raaien 220 tot 303 is er niet voor alle ontwerpvarianten een jaar van overschrijding berekend. Dit kan twee oorzaken hebben. Enerzijds kan het zijn dat, doordat de BKL hier relatief ver zeewaarts ligt, de MKL inclusief het suppletievolumen alsnog landwaarts van de BKL ligt. Anderzijds kan het zijn dat de gebruikte trendperiode (2019-2022) geen negatieve, maar een positieve trend had, waardoor uit deze berekening volgt dat de MKL de BKL niet zal kruisen.

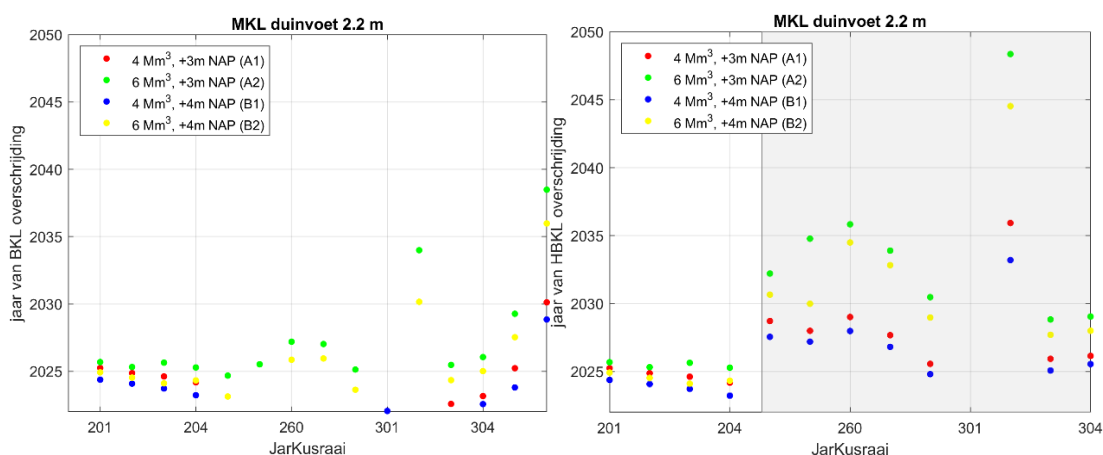
Binnen het Herziening BKL 2023 traject is voor Ameland NW een voorstel gemaakt voor een herziening BKL (HBKL) dat beter aansluit op de huidige kustlijn van Ameland NW (Deltares, in prep., zie Figuur A-1 in de bijlage). Dezelfde berekening met het HBKL voorstel (oranje ster in Figuur 1-6), geeft een BKL overschrijding in de toekomst voor alle raaien (Figuur 1-8, rechts).

Voor alle raaien is te zien dat de varianten met lagere aanleghoogte van +3 m NAP (A1, A2) een langere levensduur hebben van ~1 jaar. Dit wordt veroorzaakt door de MKL-bovengrens van de rekenschijf op +2,2 m NAP, waardoor het suppletievolumen boven deze grens niet wordt meegenomen in het MKL-volume (zie MKL-bovengrens in Figuur 1-6). Het kleine verschil in

levensduur tussen de varianten met hetzelfde aanlegvolume (A1+B1 en A2+B2) wordt veroorzaakt doordat wat minder zeewaarts wordt uitgebouwd bij een hogere aanleghoogte (Figuur 1-5), en dus minder volume binnen de MKL-rekenschijf valt. Dit is dus niet representatief voor de gevoeligheid van de levensduur van de ontwerpen voor aanleghoogte.

De levensduur van de ontwerpvarianten op basis van jaar van BKL-overschrijding is bepaald door het gemiddelde jaar van BKL overschrijding in Figuur 1-8 te bepalen. Hierbij wordt alleen onderscheid gemaakt op basis van het aanlegvolume:

- A1 & B1 (4Mm<sup>3</sup>): gemiddelde BKL-overschrijding in 2 - 3 jaar (4 – 5 jaar bij HBKL)
- A2 & B2 (6Mm<sup>3</sup>): gemiddelde BKL-overschrijding in 4 - 5 jaar (6 – 7 jaar bij HBKL)



Figuur 1-8 Jaar van BKL (links) en HBKL (rechts) overschrijding voor de vier ontwerpvarianten, langs raaien 200 – 340 bij Ameland.

### 1.3.2 Levensduur op basis van trends in volumeontwikkeling

Een alternatieve methode om de levensduur van de suppletie te bepalen, is door middel van de geobserveerde (erosieve) trends in volumeontwikkeling in de Jarkus-dwarsprofielen.

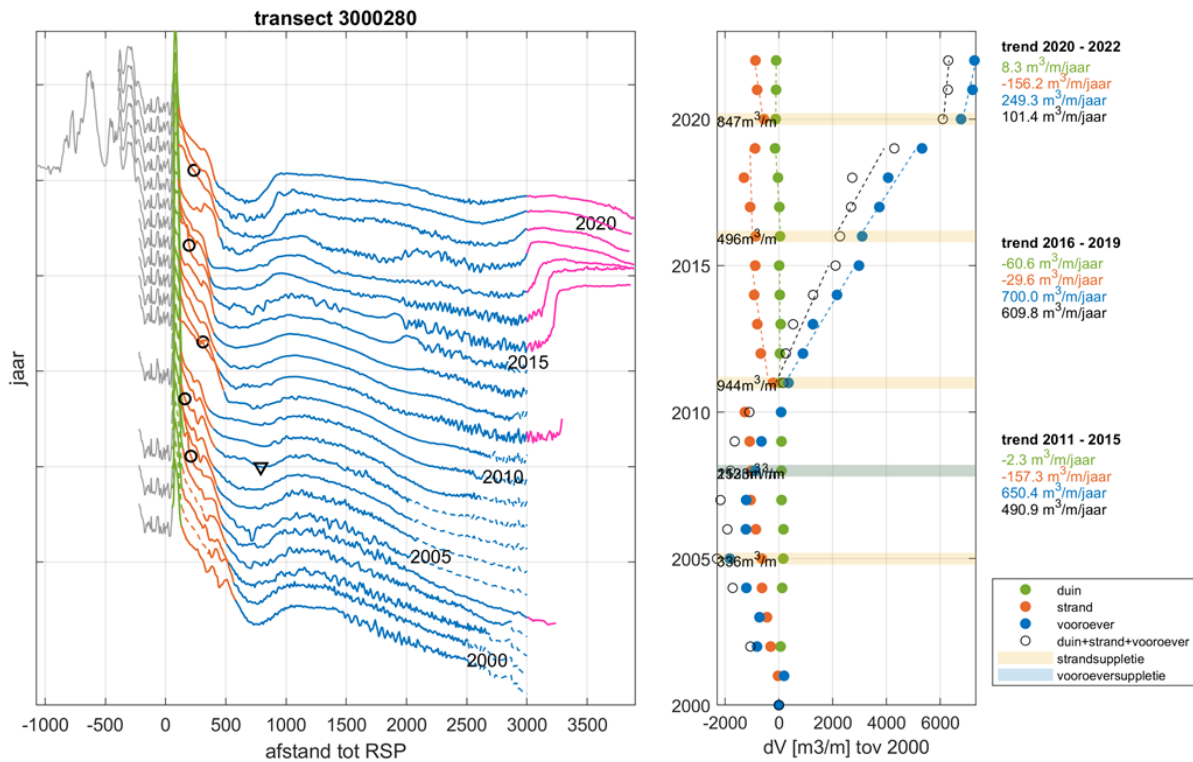
Het profiel is onderverdeeld in drie zones: duin, strand en (ondiepe) vooroever (respectievelijk groen, oranje en blauw in Figuur 1-9). Voor de analyse in deze studie is alleen de strand-zone (oranje) van belang. De verticale begrenzing van de strand-zone is gekozen op basis van de maximale en minimale ligging van de suppletieontwerpen, bovengrens op +4m NAP en ondergrens op -5m NAP. Voor elk jaar wordt de doorsnijing van het dwarsprofiel met de onder- en bovengrens afgeleid. Het kustdwarse domein van de strand-zone varieert dus in de tijd. Het oppervlakte onder het profiel en binnen de begrenzingen, geeft dan een volume in [m<sup>3</sup>/m] voor elk jaar (oranje bollen in Figuur 1-9). Op basis van de ontwikkeling van de volumes in de periode tussen de strandsuppleties van 2011, 2015 en 2019 wordt een (lineaire) trendlijn bepaald. Deze trendlijn geeft de geobserveerde trend in erosie in [m<sup>3</sup>/m/jaar] na de drie strandsuppleties.

De geobserveerde trends in de volumes van de strand-zone (bovengrens op +4m NAP en ondergrens op -5m NAP) zijn berekend voor Jarkus-raaien 4800 – 480 (Figuur 1-10). In het gebied waar de strandsuppleties van 2011, 2015 en 2018 zijn aangelegd varieert de erosieve trend van -70 tot -278 m<sup>3</sup>/m/jaar.

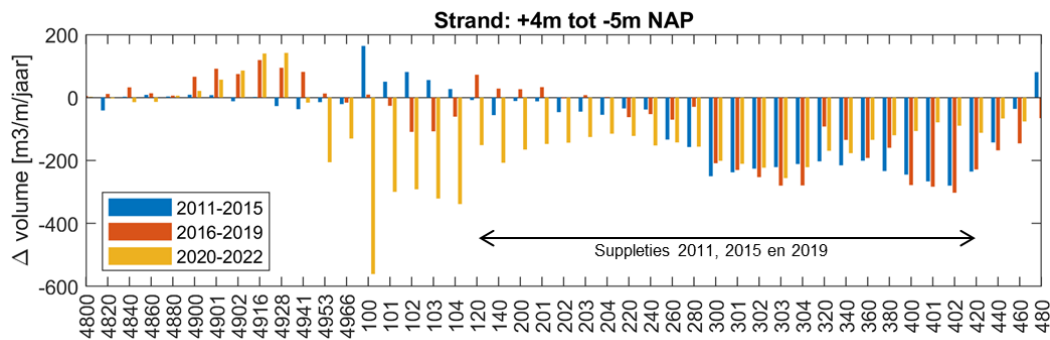
De aanlegvolumes per raai van de vier suppletievarianten is weergegeven in Figuur 1-11. De 4 Mm<sup>3</sup> varianten (A1 en B1) hebben een maximaal aanlegvolume van 1000 m<sup>3</sup>/m tussen raaien 200 – 420, en de 6 Mm<sup>3</sup> varianten (A2 en B2) een maximaal aanlegvolume van 2000 m<sup>3</sup>/m tussen raaien 260 – 380. De levensduur van de suppletievarianten wordt berekend door het

aanlegvolume per raai te delen door de gemiddelde en maximale erosieve trend (in m<sup>3</sup>/m/jaar) tussen raaien 240 – 400:

- A1 & B1 (4 Mm<sup>3</sup>): levensduur 4,5 – 5,5 jaar bij gemiddelde trend, 3 – 4 jaar bij maximale trend
- A2 & B2 (6 Mm<sup>3</sup>): levensduur 9 – 11 jaar bij gemiddelde trend, 6 – 7 jaar bij maximale trend

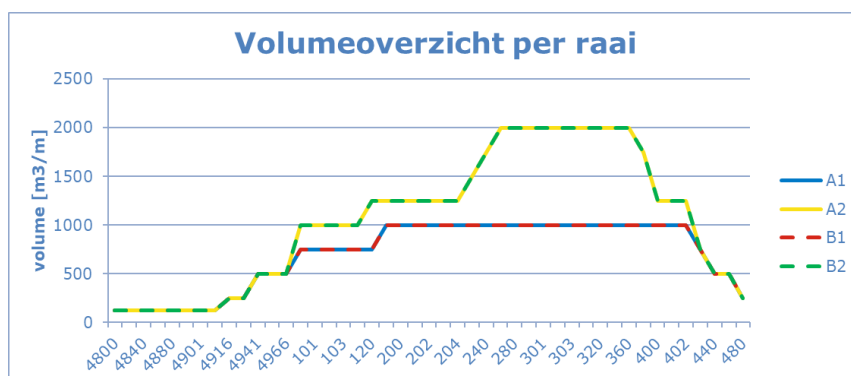


Figuur 1-9 Methode voor het bepalen van de volumeontwikkeling bij Jarkusraai 280 bij Ameland. Links: timestack geeft de dwarsdoorsnedes per jaar gestapeld weer. Het duin is groen, het strand oranje en de vooroever blauw. Rechts: volumeontwikkeling over de tijd voor elke zone, op basis van de gekleurde profielen links. De suppleties zijn weergegeven met de gele (strand) en blauwe (vooroever) vlakken inclusief volume in m<sup>3</sup>/m. De rode cirkel geeft de periode aan die voor deze studie gebruikt wordt, met de berekende trends over de periodes aan de rechterzijde.



Figuur 1-10 Trends in volumeontwikkeling voor de strandzone (+4 tot -5m NAP) voor raaien 4800 – 480 bij Ameland, voor de periode na de strandsuppleties van 2011 (blauw), 2015 (rood) en 2019 (geel).





Figuur 1-11 Aanlegvolumes per raai voor de ontwerpvarianten A1, A2, B1 en B2, volgens de ontwerpen zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat.

### 1.3.3 Additionele processen die de levensduur beïnvloeden

#### *Gedeeltelijk dichtzetten van de ontgrondingskuil Oostgat*

De voorgaande kwantificering van de levensduur van de ontwerpvarianten zijn bepaald op basis van de trends in erosiesnelheden van eerdere strandsuppleties. Deze strandsuppleties hadden een kleiner volume, 1,3 tot 2,5 Mm<sup>3</sup>, en zijn op het strand aangelegd. De ontwerpvarianten van de Zandmotor-suppletie zorgen voor een kustuitbouw tot maximaal ~350m (zie dwarsdoorsnede in Figuur 1-5), waardoor het voorliggende Oostgat versmalt.

Het gedeeltelijk dichtzetten van de geul door de suppletie zou kunnen zorgen voor een verdere verdieping van de geul, maar dat lijkt niet waarschijnlijk. Uit Elias et al. (2021) volgt dat het Oostgat geen dominante getij geul van het zeegat is, maar het vormt door de lokale contractie van de stroming om de noordwestzijde van Ameland. Door verkleining van het doorstroomoppervlakte na aanleg van de suppletie, is het waarschijnlijk dat de stroming en het transport toenemen, waardoor er initieel een vergroting van de erosieve trend zal ontstaan. Deze erosie zal sterker zijn dan gemiddelde erosieve trends zoals berekend in de voorgaande paragraaf. Het effect van het gedeeltelijk dichtzetten van het Oostgat op de erosieve processen is echter lastig te kwantificeren en voorspellen. Een schatting van de levensduur van de suppletievarianten inclusief de sterkere initiële erosieve trend is gebaseerd op de maximale erosieve trend tussen raaien 240 – 400 (Figuur 1-10). De levensduur wordt vervolgens gecorrigeerd op basis van expert-oordeel. Bij de 6 Mm<sup>3</sup> varianten wordt de kust verder zeewaarts uitgebouwd vergeleken met de 4 Mm<sup>3</sup> varianten, wat dus zal resulteren in een sterkere toename in sedimenttransporten aan de kop van de suppletie. Dit geeft de volgende levensduur:

- A1 & B1 (4Mm<sup>3</sup>): 4 jaar
- A2 & B2 (6Mm<sup>3</sup>): 5 jaar

#### *Effect van aanleghoogte op levensduur*

De methoden tot nu toe gebruikt voor het bepalen van de levensduur zijn allen op basis van het totale suppletievolume. Kennis en begrip over het effect van aanleghoogte op de levensduur van een suppletie is er op dit moment niet. Wel kan beargumenteerd worden dat een hogere aanleghoogte van de strandsuppletie zorgt voor 'voeding' van het volume in de MKL-zone op langere termijn. Initieel valt een deel van het suppletievolume buiten de MKL-rekenschijf (bij Ameland NW ligt de bovengrens op +2.2m NAP), maar bij doorgaande erosie van de kust zal de suppletie vervormen en lager in het profiel komen te liggen. Daarnaast zal een hogere aanleghoogte ook bijdragen aan de waterveiligheidsfunctie van de duinen: Bij een storm zal een breder duin tussen de +3 en +4m NAP zone zorgen voor een lagere faalkans.

Kwantificeren van het effect van aanleghoogte op de levensduur is lastig, zeker voor een gebied waar het suppletiezand zeer snel erodeert zoals bij Ameland NW. Een belangrijk onderdeel

zullen de toekomstige weersomstandigheden zijn; of er in de toekomst een relatief kalm of ruw golf- en windklimaat optreedt zal de levensduur sterk bepalen. Met name tijdens stormen kan er veel zand afgeslagen worden vanuit het hogere deel en wordt vrijwel direct afgevoerd naar het zeegat. Dat zand draagt wel bij aan het totale sedimentvolume van het systeem, maar zal zich in het bekken of zeewaarts op de buitendelta afzetten. De BKL zal dan weer snel overschreden worden. In periodes met een kalm golf- en windklimaat zal de afslag in het hoge deel van het profiel veel kleiner zijn, waardoor dit zand voor een langere tijd in het profiel aanwezig kan zijn en dan bijdraagt in de MKL rekenschiif.

Ook zijn er andere processen die relevant zijn voor de aanleghoogte, op basis van observaties bij de Delflandse Zandmotor:

- Bij de Delflandse Zandmotor zijn er regelmatig kliffen (of steilranden) ontstaan op de zeezijde van de haak van de Zandmotor (Figuur 1-12, De Schipper et al., 2017). De kliffen ontstaan bij een storm bij laagwater, zogenaamde zomerstormen, en eroderen meestal weer bij een hoogwaterstorm of door het uitdrogen en inzakken van het zand in droge periodes. Uit Van Bemmelen et al. (2020) volgt dat de kans op klifvorming groter is bij een hogere aanleghoogte van een strandsuppletie. Dergelijke kliffen zijn mogelijk gevaarlijk voor strandgebruikers, maar in de praktijk zijn geen gevallen bekend bij Zandmotor.
- Aanleghoogte van het strand kan effect hebben op het aanbod van eolisch transport van zand naar de duinen. Het hogere strand van de Zandmotor (ongeveer +3m NAP) lag te hoog voor de golven (en golfoploop) om deze laag te kunnen omwerken. Dit resulteerde in een beschermende laag van grover zand en schelpen doordat alleen transport van het fijne zand kon plaatsvinden. Dit impliceert dat een hogere aanleghoogte van de suppletie bij Ameland kan leiden tot een kleiner verlies naar de duinen, en dus een positieve bijdrage levert aan de levensduur. Maar dit effect is tot op heden nog niet bewezen of gekwantificeerd.



Figuur 1-12 Kliffen op de Zandmotor (De Schipper et al., 2017; Luchtfoto: Rijkswaterstaat – Joop van Houdt)

#### Strandvallen bij Ameland West

Bij Ameland West treden er met enige regelmaat strandvallen op. De strandval in 2017 is opgetreden bij het strandhoofd in raai 4800, en is geanalyseerd door Vermaas et al. (2018). Zij concluderen dat het zinkstuk bij het strandhoofd is verzakt in de ontgrondingskuil, waardoor het zand daarboven onbeschermd en een steile helling heeft. Dit veroorzaakt zettingsvloeiing, waarbij het zand snel in de ontgrondingskuil verdwijnt. In de periode erna zandt het gat van de strandval ook snel weer aan, waarschijnlijk sneller door de strandsuppleties, waardoor het proces zich steeds weer (en eerder) zal herhalen.

## 1.4 Conclusie

In Tabel 1-2 worden de resultaten voor de levensduur van de vier suppletieontwerpen voor Ameland NW samengevat. Voor een compleet overzicht zijn de resultaten van de Zandmotor-variant uit de studie 'systeemsuppleties op eilandkoppen' (Elias et al., 2021) ook toegevoegd.

Voor alle varianten geldt dat de suppletie de erosieve processen niet wegneemt, maar dat deze zeewaarts verschuiven met de suppletie. De suppletievarianten dragen wel rechtstreeks bij aan kustlijnhandhaving door 4, 6 of 9 miljoen m<sup>3</sup> zand op de kustlijn aan te brengen. Echter schaalt de levensduur niet lineair met het suppletievolume. Er zal aanzienlijke erosie op de kop van de Zandmotorsuppletie op Ameland NW optreden, en de erosie zal initieel veel sterker zijn voor een sterkere zeewaartse uitbouw van de kustzone afhankelijk van de suppletievariant. In dit opzicht is een suppletievolume van 6 of 9 Mm<sup>3</sup> niet effectiever dan een suppletie van 4 Mm<sup>3</sup>. Het effect hiervan op de levensduur is bepaald op basis van expert-oordeel (Tabel 1-2).

Wat opvalt in Tabel 1-2 is de relatief korte levensduur van de Zandmotor variant uitgewerkt in de systeemsuppleties studie uit 2021 (Elias et al., 2021). Deze korte levensduur kan worden verklaard doordat 1) de suppletie een veel grotere uitbouw van de natuurlijk kustlijn geeft, en 2) in deze suppletie het Oostgat geheel dichtgezet wordt. De suppletie strekt zich uit tot op het ondiepe deel van het Bornrif. Dit heeft als gevolg dat de stroomsnelheden aan de kop van de suppletie veel sterker toenemen dan bij het gedeeltelijk dichtzetten van de geul. Hierdoor zal de erosie veel hoger zijn dan de varianten A1, A2, B1 en B2 waar dit in mindere mate optreedt.

Kwantificeren van het effect van aanleghoogte op de levensduur is lastig, en is in deze studie ook niet gedaan. Een hogere aanleghoogte van de strandsuppletie zou potentieel kunnen zorgen voor 'voeding' van het volume in de MKL-zone op langere termijn. Het is echter onzeker of dit de levensduur significant zal beïnvloeden gegeven de sterke erosieve trends bij Ameland NW en onzekerheid in de toekomstige weersomstandigheden. De kans op klifvorming is wel groter bij hogere aanleghoogte van een strandsuppletie.

Tabel 1-2 Samenvatting van de kenmerken en levensduur van de suppletievarianten

Ontwerpvariant	A1	A2	B1	B2	Zandmotor-variant uit Elias et al. (2021)
Ontwerp volume/hoogte	4 Mm <sup>3</sup> , +3m NAP	6 Mm <sup>3</sup> , +3m NAP	4 Mm <sup>3</sup> , +4m NAP	6 Mm <sup>3</sup> , +4m NAP	9.1 Mm <sup>3</sup> , +2m NAP
Levensduur MKL t.o.v. BKL	2 – 3 jaar	4 – 5 jaar	2 – 3 jaar	4 – 5 jaar	
Levensduur gemiddelde trend volumes	4,5 – 5,5 jaar	9 - 11 jaar	4,5 – 5,5 jaar	9 - 11 jaar	
Levensduur maximale trend volumes	3 - 4 jaar	6 - 7 jaar	3 - 4 jaar	6 - 7 jaar	
Levensduur o.b.v. expert-oordeel door het meenemen van de verwachte additionele processen	4 jaar	5 jaar	4 jaar	5 jaar	
<b>Geschatte levensduur</b>	<b>4 jaar</b>	<b>5 jaar</b>	<b>4 jaar</b>	<b>5 jaar</b>	<b>5 – 6 jaar</b>

## 1.5 Discussie en aanbevelingen

De kustlijn van Ameland NW wordt sterk beïnvloed door de voorliggende buitendelta. Op de buitendelta vinden periodieke verplaatsingen van zandbanken plaats als onderdeel van het "sediment-bypassing proces". Sediment bypassing beschrijft het verplaatsen van zand van het benedenstroomse eiland (Terschelling), via de buitendelta naar het bovenstroomse eiland (Ameland). Als onderdeel van de sediment-bypassing cyclus ontstaan er banken op het centrale, noordwestelijke deel van de buitendelta. Deze banken verplaatsen langzaam oostelijk, waarna ze uiteindelijk aanlanden op de eilandkust. Bij aanlanding bouwt de kust dan vrijwel

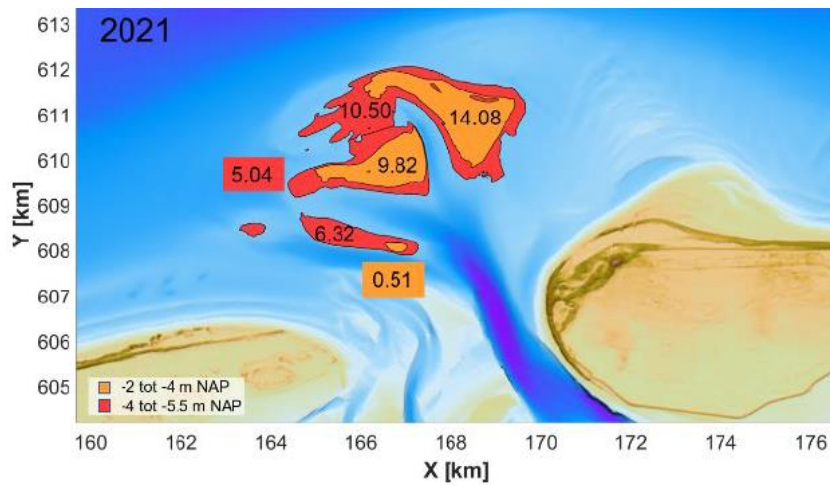
instantaan sterk zeewaarts uit. Na deze uitbouw volgt een langdurige periode van structurele terugtrekking.

De kust van Ameland NW is rond 1986 sterk zeewaarts verplaatst na aanlanding van de Bornrif Strandhaak. Sindsdien vindt er bij Ameland NW een structurele terugtrekking plaats. Deze structurele erosie zal zich voortzetten tot er weer een geschikte bankaanlanding optreedt. Het begrip geschikte aanlanding is hierbij van belang; de aanlandingscycli zijn niet allemaal gelijk. Rond 2017 is er een nieuwe bankaanlanding opgetreden (het Bornrif Bankje). Deze aanlanding vond echter niet plaats op de kop van de buitendelta, maar verder oostelijk. De reden hiervoor is waarschijnlijk dat het Bankje gevormd werd op de rand van de buitendelta. Hierdoor was er een relatief grote invloed van het getij en een kleinere invloed van golven. Het Bankje beweegt zich dan ook langs de rand van de buitendelta richting de kust en landt dan oostelijk van de Strandhaak aan. De aanlandingsbanken verhelen hier geleidelijk met de kustlijn en voeden dan wel de centrale eilandkust maar niet de eilandkop van Ameland NW.

De recente analyse van Elias et al. (2022) laat zien dat zich zeewaarts op de buitendelta al nieuwe aanlandingsbanken hebben gevormd die in potentie een aanlandingsbank voor Ameland NW kunnen vormen (Figuur 1-13). In tegenstelling tot het Bornrif Bankje hebben de nieuwe aanlandingsbanken zich op het centrale deel van het buitendeltaplatform gevormd. Soortgelijke banken waren ook zichtbaar bij de vorming van de aanlandingsbanken van de Bornrif Strandhaak. De centrale locatie op de buitendelta zorgt ervoor dat de relatieve invloed van golven hoger zijn dan die van het getij, en de banken kunnen zich dan landwaarts over het buitendelta platform bewegen.

In de huidige situatie is er geen suppletievariant die de onderliggende erosieve processen bij de kop van Ameland NW significant kan beïnvloeden. Langs de eilandkop zullen grote zandverliezen blijven optreden tot er een nieuwe bankaanlanding op de eilandkop plaatsvindt. De aanlandingsbanken op de buitendelta hebben op dit moment (2021 bodemkaart uit de Vaklodingen) een totaal volume van zo'n ~45 miljoen m<sup>3</sup> (Elias et al. 2022). Het is de verwachting dat deze banken zich landwaarts zullen blijven verplaatsen en er over 10 tot 15 jaar een nieuwe aanlanding kan plaatsvinden (dit lijkt wel een optimistische inschatting). Tot deze aanlanding zullen er nog 2 tot 3 suppleties nodig zijn om de periode te overbruggen. Dus (voorlopige) aanbeveling om voor de 4 Mm<sup>3</sup> variant te kiezen, vanwege de onzekerheid m.b.t. effect van gedeeltelijk dichtzetten Oostgat bij de 6 Mm<sup>3</sup> variant en gegeven de aankomende bankaanlanding.

Gezien het grote belang van de aanlandingsbanken voor het behoud van de eilandkoppen (en in principe dus ook de eilanden) is het essentieel om de onderliggende processen goed te begrijpen. Op dit moment kunnen we wel de aanlandingsbanken herkennen in de gemeten bodemdata, maar kennis voor het maken van toekomstige voorspellingen (met uitzondering van het extrapoleren van de al zichtbare ontwikkelingen) ontbreekt. Het goed monitoren van de ontwikkelingen op de buitendelta van Ameland stelt ons in staat deze kennis te ontwikkelen en hierdoor niet alleen de lokale kustlijndynamiek van Ameland beter te begrijpen, maar die van alle eilandkoppen van de Waddeneilanden en bij de Voordelta.



Figuur 1-13. Zandvolumes in de ebschilden in het Zeegat van Ameland binnen -5.5 en -4 m contour en de -4 op basis van de 2021-Vaklodingen (bron: Elias et al., 2022).



## 1.6 Referenties

Arcadis, 2022. BEOORDELING TRAJECT 2-1, AMELAND WETTELIJKE WATERVEILIGHEIDSBEOORDELING, referentie: 30070215.0213 v3.1 - Datum: 15 april 2022

De Schipper, M.A., Darnall, J., De Vries, S., Reniers, A.J.H.M. (2017). Beach scarp evolution and prediction. Proceedings of the Coastal Dynamics conference 2017.

Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. Marine Geology 415.

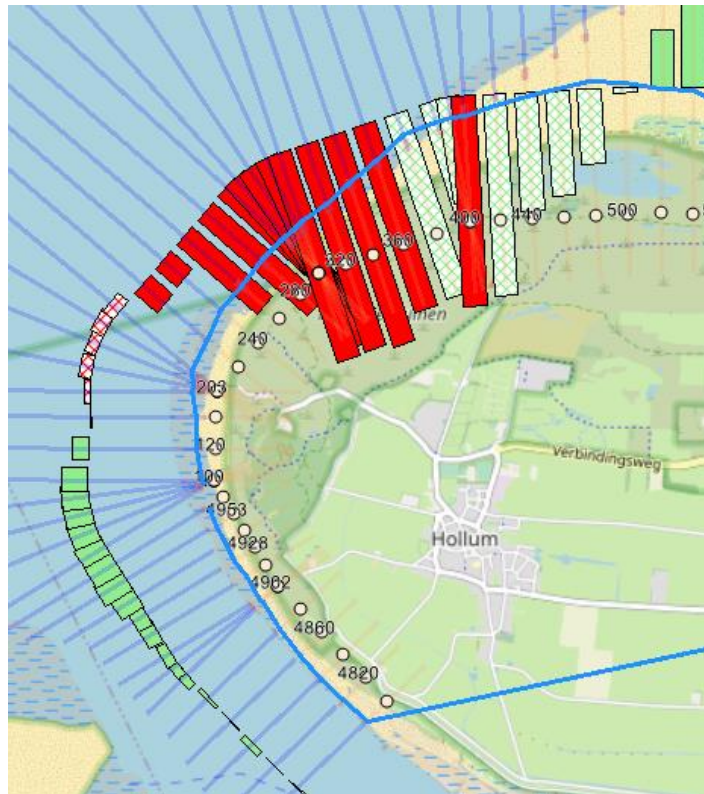
Elias, E.P.L., Roelvink, F. en Pearson, S. (2021). Systeemsuppleties op Eilandkoppen: Synthese. Deltares rapport 11205236-005-ZKS-0009.

Pluis., S. (2022). Kustproblematiek Ameland West en opties voor kustlijnherstel. Rijkswaterstaat WVL Memo aan Evelien Brand, datum: 26-07-2022

Van Bemmelen, C.W.T., De Schipper, M.A., Darnalla, J., Aarninkhof, S.G.J. (2020). Beach scarp dynamics at nourished beaches. Coastal Engineering

Vermaas, T., Mastbergen, D., Schrijvershof, R., Mesdag, R. en Gaida, T.(2018). Geologie, bestorting en strandvallen bij Ameland zuidwest. Analyses en metingen. Deltares rapport 11200538-004

## A Bijlage



Figuur A-1 Kustlijkaart Ameland Noordwest met het voorstel HBKL2023, op basis van zeevaartse grenzen bepaald uit Pluis en van Kuik (2022) (boven). Onder: de ligging van de huidige BKL (zwarte lijn), gemiddelde MKL-ligging over de laatste 10 jaar (gele lijn) en het voorstel voor de HBKL 2023 (magenta lijn). Bron: Deltares, in prep.