

## Systemsuppleties op Eilandkoppen

Synthese



# **Systeemsuppleties op Eilandkoppen**

## Synthese

### **Auteur(s)**

Edwin Elias

Floortje Roelvink

Stuart Pearson

## Systemsuppleties op Eilandkoppen

### Synthese

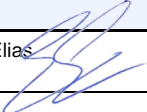
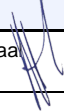
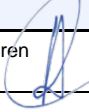
<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Stefan Pluis
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Morfologie, Zeegat van Texel, Amelander Zeegat, suppleties.

#### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	09-02-2021
<b>Projectnummer</b>	11205236-005
<b>Document ID</b>	11205236-005-ZKS-0009
<b>Pagina's</b>	43
<b>Status</b>	definitief

#### Auteur(s)

	Edwin Elias	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Edwin Elias 	Marcel Taai 	Toon Segeren 	

# Samenvatting

Dit rapport geeft de synthese van het onderzoek naar systeemsuppleties langs de Nederlandse kust. Dit zijn zandsuppleties waarbij invloed wordt uitgeoefend op de natuurlijke hydraulische en morfologische processen om het systeemgedrag verandert. Doel is de kustlijn duurzamer, met meer gebruik van de natuurlijke processen, te handhaven. Rijkswaterstaat heeft daarom behoefte aan onderzoek om systeemsuppleties te kunnen toepassen.

De eerste stappen van het onderzoek naar systeemsuppleties waren inventarisatie en selectie van mogelijke toepassingsgebieden en suppletievarianten. Het resultaat daarvan was de identificatie van het Oostgat (Ameland Noordwest) en het Molengat (Zuidwest Texel) als locaties. Er zijn vijf rekenontwerpen voor deze locaties gemaakt. Met morfostatisch modellering zijn de rekenontwerpen doorgerekend. Dit brengt de effecten op de stromingen, golven en sedimenttransporten in kaart. De berekende effecten op de kustindicatoren en een doorvertaling naar kansen en risico's van de suppletieontwerpen leidden tot een afgewogen keuze van de voorkeursvariant.

Een belangrijke conclusie uit de modellering is dat, zowel bij Ameland en bij Texel, de suppleties zijn aangebracht buiten de hoofdcirculatie van het zeegat. Dat betekent dat de grootschalige hydraulische en morfologische processen niet worden beïnvloed door de suppleties. Het risico dat de suppletie veranderingen op de schaal van het zeegat in gang zet lijkt daarmee beperkt.

Uit de analyses volgt de conclusie dat alleen de suppletievarianten Texel NUN en Texel ZM II zich als systeemsuppletie gedragen. De variant Texel NUN zorgt voor golfafscherming van de achterliggende kust. Dit kan de kusterosie reduceren en op termijn kan de suppletie de kust voeden met sediment. De ZM II suppletie zet het Molengat dicht en reduceert zo de stromingen, transporten en erosie van de aangrenzende kust, wat veel kansen biedt. Daar staat het risico tegenover dat de suppletie de processen in het noordelijke deel van de buitendelta ingrijpend verandert. Hoe de morfologische ontwikkeling zich na aanleg precies gaat ontwikkelen is op basis van deze studie niet te voorspellen. Bij keuze van deze variant is aanvullend onderzoek noodzakelijk om deze risico's beter in kaart te brengen.

De Ameland zandmotor en Texel ZM I beïnvloeden de natuurlijke processen niet wezenlijk en als zodanig werken ze niet als systeemsuppletie. Deze twee suppleties dragen wel bij tot kustlijnhandhaving. Er wordt veel zand op de kust aangebracht, waardoor voor lange tijd de erosie gemitigeerd wordt. Daarom zijn deze suppleties wel interessant, in het bijzonder als de efficiëntie ervan gunstiger is dan het frequent aanbrengen van strandsuppleties.

# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Introductie</b>	<b>6</b>
1.1	Aanleiding	6
1.2	Opzet van de studie & Leeswijzer	6
<b>2</b>	<b>Morfologische karakterisering van de gebieden (Stap 1)</b>	<b>8</b>
2.1	Inleiding	8
2.2	Beschrijving van de locaties	8
2.2.1	Goeree, De Bollen van de Ooster.	8
2.2.2	Zuidwest Texel, het Molengat.	9
2.2.3	Ameland Noordwest, het Oostgat	10
2.2.4	Schiermonnikoog Noordwest, het Plaatgat.	11
2.3	Afweging tussen de locaties	12
<b>3</b>	<b>Keuze suppletieontwerpen voor nader onderzoek (Stap 2 en Stap 3)</b>	<b>14</b>
3.1	Overzicht van mogelijke suppletievarianten, samenvatting expertsessie	14
3.2	Keuze en ontwerp van de suppletievarianten	17
3.2.1	Rekenontwerpen	17
3.2.2	Een zandmotor voor Ameland Noordwest.	17
3.2.3	Vier suppletie varianten voor Zuidwest Texel.	19
<b>4</b>	<b>Onderzoek en evaluatie van ontwerpen (Stap 4)</b>	<b>23</b>
4.1	Morfostatische modellering.	23
4.2	Modelresultaten voor zandmotor Ameland.	23
4.2.1	Een evaluatie van de situatie zonder suppletie (T0)	23
4.2.2	Invloed van de variant zandmotor Ameland	26
4.2.3	Een evaluatie van de zandmotor voor Ameland Noordwest	29
4.3	Modelresultaten voor Zuidwest Texel	29
4.3.1	Evaluatie van de situatie zonder suppletie (T0)	29
4.3.2	Invloed van de varianten op de golven	31
4.3.3	Invloed van de varianten op sedimenttransporten	34
4.3.4	Evaluatie van de suppletievarianten	37
<b>5</b>	<b>Conclusies en Aanbevelingen</b>	<b>40</b>
5.1	Conclusies	40
5.2	Aanbevelingen	40
<b>6</b>	<b>Referenties</b>	<b>42</b>

# 1 Introductie

## 1.1 Aanleiding

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor de duurzame instandhouding van areaal en functies van de kust. Het programma kustlijnverzorging verzorgt dit en gaat structurele kusterosie tegen met het suppleren van zand. De Basiskustlijn (BKL) geldt hierbij als referentie.

Het kustonderhoud van eilandkoppen kent extra uitdagingen door opdringende zandplaten en geulen. Hierom wordt er soms voor gekozen erosie toe te staan of alleen te bestrijden via regelmatige, kleinschalige, strandsuppleties. Om voor die gebieden tot een duurzamer handhaving van de kustlijn te komen wil Rijkswaterstaat systeemsuppleties onderzoeken. Systeemsuppleties zijn zandsuppleties waarbij de natuurlijke hydraulische en morfologische processen worden benut om de kustlijnonwikkeling op een positieve manier te beïnvloeden.

Ter afweging en voorbereiding van zulke suppleties, is meer kennis van de mogelijke morfologische effecten nodig. Rijkswaterstaat in samenwerking met Deltares hebben hiervoor het benodigde onderzoek uitgevoerd met als doel:

1. Identificatie van één of twee kansrijke locaties en komen tot gedragen oplossingsrichtingen (suppletieontwerpen) voor de toepassing van systeemsuppleties op eilandkoppen t.b.v. kustlijnonderhoud.
2. Inzicht in de hydraulische en morfologische effecten van systeemsuppleties met een doorvertaling naar de impact op (grootschalige) morfologie, de relevante kustindicatoren en de bijbehorende kansen & risico's van ingrepen in en rondom geulen.

## 1.2 Opzet van de studie & Leeswijzer

Voorafgaand aan het onderzoek zijn door Rijkswaterstaat vier potentiële locaties (allen eilandkoppen) geïdentificeerd waar een systeemsuppletie mogelijk toegepast kan worden. Deze locaties zijn (1) Bollen van de Ooster (Goeree), (2) het Molengat (Texel Zuidwest), (3) Oostgat (Ameland Noordwest) en (4) Plaatgat bij Schiermonnikoog. Het uitgevoerde onderzoek naar de toepassing van systeemsuppleties bestaat vervolgens uit vijf stappen.

**Stap 1;** Beschrijving en analyse van de morfologische processen (bestaande literatuur) op de vier locaties. Deze analyse geeft inzicht in de onderliggende processen en eventuele overeenkomsten en verschillen in deze processen tussen de vier locaties (Elias et al. 2020a).

**Stap 2;** Expertsessie met experts van Rijkswaterstaat en Deltares.

Deze sessie heeft als doel te komen tot een gezamenlijke onderbouwing en keuze voor:

- a. Indicatieve suppletieontwerpen per kustfundamentlocatie (inclusief indicatieve suppletievolumes) t.b.v. kustlijnonderhoud.
- b. Opstellen van kansen en risico's per kustfundamentlocatie.

De resultaten van deze workshop zijn vastgelegd in een memo (Elias,2020b).

**Stap 3** RWS ontwerpessie ten behoeve van het selecteren en opstellen van suppletieontwerpen. Dit resulteerde in vier rekenontwerpen voor Zuidwest Texel en één rekenontwerp voor Ameland Noordwest. Daarnaast is een set aan kustindicatoren opgesteld, bestaande uit kustlijnindicatoren en suppletie-indicatoren, en zijn per suppletieontwerp kansen en risico's gedefinieerd.

**Stap 4** Modelleren en analyse van de suppletieontwerpen (Elias en Roelvink, 2021). In deze stap worden de effecten van de suppletievarianten geanalyseerd middels morfostatistische

simulaties, voor een bodem zonder ( $T0$ ) en met suppletie ( $T1$ ). Dit geeft inzicht in het effect op stromingen, golven en sedimenttransporten op de (vooraf vastgestelde) kustindicatoren.

**Stap 5** is de synthese, waar deze rapportage verslag van doet.

Na de introductie volgen vier hoofdstukken. Hoofdstuk 2 introduceert de morfologische kenmerken van de vier suppletielocaties. Een uitwerking van de vijf gekozen suppletieontwerpen worden gegeven in Hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 vat de belangrijkste inzichten van de modelanalyses voor Zuidwest Texel en Ameland Noordwest samen. Ook wordt hier een evaluatie van de suppletievarianten gepresenteerd. Hoofdstuk 5 geeft de conclusies en aanbevelingen voor vervolgonderzoek.



## 2 Morfologische karakterisering van de gebieden (Stap 1)

### 2.1 Inleiding

De focus voor de mogelijke inzet van systeemsuppleties ligt op gebieden rond (afgesloten) zeegaten, waar opdringende geulen soms voor lange tijd erosie kunnen veroorzaken. Rijkswaterstaat identificeerde vier gebieden, waar een systeemsuppletie mogelijk is. Deze vier locaties zijn: de Bollen van de Ooster nabij Goeree, het Molengat langs de kust van Zuidwest Texel, het Oostgat nabij Ameland Noordwest en het Plaatgat langs de eilandkop van Schiermonnikoog (Figuur 2-1).

In stap 1 zijn processen en de verschillen en overeenkomsten tussen de vier gebieden geanalyseerd, om tot de meest geschikte locatie(s) te komen. Dit hoofdstuk doet beknopt verslag en de volledige uitwerking is beschikbaar in de rapportage van Elias (2020a).



Figuur 2-1: Een overzicht van de vier onderzoek locaties waar systeemsuppleties mogelijk zouden kunnen zijn.

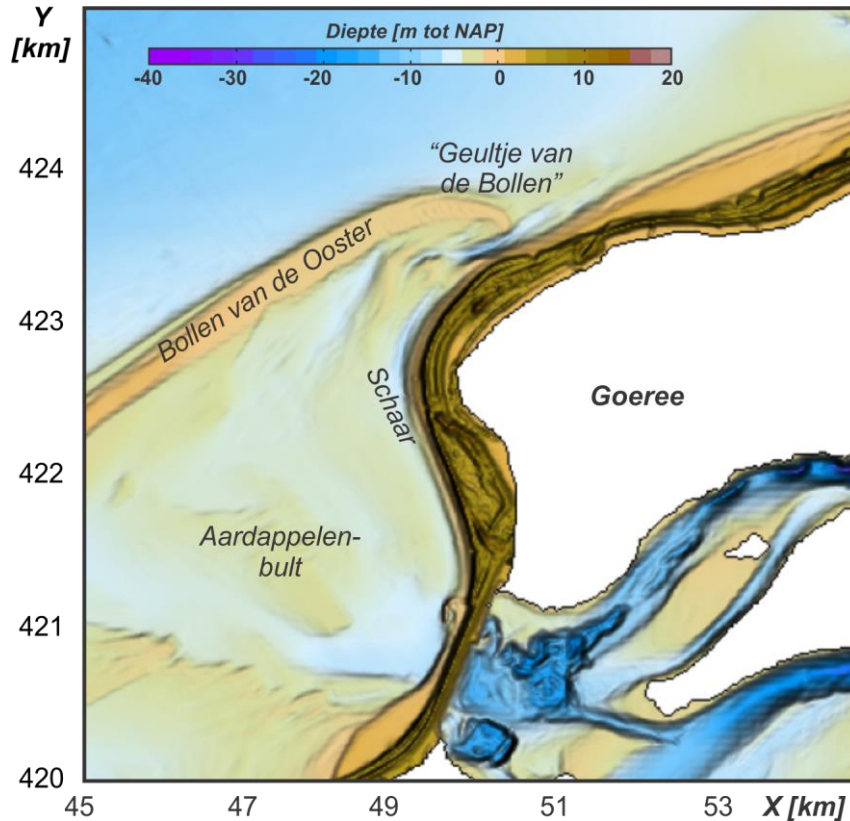
### 2.2 Beschrijving van de locaties

#### 2.2.1 Goeree, De Bollen van de Ooster.

De Bollen van de Ooster is een langgerekte zandbank in de Grevelingenmondning (Figuur 2-2). Deze bank heeft zich na afsluiting van het Grevelingen estuarium (in 1971) ontwikkeld tot een hoge, langgerekte plaat met een Zuidwest-noordoost oriëntatie. Ingeklemd tussen deze plaat en de kust van Goeree ligt een klein geultje (Geultje van de Bollen). Dit geultje ontstond doordat de getijstrooming tussen de kop van de Bollen en de kust door geperst wordt en de stromingen versnellen. De relatief hoge stroomsnelheden dragen bij tot het zeewaarts houden van de Bollen.



Zonder deze stroming zouden de Bollen van de Ooster al tegen de kust zijn gedrukt. Er is een dynamisch evenwicht tussen aanvoer van zand door golven en de afvoer door getij. Zolang er voldoende getijstroming door het geultje gevoerd kan worden zal het geultje en de gerelateerde kusterosie blijven. Het geultje beweegt mee met de verplaatsing van de kop van de Bollen van de Ooster. Aan de zeewaartse zijde van de Bollen van de Ooster overheersen de golfgedreven processen. Golfbreking langs de zeezijde van de bank zorgt voor een noordoostelijk gericht transport en een noordoostelijke en landwaartse uitbouw van de Bollen. Het erosiegebied dat samenhangt met de geul en stromingen verplaatst zich dan ook langzaam noordwaarts.



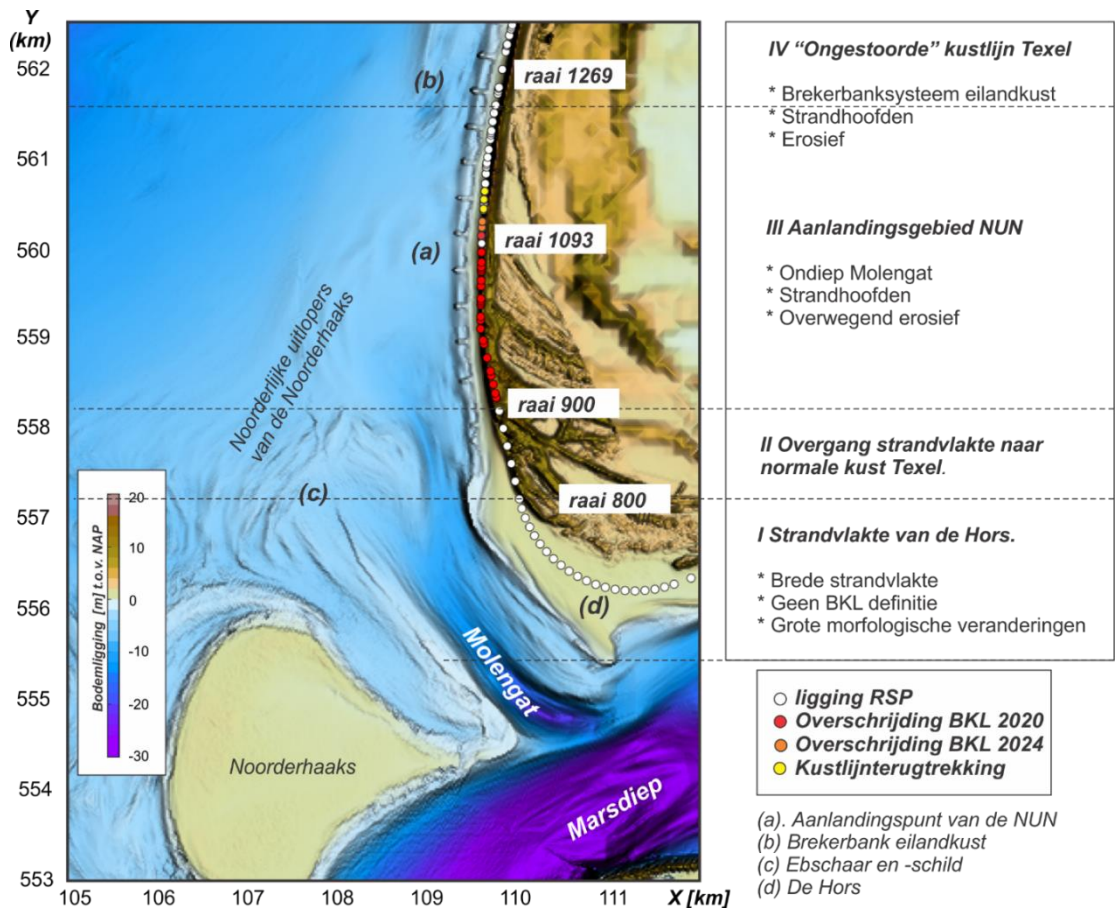
Figuur 2-2: Overzicht van de Bollen van de Ooster op basis van de 2015 Vakloding.

### 2.2.2 Zuidwest Texel, het Molengat.

Het Molengat bevindt zich op het noordelijke deel van de buitendelta van het Zeegat van Texel (Figuur 2-3). Het Marsdiep is de keel van het zeegat en gaat over in de hoofdgeulen van de buitendelta die zich vooral in zuidwestelijke richting, langs de kust van Noord-Holland, uitstrekken. Aan de noordzijde van de hoofdgeul bevindt zich de ongeveer 4 km<sup>2</sup> grote ondiepte Noorderhaaks, waarvan de oostzijde zich tijdens normale omstandigheden boven water bevindt. Ingeklemd tussen de Noorderhaaks en de Zuidwest kust van Texel ligt de geul Molengat. Deze geul strekt zich noordwaarts uit tussen tot ongeveer raai 1100. Zeewaarts van de geul, aan de noordkant van de Noorderhaaks, bevindt zich een langgerekte bank of spit: de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks ofwel NUN.

Decennia lang was het opdringen, het landwaarts verplaatsen, van het Molengat een belangrijke reden van grote zandverliezen van de kust (Cleveringa, 2001). Ook nu is dit stuk kust nog aan erosie onderhevig en is er een overschrijding van de BKL, tussen raai 900-1100. De studie van Elias en Van der Spek (2017) laat zien dat de processen onderliggend aan de erosie veranderd zijn. Het Molengat vertoont geen landwaartse verplaatsing meer, maar de erosie is nu gerelateerd aan het uitzakken van het geulprofiel en het opvullen van het Molengat. Tussen raai 900 en 1100 is de

aanvoer van zand ontoereikend is om de afvoer van zand, door het getij en golven, te compenseren. Ook De Hors is aan grote verandering onderhevig (Elias en Van der Spek, 2020).



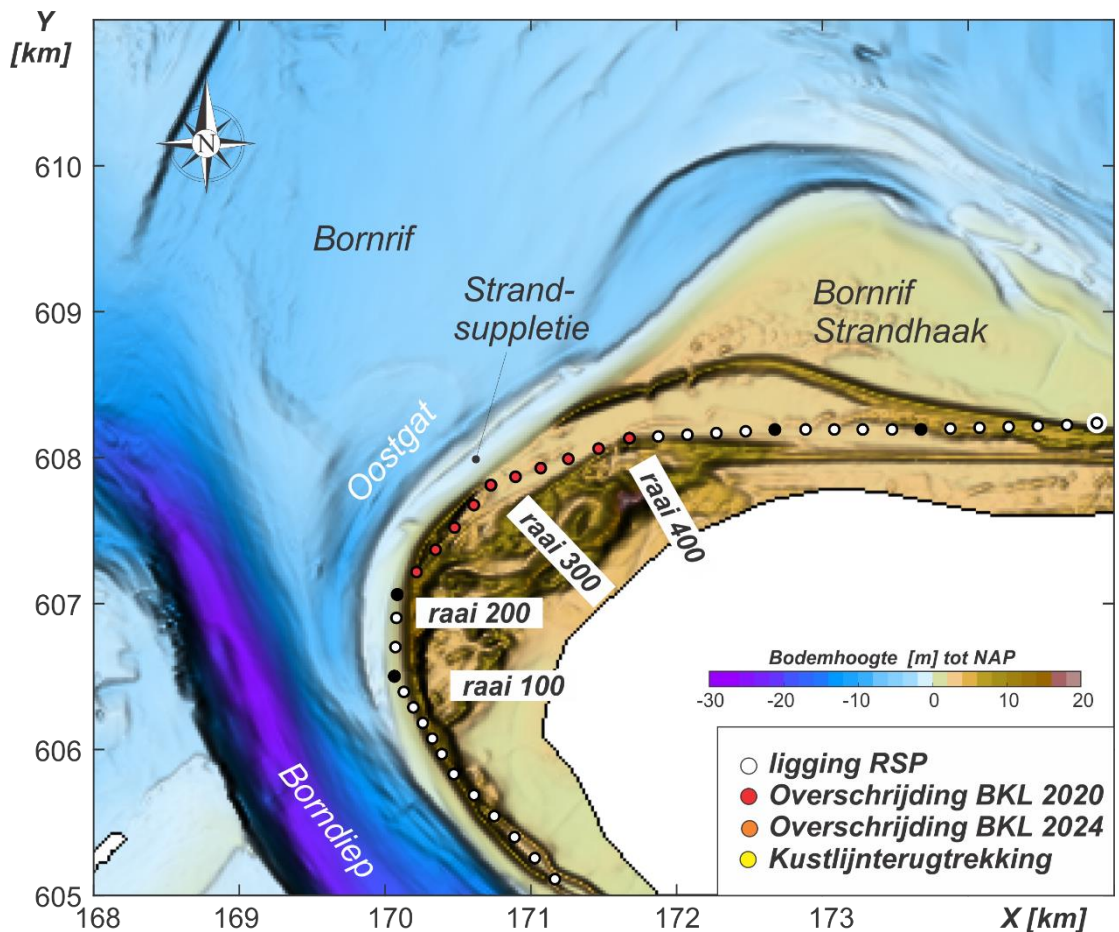
Figuur 2-3: De bodem van Zuidwest Texel op basis van de 2019 Vaklodging en Jarkus dataset. De rode cirkels geven de ligging van de RSP weer en de resultaten van de 2019-toetsing van de kustlijn.

### 2.2.3 Ameland Noordwest, het Oostgat

Het zeegat van Ameland ligt ingeklemd tussen de eilandstaart van Terschelling en de eilandkop van Ameland. Het Borndiep is de dominante geul in de keel van het zeegat en deze strekt zich ver zeewaarts uit. Aan de Noordwestzijde, voor de kust van Ameland Noordwest bevindt zich een groot, ondiep bankengebied, het Bornrif. Periodiek is er door het aanlanden van zandbanken vanaf het Bornrif met de kustlijn van Ameland sprake van (veel) zanduitwisseling. Het aanlanden van banken vindt periodiek plaats. 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 (Figuur 2-4).

Om de erosie tegen te gaan zijn regelmatig zandsuppleties nodig. In de bodem van 2019 (Figuur 2-4) is de grote strandsuppletie (2,76 miljoen m<sup>3</sup>), die toen 2019 nog in aanleg was, duidelijk zichtbaar. Dit onderhoud blijft nodig tot de configuratie van het Bornrif zich weer gunstiger ontwikkelt en er een nieuwe aanlanding optreedt.



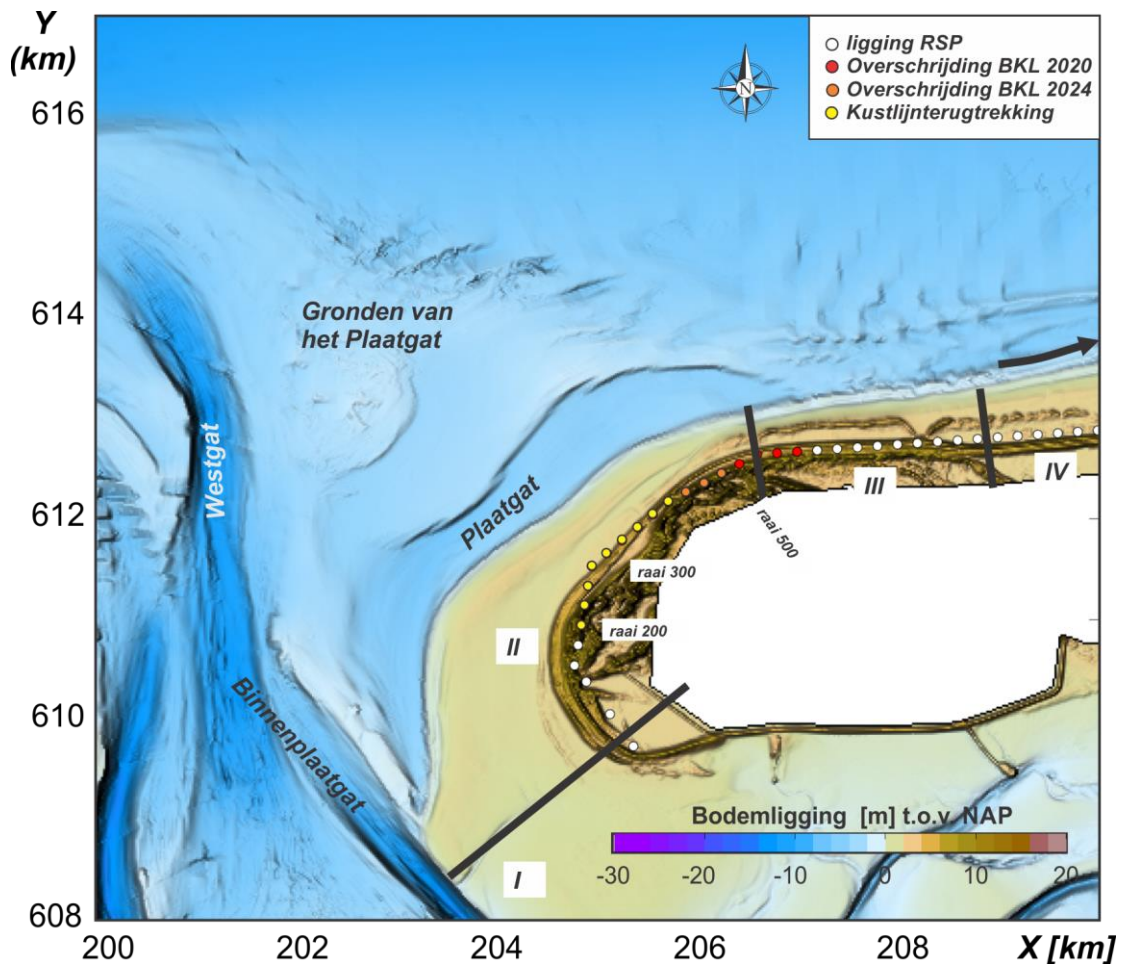
Figuur 2-4: De bodem in 2019 en de ligging van de raaien 100, 200, 300 en 400. De rode cirkels geven de ligging van de RSP weer en de resultaten van de 2019-toetsing van de kustlijn.

#### 2.2.4 Schiermonnikoog Noordwest, het Plaatgat.

Ook de erosie van de Noordwestkust van Schiermonnikoog hangt samen met de ontwikkelingen van de voorliggende buitendelta (Figuur 2-5). De afsluiting van de Lauwerszee in 1969 had hier een grote invloed (Elias en Oost, 2021). Na afsluiting vormde zich een groot haakvormig bankencomplex op de buitendelta (1971-1981). Deze bank bleef lange tijd aanwezig, maar landt rond 1991 aan op de eilandkop van Schiermonnikoog. Toen ontstond een breed strand dat zich sindsdien terugtrekt. Lokaal, op het bolle deel van de eilandkop, tussen raai 200 en 540, geeft dat een grote kustlijninterugtrekking, wat heeft geleid tot een overschrijding van de BKL, rond raai 500.

De kusterosie wordt veroorzaakt door golven en de getijstrooming door de voorliggende geul Plaatgat. De buitendelta schermt de kust af voor grote golfaanval, maar de kleine golven kunnen nog steeds de kust bereiken. Hier zorgen ze voor het opwoelen van sediment. Dit sediment wordt door de getijstrooming in het Plaatgat kustlangs afgevoerd en belandt in banken ten noorden en zuiden van de geul. De toevoer van sediment terug naar de kust is beperkt. De geul blokkeert ook eventuele toevoer vanaf de Gronden van het Plaatgat. .





Figuur 2-5: De bodem in 2019. De rode cirkels geven de ligging van de RSP weer en de resultaten van de 2019-toetsing van de kustlijn

### 2.3 Afweging tussen de locaties

Een analyse van de vier locaties en de processen onderliggend aan de erosie laat zien dat elk gebied unieke kenmerken en uitdagingen heeft. De Bollen van de Ooster wijkt het meeste af van de andere drie deelgebieden, omdat daar geen actieve buitendelta meer is. De erosie is er gerelateerd aan het opruimen van de oude buitendelta van de Grevelingen. Hierdoor is eenmalig de Bollen van de Ooster gevormd. De erosieproblematiek is gerelateerd aan de lokale beïnvloeding van de stroming en transporten ter plaatse van de kop van de Bollen van de Ooster. Recente bodemopnamen leren dat zich al kleine kortsluitgeulen door de Bollen van de Ooster vormen, waardoor deze bank mogelijk zijn stabiliteit verliest en kan opbreken. Als dat gebeurt zal ook de gerelateerde erosieproblematiek verdwijnen. Omdat er in 2021 al een strandsuppletie is gepland kiest RWS ervoor de natuurlijke ontwikkeling af te wachten. Hiermee valt de Bollen van de Ooster af als pilot voor een systeemsuppletie.

De kustlijnen van Zuidwest Texel, Ameland Noordwest en de Schiermonnikoog Noordwest zijn allen onderdeel van een actief zeegatsysteem. Voor alle drie de zeegaten geldt dat de eilandkop van het aanliggende eiland uitbouwt door aanlanding van banken vanaf de buitendelta. Deze bankaanlandingen houden de zandvoorraad van het eiland op peil. Het herverdelen van dit zand geeft op het aanlandingspunt een lange periode van erosie, terwijl in de aanliggende gebieden er dan juist een toevloed van sediment is. Hierdoor wisselen gebieden van erosie en aanzanding elkaar af. Deze gebieden migreren met toenemende mate van verheling met de kust. Afhankelijk van de balans tussen plaataanlanding en erosieprocessen kan de eilandkop groeien of krimpen.

Zuidwest Texel, Ameland Noordwest en de Schiermonnikoog Noordwest bevinden zich nu allen in een erosieve periode.

Bankaanlandingen vanaf de buitendelta van het Zeegat van Texel zijn sinds afsluiting van de Zuiderzee (in 1932) niet meer voorgekomen. Dit komt mede door de grote veranderingen die zijn opgetreden ten gevolge van de Afsluiting (Elias, 2006; Elias en van der Spek, 2017). Het bestrijden van de structurele erosie van Texel vergt altijd een strategie met voldoende sedimentaanbod. Dit kan worden gewaarborgd met de huidige suppletiestrategie, met regelmatig suppleren van de kustlijn. Een alternatief is het wegnemen van de erosieve processen door systeemsuppleties. Door geulprocessen in het Molengat te beïnvloeden, zou de kustlijnerosie kunnen reduceren. Deze locatie werd is dan ook geselecteerd voor de volgende stap (indicatieve ontwerpen).

De ontwikkeling van Ameland Noordwest en Schiermonnikoog Noordwest vertoont grote overeenkomsten. In beide zeegaten traden vrij recentelijk bankaanlandingen op, respectievelijk 1986 en 1991, en vindt sindsdien erosie plaats. Deze erosie is voor een belangrijk deel gerelateerd aan de bolle vorm van de eilandkop en de voorliggende geulen. Het getij dat door de geul propageert schuurt hier zowel tijdens eb als tijdens vloed, als een rasp, het zand af om het bolle gedeelte af te vlakken. Het zand wordt kustlangs afgevoerd naar de buitendelta. De toevoer van sediment terug naar de kust is beperkt, waardoor er structureel een zandtekort optreedt. Voldoende zandaanbod ontstaat alleen als er een nieuwe aanlandingsbank gevormd wordt en verheelt met de kust. Een systeemsuppletie kan de afvoer van sediment reduceren als deze bijvoorbeeld een voorliggende geul dichtzet of de toevoer van sediment vergroot. Dit kan bijvoorbeeld door het toepassen van slim gekozen suppleties op de buitendelta, waardoor een "semi-natuurlijk" proces van plaatanaanlandingen kan worden gestimuleerd. Beide locaties zijn in dit opzicht geschikt voor een pilot systeemsuppletie.

### 3 Keuze suppletieontwerpen voor nader onderzoek (Stap 2 en Stap 3)

Uitwerking van indicatieve suppletieontwerpen voor de drie resterende locaties gebeurde via een workshop met experts van zowel Rijkswaterstaat (WVL en Regionale Directies) en Deltares. De workshop had twee doelen: (i) per locatie indicatieve suppletieontwerpen (inclusief indicatieve suppletievolumes) te verkrijgen en (ii) het opstellen van hypothesen die in het vervolgonderzoek getoetst kunnen worden. De hypothesen zijn later uitgewerkt als kansen en risico's. Een uitgebreide uitwerking van deze workshop staat in Elias (2020b) en hoofdstuk 3.1 vat dit samen.

De suppletieontwerpen vormden de basis voor stap 3: een ontwerpessie intern Rijkswaterstaat. In deze sessie is een selectie gemaakt van de meest geschikte varianten, rekening houdend met de haalbaarheid en de 'maakbaarheid' (vanuit uitvoering). Dit leidde tot in vijf suppletieontwerpen: vier voor Zuidwest Texel en één voor Ameland Noordwest. De locatie Schiermonnikoog is daarbij afgefallen, de onderliggende erosieve processen en ontwerpen zijn vergelijkbaar met Ameland Noordwest. Het draagvlak voor het uitvoeren van een suppletie ligt bij Ameland Noordwest echter hoger, waardoor deze qua haalbaarheid tot uitvoering een grotere kans heeft.

Voor deze locaties zijn kustindicatoren gedefinieerd en toetsbare kansen en risico's per ontwerp geïdentificeerd. Deze suppletieontwerpen worden samengevat in H3.2.

#### 3.1 Overzicht van mogelijke suppletievarianten, samenvatting expertsessie

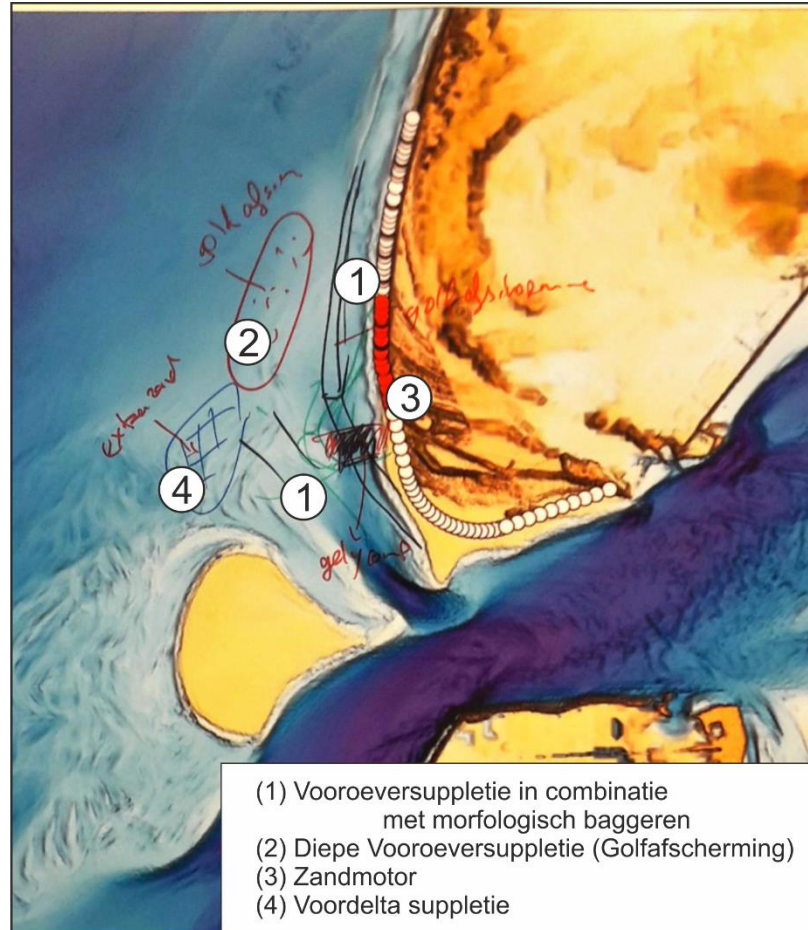
Per locatie zijn een aantal suppletieontwerpen uitgewerkt. Voor elke locatie is dit uitgewerkt en Figuur 3-1 (Texel Zuidwest) geeft een beeld van hoe dit op de workshop gebeurde. Een conclusie uit de workshop is dat vele verschillende suppletievarianten kunnen worden opgesteld, maar dat het basisidee erachter veelal gelijk is. De ontwerpen verschillen vooral in locatie op de buitendelta of variëren in grootte en volume. Het aantal unieke ontwerpen is beperkt. Uiteindelijk zijn voor de drie locaties elf unieke suppletieontwerpen geïdentificeerd, weergegeven in Tabel 3-1.

Tabel 3-1: Overzicht van de uitgewerkte suppletievarianten naar aanleiding van de expertsessie.

	<b>Texel Zuidwest</b>	<b>Ameland Noordwest</b>	<b>Schiermonnikoog</b>
1	Vooroeversuppletie langs de kust	Strandhaak "Friesche Zeegat"	Geulopvulling
2	Diepe vooroeversuppletie	Zandmotor	Zandmotor (geulafsluiting)
3	Zandmotor	Open strandhaak	Buitendeltasuppletie.
4	Buitendeltasuppletie	Buitendeltasuppletie.	

De elf suppletieontwerpen vallen in drie types: (1). zandmotor, (2) buitendelta suppletie en (3) gebiedsspecifieke varianten. Deze worden hieronder toegelicht.

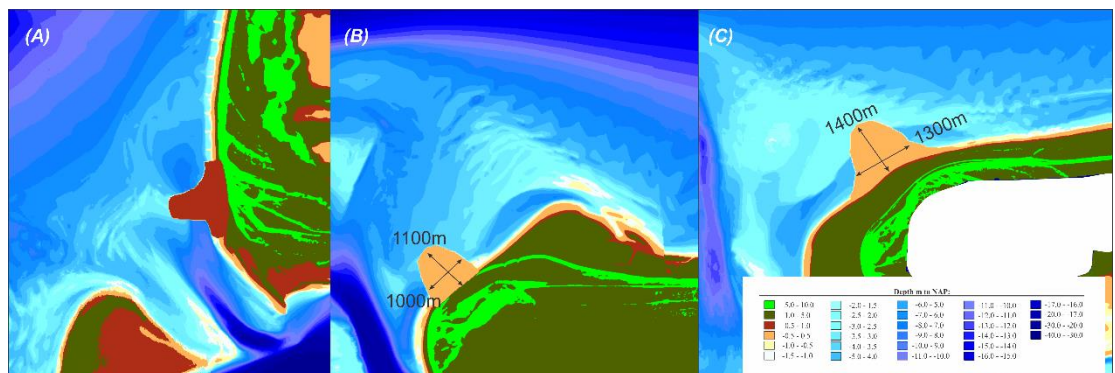




Figuur 3-1 : Samenvatting van de verschillende varianten ingetekend tijdens de workshop voor het Molengat (Texel).

### Zandmotor aanvullingen.

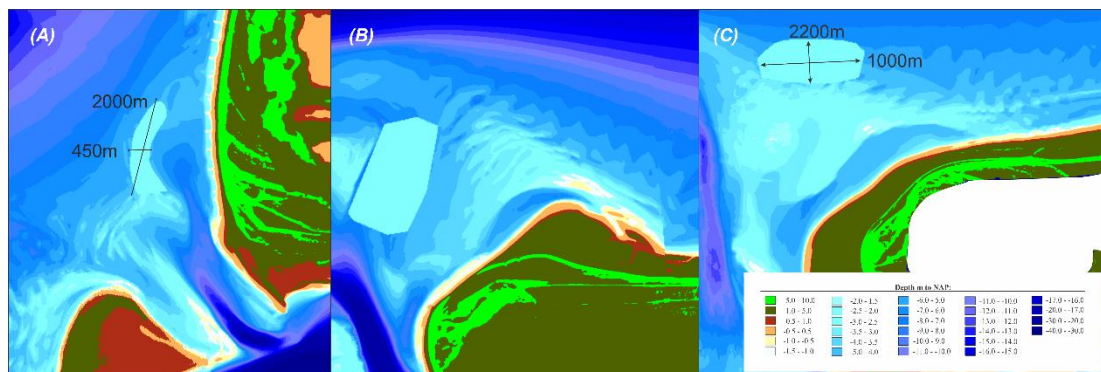
Deze varianten zijn geïnspireerd op de verdeling en verspreiding van banken zoals de Bornrif Strandhaak (Figuur 3-2). De vorm van die Strandhaak lijkt op 'de Zandmotor' in Zuid-Holland. Een zandmotor heeft als eerste doel het vergroten van de zandvoorraad van de kustzone, zodat niet alleen lokaal de kust sterk uitbouwt, maar het zand onder invloed van het getij en de golven kustlans verspreidt. Dat geeft voor lange tijd een impuls aan de kustlijnontwikkeling. Het tweede doel is door een aanleg dwars op de kust een zanddam in de geul te maken. Deze dam belemmert de getijstrooming door de geul. Dit reduceert de getijstrooming, waardoor een deel van de erosieprocessen verdwijnt.



Figuur 3-2: Voorbeelden van voorgestelde zandmotorvarianten voor Zuidwest Texel (A), Ameland Noordwest (B) en Schiermonnikoog Noordwest (C).

### Buitendeltasuppleties

Voor alle locaties werden suppleties op de voorliggende buitendelta voorgesteld (Figuur 3-3). De aanpak en uitvoering lijken op de buitendeltasuppletie die in het kader van Kustgenese 2 bij Ameland is aangebracht. Het achterliggende idee is dat door toename van de zandvoorraad van de buitendelta zich (versneld) aanlandingsbanken vormen. Onder invloed van de golven migreren deze banken landwaarts, verhelen met de kust en voeden dan als “zandmotor” de kustlijn voor langere tijd. Deze suppleties kunnen zowel ver zeewaarts op de buitendelta worden aangebracht als dichterbij de kust. De schets van de suppletie bij Zuidwest Texel ligt direct voor de kustlijn, zodat deze ook zorgt voor golfafscherming van de achterliggende kustlijn en zo de golfgedreven erosie reduceert.

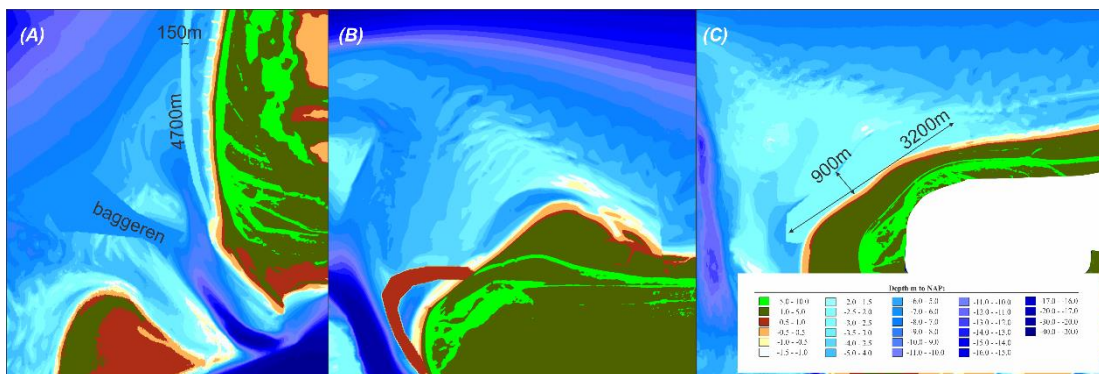


Figuur 3-3: Buitendeltasuppleties voor Zuidwest Texel (A), Ameland Noordwest (B) en Schiermonnikoog Noordwest (C).

### Gebiedsspecifieke varianten

Naast bovenstaande, meer generieke, uitwerkingen zijn ook gebiedsspecifieke varianten bedacht. Voor Zuidwest Texel is de Brekerbank suppletie (Figuur 3-4A) voorgesteld die eigenlijk een grote vooroeversuppletie is. De brekerbank aanwezig langs de ongestoorde eilandkust van Texel wordt door de suppletie verlengd tot De Hors. De verwachting is dat deze suppletie zich zal gedragen als een normale vooroeversuppletie, waarbij golfbreking op de suppletie voor golfafscherming zorgt van de achterliggende kustlijn. Ook wordt het meest noordelijke deel van het Molengat in twee delen gesplitst, waardoor de getijstrooming eigenlijk uit de kust wordt gedrukt. In dit opzicht is dit ook een soort geulwandsuppletie. Het reduceren van de invloed van het Molengat kan eventueel worden versterkt door strategisch baggeren van de ebschaar. Dit verlegt de uitstroom van het Molengat zeewaarts.

Verdringen van stroming in de aangrenzende geulen is ook het doel bij de gebiedsspecifieke varianten voor Ameland Noordwest en Schiermonnikoog. De variant voor Ameland Noordwest is qua volume ongeveer gelijk aan de zandmotorvariant. Door deze suppletie niet geheel te vullen maar als een soort ring aan te brengen wordt de geul afgesloten en wordt een groot deel van het erosiegebied afgeschermd tegen golfaanval (Figuur 3-4B). Het risico van deze suppletie is dat deze snel kan opbreken waardoor de getijgeul zich herstelt en er grote zandverliezen richting het Bordiep optreden. Ook bij Schiermonnikoog is het opvullen van de voorliggende geul voorgesteld (Figuur 3-4C). Deze suppletie elimineert de stroming in de geul volledig. Dit reduceert de erosie van de kustlijn en zorgt ervoor dat de aangrenzende banken kunnen verhelen met de kust. Nadelen van deze variant zijn dat grote sedimentvolumes nodig zijn en de kans dat, door de relatief diepe ligging, de geul zich opnieuw vormt.



Figuur 3-4: Voorbeelden van alternatieve suppletievarianten voor Zuidwest Texel (A), Ameland Noordwest (B) en Schiermonnikoog Noordwest (C).

## 3.2 Keuze en ontwerp van de suppletievarianten

### 3.2.1 Rekenontwerpen

Na overleg binnen het technisch team van Kustlijnzorg zijn de locaties Ameland Noordwest en Zuidwest Texel geselecteerd als meest kansrijk voor een pilot systeemsuppletie. Een ontwerpessie intern Rijkswaterstaat leidde tot een selectie van de meest geschikte varianten. Hierbij is rekening gehouden met de haalbaarheid van de varianten en de 'maakbaarheid' (vanuit uitvoering). Dit resulteerde in 5 suppletieontwerpen, vier ontwerpen voor Texel Zuidwest (Texel Brekerbank, Texel verondieping NUN, Texel Zandmotor I en Texel Zandmotor II) en één ontwerp voor Noordwest Ameland (Ameland Zandmotor). De eigenschappen van deze suppleties staan in Tabel 3-2.

Tabel 3-2: Overzicht van de eigenschappen van de vijf geselecteerde suppletievarianten.

Eigenschap	Texel Zuidwest				Ameland Noordwest
	Texel – Brekerbank (BB)	Texel – Verondieping NUN (NUN)	Texel – Zandmotor I (ZM I)	Texel – Zandmotor II (ZM II)	Ameland – Zandmotor (ZM)
Naam	Texel – Brekerbank (BB)	Texel – Verondieping NUN (NUN)	Texel – Zandmotor I (ZM I)	Texel – Zandmotor II (ZM II)	Ameland – Zandmotor (ZM)
Strand/vooroever	Vooroever	Vooroever	Strand-vooroever	Strand - Vooroever	Strand-vooroever
In situ volume suppletie [m <sup>3</sup> ]	1.550.000	2.280.000	3.800.000	8.900.000	9.100.000
Volume in modelbodem	1.772.000	2.819.000	3.494.000	8.829.000	9.275.000
Raai nummers: Van/Tot	860-1249	960-1148	840 – 1230	820 – 1033	100 – 420
Lengte suppletiegebied [m]	4300	1880	3900	2000	3200
Aanleghoogte [m tot NAP]	-4	-2.5	+3	+1	+2
Oppervlakte [m <sup>2</sup> ]	1.380.000	1.400.000	1.500.000	2.200.000	2.600.000
Extra strandbreedte [m]	0	0	tot 220	tot 870	200-600
Toename MKL positie[m]	0	km 1000-1100 +100 m	km 850-1200 +100 m	km 850-950 +500-600 m	km 100-400 +300 m

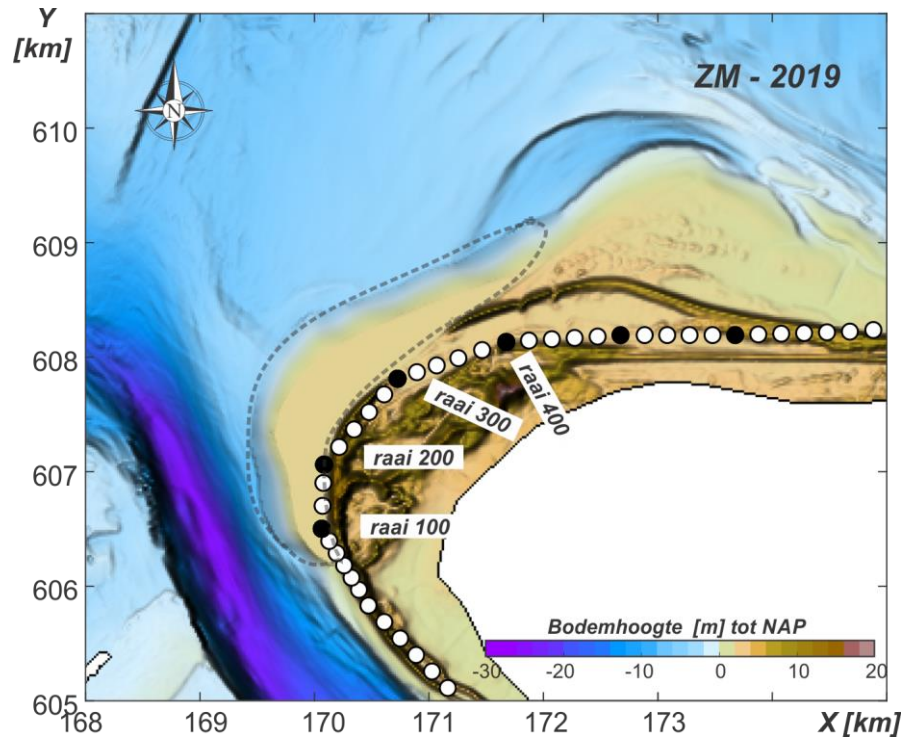
Deze rekenontwerpen vormen de basis voor het modelonderzoek (hoofdstuk 4). Uit de interne sessie van Rijkswaterstaat volgde niet alleen de technische aspecten van de ontwerpen, maar ook een lijst kansen en risico's.

### 3.2.2 Een zandmotor voor Ameland Noordwest.

De variant bij Ameland Noordwest is een gecombineerde strand-vooroeversuppletie, uitgevoerd als een zandmotor, tussen raaien 100 en 420 (Figuur 3-5). Feitelijk is het daarmee een vergrote versie van de suppletie Ameland Westkop die in 2019 is uitgevoerd. Die was mede bedoeld om het Oostgat



langs het meest erosieve gedeelte van de kust dicht te zetten. Beide suppleties pakken ook een groot deel van de eilandkop in waardoor er voor lange tijd voldoende zand aanwezig is.



Figuur 3-5: Een zandmotor suppletie bij Ameland Noordwest zoals geïmplementeerd in de bodem. De onderliggende bodem is gebaseerd op de 2019 Vaklodging. De suppletielocatie is aangegeven middels de gearceerde lijn.

Het volume van de suppletie geeft een grote bodemverstoring van de kust. Over een lengte van 3,2 km wordt de kustlijn zeewaarts verplaatst en het voorliggende Oostgat wordt dichtgezet. De vloedstroming moet dan over de voorliggende ondiepte stromen wat waarschijnlijk morfologische veranderingen geeft. Door verspreiding van de suppletievolumes oostwaarts kan er aanzanding richting de Bornrif Strandhaak optreden.

De grootste zeewaartse uitbouw vindt plaats tussen raai 200 en 350. Hier verplaatst de MKL meer dan 340 m zeewaarts. Tussen raai 100 en 200 ligt de verplaatsing tussen de 150 en 250 m. Door de aanleghoogte (+2 m NAP) neemt de droge strandbreedte, het strand tussen Gemiddeld Hoog Water (GHW) en de duinvoet (gedefinieerd op +3m NAP) sterk toe. Tussen raai 200 en 300 is die toename rond de 400 m. De aanleghoogte zorgt ervoor dat het intergetijdegebied initieel niet toeneemt. Ook heeft de suppletie geen directe invloed op de duinvoet. Op langere termijn gaat de suppletie wel bijdragen aan duinontwikkeling. Door de aanleghoogte ontstaat een relatief brede strandvlakte waarop wind-gedreven transporten optreden. De breedte lijkt hiervoor voldoende. De levensduur wordt een knelpunt als de vlakte niet lang genoeg aanwezig blijft voor significante duingroei. Tabel 3-3 vat de initiële effecten van de zandmotor suppletie Ameland samen.

Tabel 3-3: Een overzicht van de initiële effecten van de suppletievariant na aanleg op de kustindicatoren.

<b>Kustindicator</b>	<b>T1 (direct na aanleg)</b>
<i>Beïnvloeding dwarsprofiel</i>	dwarsprofiel wordt zeewaarts verlegt en ontgrondingskuil dichtgezet
<i>Beïnvloeding bathymetrie</i>	Ontgrondingskuil dichtgezet. Kustlijnoriëntatie verandert.
<i>Kustlijn – MKL</i>	+299 m
<i>Lengte beïnvloeding kustlijn (m)</i>	3,2 km
<i>Geschatte levensduur suppletie</i>	5-6 jaar
<i>Initiële bedekking</i>	2,6*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
<i>Strandbreedtes</i>	+200-500 m
<i>Intergetijdengebied</i>	geen verandering
<i>Duinontwikkeling</i>	geen verandering

### 3.2.3 Vier suppletie varianten voor Zuidwest Texel.

Figuur 3-6 geeft een overzicht van de vier rekenontwerpen voor Zuidwest Texel. Hieronder worden de belangrijkste kenmerken (zie Tabel 3-2) en effecten (zie Tabel 3-4) behandeld.

#### *Brekerbank (BB) suppletie (Figuur 3-6A)*

Langs de centrale eilandkust van Texel ligt al een doorgaande brekerbank. In deze variant verlengt een grote vooroeversuppletie deze brekerbank zuidwaarts, De bank sluit dan aan op de kust van Texel ter hoogte van raai 800. De suppletie doorkruist hierbij het noordelijke deel van het Molengat, maar sluit de geul niet geheel af. De totale lengte van de suppletie is bijna 4,5 km en heeft een volume van 1,8 miljoen m<sup>3</sup>. De aanleghoogte (ongeveer -4 m NAP) sluit aan op de hoogte van de natuurlijke brekerbank. Figuur 3-6 laat zien dat de suppletie qua vorm en ontwerp goed past bij de huidige morfologische situatie. Het zet het banksysteem dat iets noordelijker aanwezig is voort. Voordelen van deze variant zijn de mogelijke golfafschermende werking voor de achterliggende kustlijn, het uit de kust drukken van de stroming in het Molengat en de potentiële verhelming met de kust. Een risico van deze variant is een beperkte levensduur. In de huidige situatie is immers geen brekerbank aanwezig. De suppletie zou daardoor snel kunnen opbreken, waardoor golfafscherming slechts beperkt optreedt. Een nadeel is dat er bij aanleg slechts een beperkt effect op de MKL is, omdat het merendeel buiten de MKL-zone wordt gesuppleerd. Alleen tussen raai 950-1150 verplaatst de MKL 100m zeewaarts

#### *Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) suppletie (Figuur 3-6B)*

Deze variant is een onderwatersuppletie op het meest noordelijke deel van de NUN met een lengte van bijna 1,9 km en een volume van 2,8 miljoen m<sup>3</sup>. De aanleghoogte van -2,5 m NAP is een stuk hoger dan de BB variant. Deze hoogte is ongeveer gelijk aan het zuidelijker gelegen deel van de NUN, waar deze aansluit op de Noorderhaaks. Het ontwerp niet zo dat dat deze direct op de Noorderhaaks aansluit, maar vormt een duidelijk 'blok' in de bodem. Deze suppletie draagt initieel niet direct bij aan de positie van de MKL of de kustlijn. Hiervoor ligt deze te ver zeewaarts.

Er zijn twee voordelen van het creëren van een ondiepte op de NUN. Ten eerste beïnvloedt dit het golfklimaat: golfbreking schermt de achterliggende kustlijn af. Daarnaast is deze suppletie een extra zandbron die op termijn de kust kan voeden. Geïdentificeerde risico's zijn de mogelijke negatieve effecten op het Molengat en beïnvloeding van de omliggende banken.

#### *Zandmotor I (ZM I) suppletie (Figuur 3-6C)*

Deze variant is een kustlangse zandmotor tussen raaien 840 en 1230. Het heeft veel kenmerken van een strandsuppletie, maar volume (3,8 miljoen m<sup>3</sup>) en lengte (bijna 4 km) zijn veel groter. De aanleghoogte bedraagt ongeveer +3 m NAP op het strand. Deze variant brengt zand direct op de

kustlijn en heeft daarmee een groot effect op de MKL. Deze verplaatst over de lengte van de suppletie gemiddeld 150 m zeewaarts. Andere voordelen van deze variant zijn het uit de kust drukken van het Molengat en bevordering van duingroei. Een risico is dat de stroming in het Molengat negatief beïnvloed wordt.

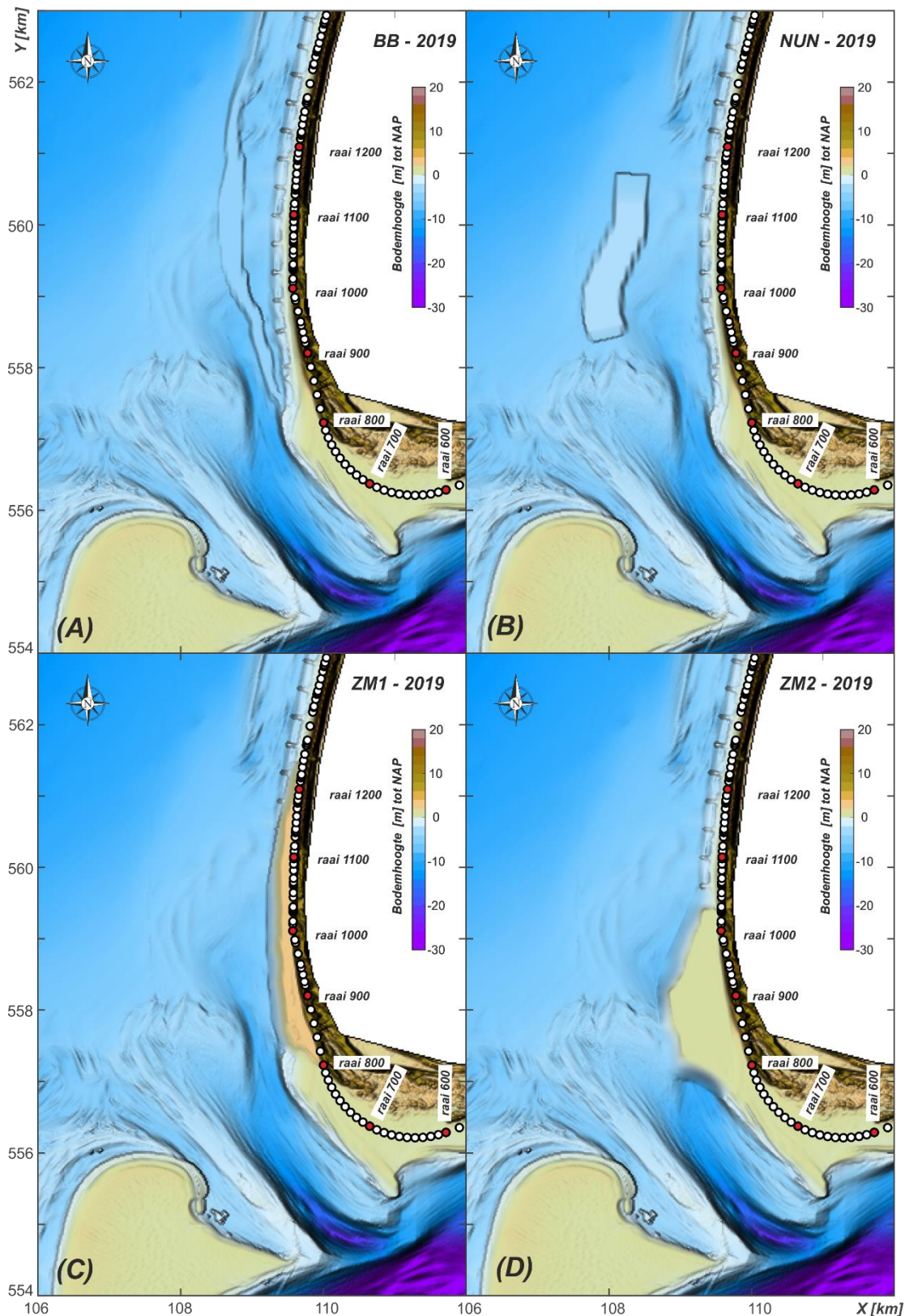
#### *Zandmotor II (ZMII) suppletie (Figuur 3-6D)*

Deze variant ligt haaks op de kust en lijkt qua vorm op 'de Zandmotor' in Zuid-Holland. De suppletie is ontworpen als een zanddam die verbinding maakt met het voorliggende ebschild. Dit ontwerp is zowel gericht op langdurig voeden van de aanliggende kustvakken als afsluiting van het Molengat. Hiervoor is een groot volume nodig: 8,9 miljoen m<sup>3</sup>.

De verwachting is dat het aangebrachte zand zowel naar het noorden als naar het zuiden verplaatst. Aan weerszijden van de zanddam ontstaan luwtegebieden waarin sediment wordt ingevangen. Dit draagt bij aan een langdurig behoud van zandvolumes in de kustzone. Het afsluiten van het Molengat verkleint de kustlangse stroming en neemt zo een bron van erosie weg. Na splitsing van het Molengat krijgt het zuidelijke deel een enkele uitstroom met de ebschaar zeewaarts van de zandmotor. Het initiële effect op de MKL is dat over een lengte van 500m de MKL gemiddeld 325m zeewaarts verplaatst.

Bovengenoemde voordelen zijn de lange-termijn voeding van de kust, het uit de kust drukken van het Molengat en het bevorderen van duingroei. Een risico van de variant is de beïnvloeding van de processen op de schaal van het zeegat. Het Molengat is immers een onderdeel van zeegat van Texel dat al vele decennia aanwezig is en afsluiting kan leiden tot veranderingen op de schaal van de buitendelta. Zulke veranderingen, bijv. de vorming van een nieuw Molengat, zijn moeilijk voorspelbaar. Overigens hoeft de vorming van een nieuw Molengat geen negatieve effecten te hebben. Het risico is de onvoorspelbaarheid.





Figuur 3-6: De vier suppletievarianten voor Texel Zuidwest samengevat in 1 figuur: (A) suppletieontwerp Brekerbank (BB), (B) suppletieontwerp Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN), (C): suppletieontwerp Zandmotor 1 (ZM I) en (D): suppletieontwerp Zandmotor 2 (ZM II).

Tabel 3-4: Een overzicht van de initiële effecten van de suppletievarianten voor Zuidwest Texel na aanleg op de kustindicatoren.

<b>BB - Kustindicator</b>	<b>T1 (direct na aanleg)</b>
<i>Beïnvloeding dwarsprofiel</i>	creëert een brekerbank in het profiel welke natuurlijk niet aanwezig zou zijn
<i>Beïnvloeding bathymetrie</i>	langgerekte brekerbank ontstaat op de vooroever
<i>Kustlijn – MKL</i>	+100 m tussen raai 1000 en 1100
<i>Lengte beïnvloeding kustlijn (m)</i>	0 m
<i>Geschatte levensduur suppletie</i>	geen schatting mogelijk op basis van de T0 en T1
<i>Initiële bedekking</i>	1,4*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
<i>Strandbreedtes</i>	geen verandering
<i>Intergetijdegebied</i>	geen verandering
<i>Duinontwikkeling</i>	geen verandering
<b>NUN - Kustindicator</b>	<b>T1 (direct na aanleg)</b>
<i>Beïnvloeding dwarsprofiel</i>	verhoging van de bestaande bank
<i>Beïnvloeding bathymetrie</i>	verhoging van bestaande bank
<i>Beïnvloeding kustlijn</i>	zeewaarts aangelegd
<i>Kustlijn – MKL</i>	0 m
<i>Lengte beïnvloeding kustlijn (m)</i>	0 m
<i>Geschatte levensduur suppletie</i>	geen schatting mogelijk op basis van T0 en T1
<i>Initiële bedekking</i>	1,5*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
<i>Strandbreedtes</i>	0 m
<i>Intergetijdegebied</i>	geen verandering
<i>Duinontwikkeling</i>	geen verandering
<b>ZMI - Kustindicator</b>	<b>T1 (direct na aanleg)</b>
<i>Beïnvloeding dwarsprofiel</i>	dwarsprofiel wordt zeewaarts
<i>Beïnvloeding bathymetrie</i>	geen significante beïnvloeding
<i>Beïnvloeding kustlijn</i>	raaien 850-1200
<i>Kustlijnen – MKL</i>	+100 m
<i>Lengte beïnvloeding kustlijn (m)</i>	3,9 km
<i>Geschatte levensduur suppletie</i>	7-8 jaar
<i>Initiële bedekking</i>	1,5*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
<i>Strandbreedtes</i>	tot +220 m
<i>Intergetijdegebied</i>	Initieel alleen zeewaartse verlegging
<i>Duinontwikkeling</i>	Initieel geen verandering
<b>ZM II - Kustindicator</b>	<b>T1 (direct na aanleg)</b>
<i>Beïnvloeding dwarsprofiel</i>	grote vormverandering dwarsprofiel; geul wordt dichtgezet
<i>Beïnvloeding bathymetrie</i>	Molengat geul per plaatse van de suppletie dichtgezet
<i>Beïnvloeding kustlijn</i>	raaien 850-900
<i>Kustlijn – MKL</i>	+500-600 m
<i>Lengte beïnvloeding kustlijn (m)</i>	2 km
<i>Geschatte levensduur suppletie</i>	>10 jaar
<i>Initiële bedekking</i>	2,2*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
<i>Strandbreedtes</i>	tot +870 m
<i>Intergetijdegebied</i>	grote toename door aanleghoogte
<i>Duinontwikkeling</i>	direct geen effect, maar indirect wel mogelijkheid tot duingroei

## 4 Onderzoek en evaluatie van ontwerpen (Stap 4)

### 4.1 Morfostatische modellering.

De evaluatie van de invloed van de suppletievarianten op de stromingen, golven, sediment transporten en erosietrends van de kust is gedaan met behulp van proces-gebaseerde modellering. Er zijn simulaties uitgevoerd met een model van de gehele Waddenzee in Delft3D Flexible Mesh (FM) voor stroming en sedimenttransport (Laan, 2019). Het model kreeg een optimalisatie voor het Zeegat van Ameland en voor het Zeegat van Texel waar de resolutie is vergroot naar ongeveer 15 m ter plaatse van de suppletielocaties. Deze hoge resolutie zorgt ervoor dat de suppleties in detail doorgerekend kunnen worden (Elias en Roelvink, 2021).

Het morfologisch getij en golfklimaat is voor beide zeegaten afzonderlijk afgeleid. Door simulaties uit te voeren voor de bodem zonder ( $T0$ ) en met suppletie ( $T1$ ) wordt inzicht verkregen in het effect van de suppletie op de stromingen, golven en sedimenttransporten. Bij deze *morfostatische* benadering wordt geen morfologische verandering van de suppletie berekend. Een inschatting en evaluatie van de toekomstige bodemligging is dan ook gebaseerd op expert judgement.

Als aanvulling op de morfostatische modellering is SedTRAILS gebruikt om de grootschalige effecten van de suppleties in kaart te brengen. Een analyse met SedTRAILS geeft meer inzicht op hoe een variant het morfologische gedrag op zeegatschaal kan beïnvloeden. Hieronder volgen de belangrijkste inzichten uit stap 4. Voor de volledige modelresultaten wordt verwezen naar Elias en Roelvink (2021).

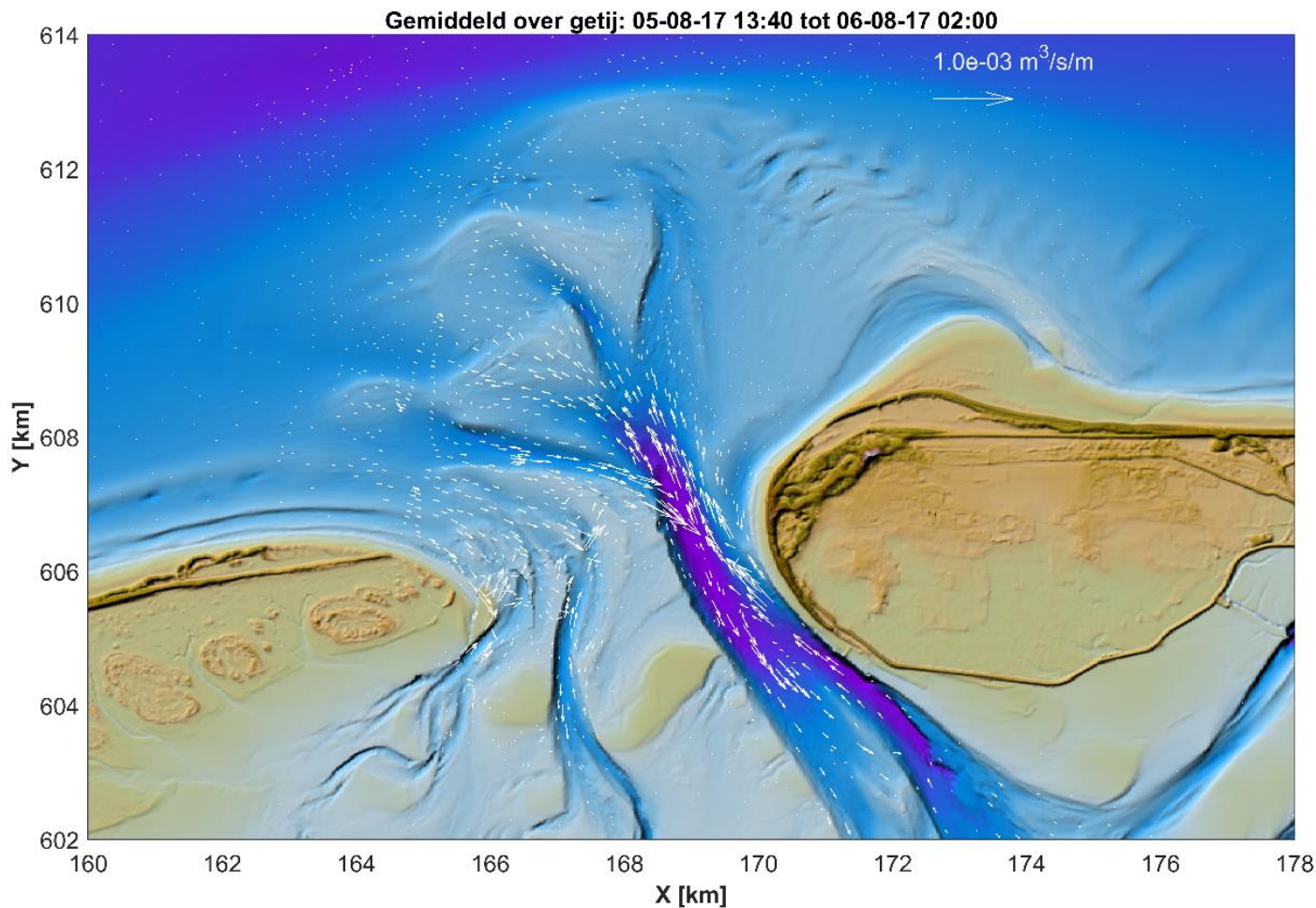
### 4.2 Modelresultaten voor zandmotor Ameland.

#### 4.2.1 Een evaluatie van de situatie zonder suppletie ( $T0$ )

Een getijsimulatie op de huidige bodem verschaft al veel inzicht in de transporthuishouding van het Zeegat van Ameland (Figuur 4-1). Duidelijk is dat op de grote schaal de transporten worden gedomineerd door het getij. Deze getijinvloed is het grootst in de geulen en aan de westzijde van de buitendelta. Op het Bornrif zijn de getijstromingen en transporten beperkter. Zowel de stromings- als sedimenttransportpatronen bevestigen dat het Oostgat eigenlijk geen stroomvoerende getijgeul is. De stromingen en sedimenttransporten zijn heel klein in het merendeel van het Oostgat. Alleen bij de overgang naar het Borndiep nemen ze toe. De residuele transportvectoren laten dit zien (zie Figuur 4-1 en Figuur 4-2, boven). Deze patronen verklaren al voor een deel waarom daar erosie plaatsvindt, structureel, bij elke getijcyclus. Dit tekort wordt niet aangevuld door de golven.

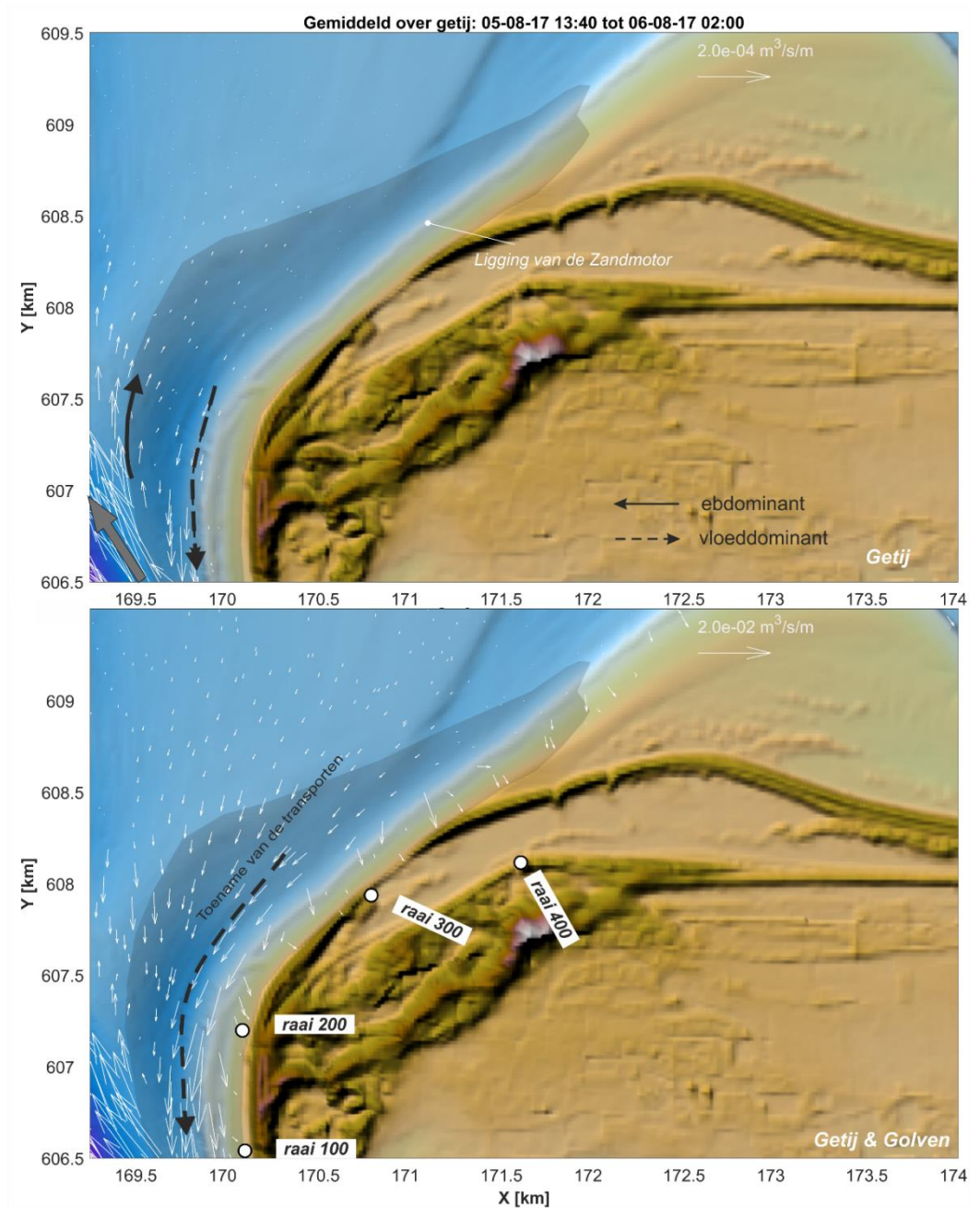
De simulatie inclusief golven (Figuur 4-2, onder) toont een gelijkwaardig beeld. Ook hier nemen de transporten toe richting het Borndiep. De vectoren zijn echter nog groter dan in de bovenste figuur. Dit betekent dat golven de erosie juist versterken. Hoge golven breken op de ondiepten van de buitendelta, maar de kleinere golven blijven ongestoord de kust bereiken. De golven breken op de kust, zorgen voor een golfgedreven transport en ze woelen zand op. Dit opgewoelde zand kan makkelijk door het getij kustlangs worden afgevoerd. Netto geeft dit zandtransport een verlies richting het Borndiep. Vanaf raai 400 vinden we een naar het zeegat gericht transport. De versnelling van de stroming om de Noordwestpunt van Ameland heen zorgt ervoor dat er een langgerekte ontgrondingskuil ontstaat.





*Figuur 4-1: Een overzicht van de getij-gemiddelde sedimenttransporten in het Zeegat van Ameland representatief voor de jaarlijkse condities weergegeven op de 2019 (T0) bodem (boven). Een toename van de grootte van de transportvector betekent in principe dat sediment door de stroming opgepikt wordt en verplaatst.*

Op basis van deze simulaties kan al een belangrijke conclusie worden getrokken. Op de huidige bodem zullen getij en golven een structurele erosie van de kust veroorzaken tussen raai 100 en 400. De sedimenttoevoer vanaf het Borndiep richting de kust lijkt beperkt. De vectoren staan zeewaarts richting Borndiep of het Bornrif op, maar niet richting kust. Er is netto sedimentafvoer, maar geen duidelijke toevoer. Zolang de voorliggende buitendelta een ondiep platform blijft en de geulpatronen niet veranderen, zullen ook deze structurele verliezen niet veranderen. Er is een grootschalige verandering van de morfologie nodig om dit te veranderen. Zo'n verandering is bijvoorbeeld de aanlanding van het Bornrif Bankje.



Figuur 4-2: Detail van de getijgemiddelde sedimenttransporten bij Ameland NW voor een simulatie met (boven) en zonder (beneden) golven. Het donkere gebied geeft de ligging van de suppletie aan. Let op dat de schaalvector voor beide figuren een andere grootte heeft.

#### 4.2.2 Invloed van de variant zandmotor Ameland

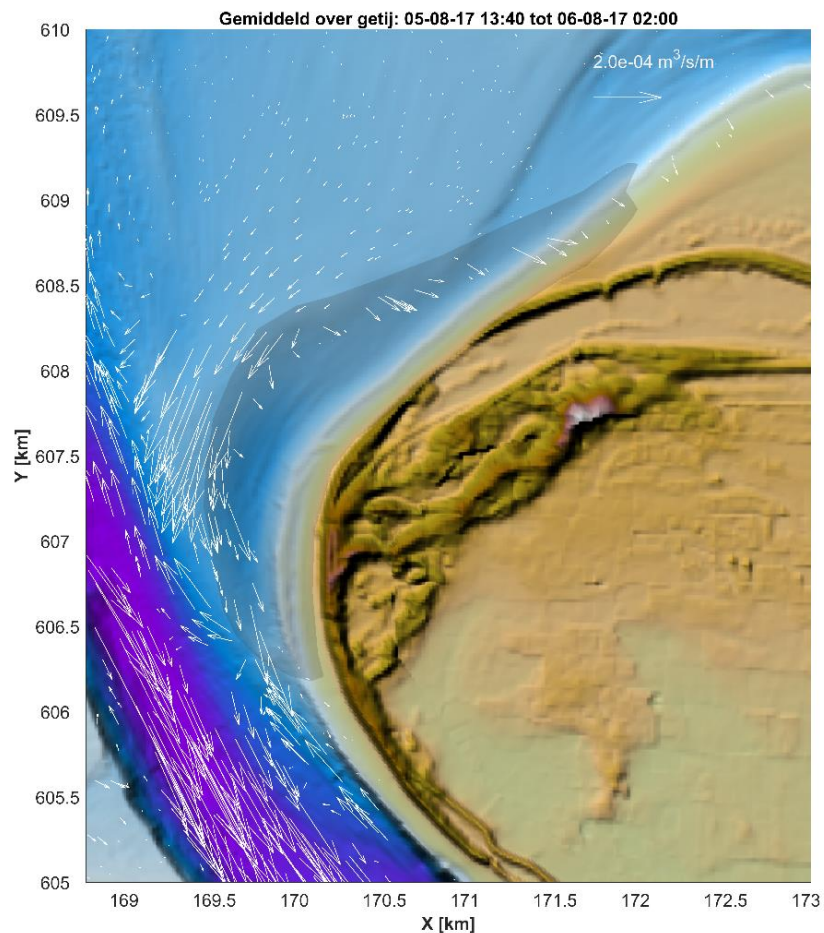
In 4.2.1 is al uiteengezet dat het Oostgat geen dominante stroomvoerende geul van het zeegat is, met zeer beperkte uitwisseling met het Borndiep. De aanleg van de ontworpen suppletie zal dan ook geen grootschalige veranderingen veroorzaken. De analyse richt zich dan ook op de lokale veranderingen in transporten ter plaatse van de zandmotor. Hiervoor zijn de residuele, jaarlijks-representatieve, sedimenttransportpatronen gebruikt (Figuur 4-3). Ter plaatse van de suppletie reduceert het sedimenttransport naar nul. Deze vectoren zijn zeewaarts verplaatst. Net als in de T0 nemen de vectoren richting het Borndiep sterk toe en zijn ook groter dan in de T0. Dit is volgens verwachting omdat het Borndiep bijna haaks op de suppletie staat. De vloedstroming vanaf het Bornrif moet om de suppletie heen het Borndiep in draaien. Hier vindt dan een contractie van de stroomlijnen plaats waardoor de stromingen versnellen en de transporten toenemen. Dit proces is hetzelfde voor en na aanleg van de suppletie. Dat de transportvectoren richting het Borndiep groter worden is ook verklaarbaar. Op de schaal van de buitendelta is de suppletie nog steeds klein en heeft geen invloed op de grootschalige waterbeweging. Het totale volume water wat zich tijdens vloed over het Bornrif en langs de kust beweegt verandert niet, maar de waterdiepte zeewaarts van het Oostgat is veel kleiner dan in het Oostgat. Met een gelijkblijvende forcering moeten de snelheden hier hoger worden en zal het sedimenttransport (functie van de snelheid) ook toenemen.

De invloed van de suppletie op de golven is beperkt. Aangezien ze langs de kustlijn is aangebracht blijft golfbreking onverminderd optreden. Deze breking is voor en na suppletie vrijwel gelijk. Het enige wezenlijke verschil is de kustlijn oriëntatie. Deze ligt na suppletie meer Zuidwestelijk gericht. Aangezien de transportvectorrichtingen voor en na suppletie beide richting het Borndiep zijn gericht volgt daaruit dat de veranderde oriëntatie van de kustlijn geen wezenlijke verandering in de transporten geeft.

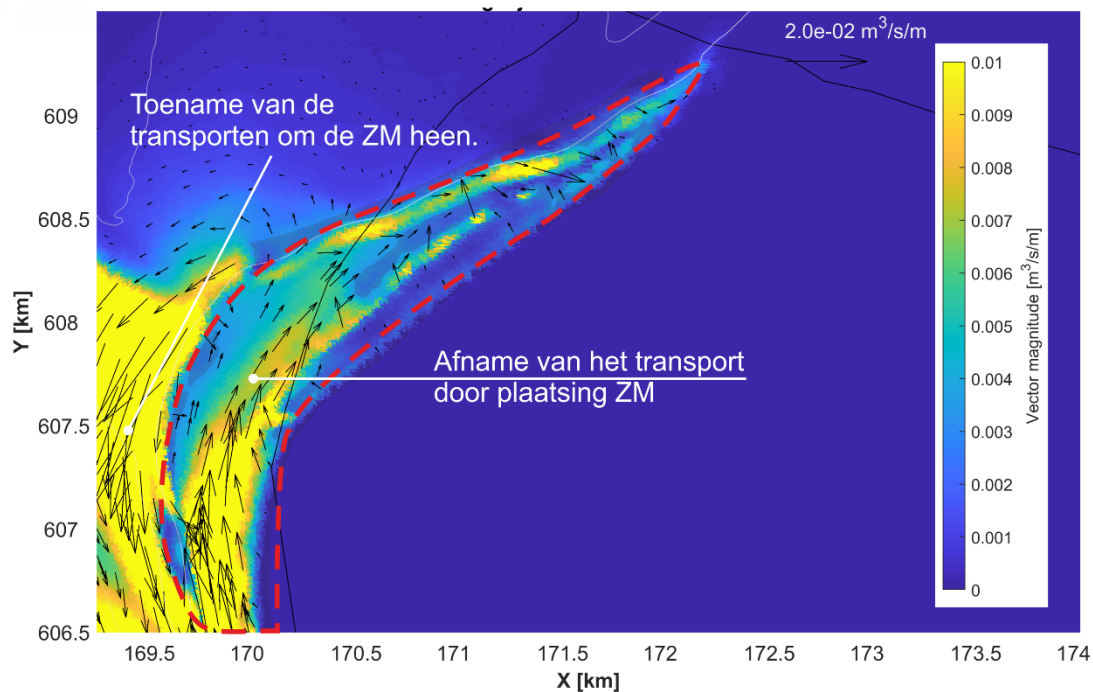
De conclusie is dat afsluiting van het Oostgat door de suppletie de erosieve druk op de kust niet weghaalt, maar dat deze zeewaarts verschuift met de suppletie. Er zal aanzienlijke erosie aan de kop van de zandmotor optreden en een nieuwe ontgrondingskuil komen. De transporten zijn voornamelijk westelijk, richting het Borndiep, gericht. Transporten in oostelijke richting zijn nihil.

De modelresultaten worden in Tabel 4-1 samengevat in termen van indicatoren, kansen en risico's.





Figuur 4-3: Residueel getij-gemiddeld sedimenttransport, representatief voor de jaarlijkse condities ter hoogte van Ameland NW.



Figuur 4-4 Vershil in jaarlijks representatief sediment transport tussen de T0 en ZM variant voor het zeegat ter hoogte van Ameland NW.

Tabel 4-1: Samenvatting van de effecten van de suppletie in termen van kustindicatoren, kansen en risico's.

<b>Kustindicatoren direct beïnvloed door de aanleg</b>	
<b>Beïnvloeding dwarsprofiel</b>	Dwarsprofiel wordt zeewaarts verlegd en ontgrondingskuil wordt dichtgezet
<b>Beïnvloeding bathymetrie</b>	Ontgrondingskuil wordt dichtgezet. Kustlijnoriëntatie verandert.
<b>Beïnvloeding kustlijn</b>	Zeewaartse uitbouw over 3,2 km (GLW tot 730m; GHW tot 600m)
<b>Kustlijnen – MKL</b>	+299 m
<b>Lengte beïnvloeding (m)</b>	3,2 km
<b>Geschatte levensduur suppletie</b>	5-6 jaar
<b>Initiële bedekking</b>	2,6*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
<b>Strandbreedtes</b>	+200-500 m
<b>Intergetijdegebied</b>	geen verandering
<b>Duinontwikkeling</b>	geen verandering
<b>Kustindicatoren beïnvloed door de werking van de suppletie</b>	
<b>Erosietrends</b>	Initieel een vergroting van de transporten aan de kop van de suppletie. Zandverliezen richting het Borndiep
<b>Golfbelasting</b>	Geen verschil. Surfzone wordt zeewaarts verlegt door de suppletie, maar de golfbelasting verandert niet.
<b>Stroomsnelheid</b>	Vergroting van de stroming aan de kop van de suppletie. Overige invloed beperkt.
<b>Efficiëntie suppletie</b>	Een toename van de sedimentverliezen uit het kustvak wordt verwacht. De sedimenttransporten aan de kop van de suppletie nemen toe.
<b>Kansen</b>	
<b>Directe voeding kust</b>	Initieel een vergroting van de transporten aan de kop van de suppletie. Zandverliezen richting het Borndiep
<b>Vergroten zandvolumes kustzone</b>	Geen verschil. Surfzone wordt zeewaarts verlegt door de suppletie, maar de golfbelasting verandert niet.
<b>Reduceren van kustlangse getij-erosieprocessen</b>	Vergroting van de stroming aan de kop van de suppletie. Overige invloed beperkt.
<b>Bevorderen van duingroei</b>	Een toename van de sedimentverliezen uit het kustvak wordt verwacht. De sedimenttransporten aan de kop van de suppletie nemen toe.
<b>(vragen m.b.t.) Risico's</b>	
<b>Kan de vloedstroming omgeleid worden door deze ingreep?</b>	De ontgrondingskuil wordt dichtgezet en de vloedstroming zeewaarts geleid om de suppletie heen. Er is echter geen afname van de (vloed)stromingen en erosieve processen te verwachten.
<b>Wat is de effectiviteit van de suppleties op gebieden</b>	De suppletie neemt de erosieve processen niet weg. Het is de verwachting dat initieel de erosie veel hoger zal zijn dan in de T0 situatie. In dat opzicht is de suppletie niet effectiever dan de huidige suppleties.
<b>Leidt deze ingreep tot onverwachte effecten in het zeegatsysteem?</b>	Geen grootschalige beïnvloeding wordt geobserveerd in de modelresultaten. Grootschalige morfologische effecten zijn dan ook niet te verwachten.
<b>Gevaar voor recreanten.</b>	De stromingen om de suppletie heen zullen toenemen. In dat opzicht kan dit gevaar voor recreatie opleveren.

### 4.2.3 Een evaluatie van de zandmotor voor Ameland Noordwest

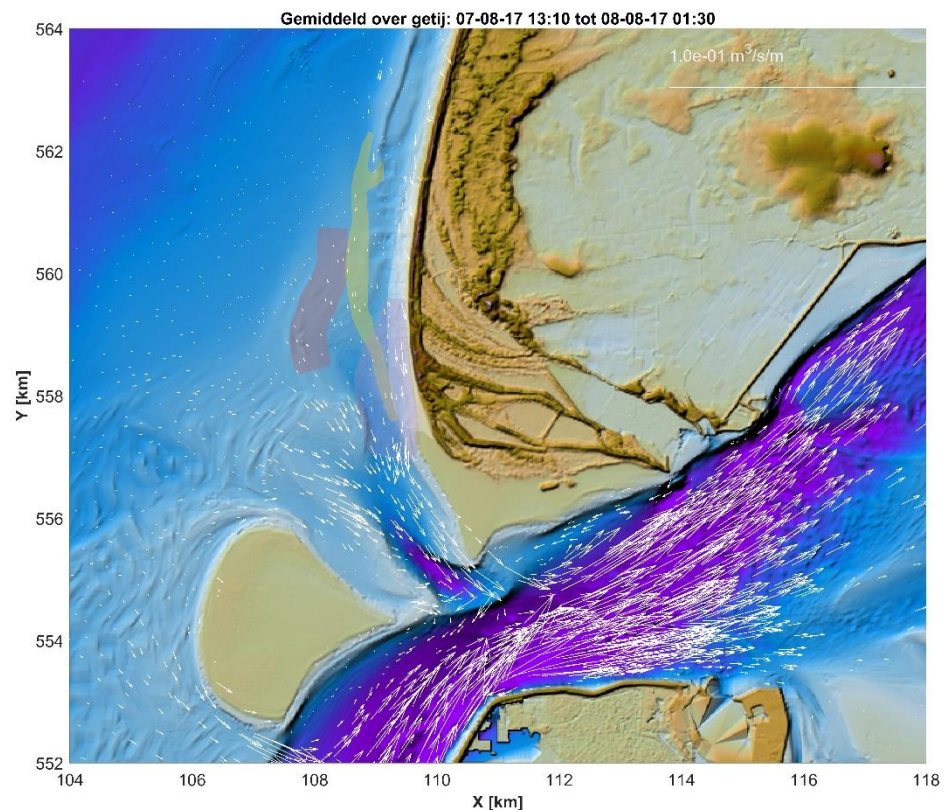
Tabel 4-1 vat de resultaten voor de zandmotor Ameland Noordwest samen die in de vorige sectie zijn uiteengezet. Een belangrijke conclusie was dat de suppletie de processen op de buitendelta en langs de kust van Ameland niet verandert en feitelijk geen systeemsuppletie is. Het extra aanbod aan zand door erosie van de suppletie is nog steeds klein ten opzichte van de natuurlijke ontwikkelingen.

De suppletie draagt wel rechtstreeks bij aan kustlijnhandhaving door 9 miljoen m<sup>3</sup> zand op de kustlijn aan te brengen en deze zeewaarts verplaatst. Het ontwerp kan wel interessant zijn uit oogpunt efficiëntie (in vergelijking met frequent aanbrengen van strandsuppleties). Het extra zand dat de suppletie in het systeem brengt kan op langere tijdschalen bijdragen tot bankaanlandingen.

Een indicator voor efficiëntie is de levensduur. Met behulp van de modelinformatie en de in het verleden geobserveerde trends wordt de levensduur van de suppletie geschat op vijf tot zes jaar. Dit wil niet zeggen dat de gehele suppletie na vijf jaar verdwenen is, maar dat tussen raai 100-200 de MKL dan rond de oorspronkelijke positie ligt.

## 4.3 Modelresultaten voor Zuidwest Texel

### 4.3.1 Evaluatie van de situatie zonder suppletie (T0)

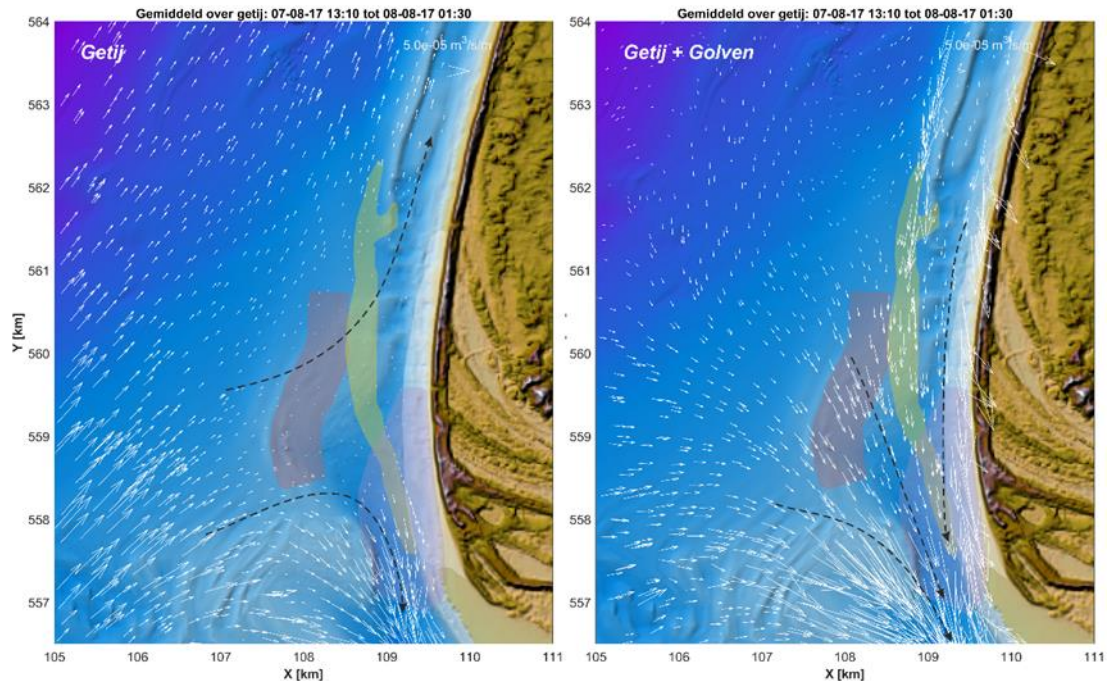


*Figuur 4-5: Een overzicht van de getij-gemiddelde sedimenttransporten in het Zeegat van Texel representatief voor de jaarlijkse condities weergegeven op de 2019 (T0) bodem.*

Het transport in het Molengat is beperkt ten opzichte van de grote transporten in het Marsdiep (Figuur 4-5). In het noordelijke deel van de buitendelta is een duidelijke tweedeling te observeren (Figuur 4-6, links). Transporten op diep water en ten noorden van km 561 zijn noordwaarts gericht. Transporten op de NUN buigen landwaarts. Ten zuiden van km 559 zijn de transporten in het Molengat en langs de kust zuidelijk gericht. Met uitzondering van de ZM II suppletie en de zuidelijke



punt van de BB suppletie liggen de varianten net in het overgangsgebied, waar de netto sedimenttransporten zeer klein zijn. Na toevoeging van golven in het model blijken de residuele transporten sterk vergroot te zijn (Figuur 4-6, rechts). Golfbreking en -dissipatie draagt rechtstreeks bij aan brandingsstromen en transporten en indirect zorgen golven ervoor dat er meer sediment omgewoeld wordt, dat vervolgens verplaatst met de getijstromingen. De verschillen zijn vooral zichtbaar op de ondiepe bankgebieden van de buitendelta. Met name langs de noord- en zuidkant van de Noorderhaaks worden duidelijke transporten zichtbaar, maar ook langs de eilandkust is er nu een transport op de brekerbank en langs de kust (Figuur 4-6, rechts). Ook deze transporten zijn veel kleiner dan de transporten in het zeegat.



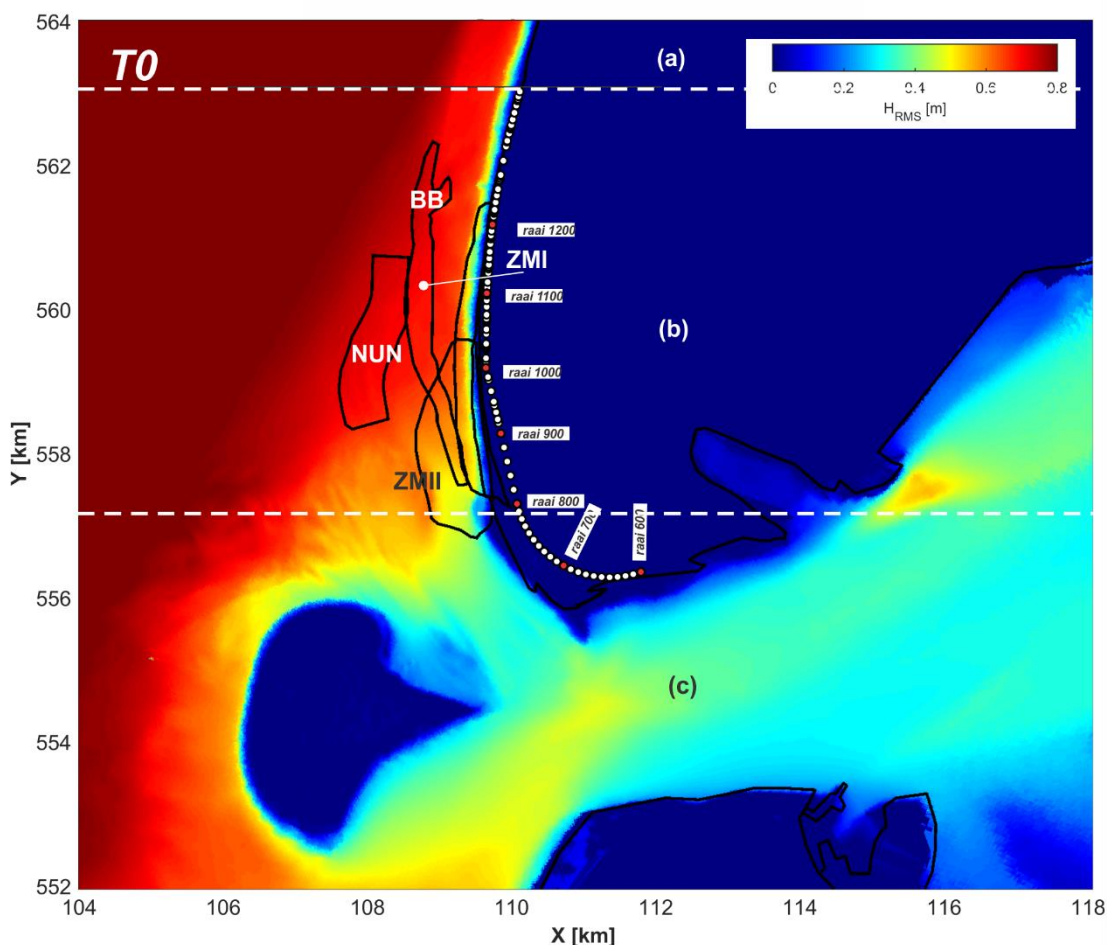
Figuur 4-6: Een overzicht van de getij-gemiddelde sedimenttransporten langs de kust van Zuidwest Texel voor getij (links) en voor de jaarlijks representatieve condities (rechts).

De ondiepten van de buitendelta vormen een natuurlijke golfbreker voor de achterliggende kust. Deze golfbrekende werking is vooral afhankelijk van de hoogte van de buitendelta. Zo zal het centrale deel van de Noorderhaaks, dat geheel boven water ligt, eenzelfde bufferende werking op golven hebben. Er vindt aan de zeezijde golfbreking plaats zoals bij een normale kust. Op de diepere delen van de buitendelta zal golfbreking alleen plaatsvinden tijdens stormen. Onder normale omstandigheden kunnen de golven dan gewoon richting de kust propageren. Figuur 4-7 geeft een ruimtelijk beeld van de jaarlijks-gemiddelde golfhoogte op de buitendelta. Deze figuur is verkregen door de getijgemiddelde golfhoogte van de 18 golfcondities gewogen bij elkaar op te tellen. Op basis van de geobserveerde golfhoogte kan de buitendelta in een aantal delen worden opgedeeld (zie wit gearceerde lijnen in Figuur 4-7).

- a) Ten noorden van km 563 (raai 1400) propageren de golven vrijwel ongestoord richting de kust. Golfbreking vindt vooral plaats op de voorliggende brekerbank. Er is een relatief smalle surfzone (ongeveer 1 km) is aanwezig.
- b) Tussen km 558 en 563 (raai 900-1300) ligt een overgangszone. De vooroever is hier ondieper dan langs de ongestoorde kustlijn van Texel (gebied a). In zuidelijke richting nemen de buitendeltabanken (NUN) in hoogte en omvang toe. Golfbreking op de ondiepte van de NUN resulteert in een brede zone van goldissipatie en afname in golfhoogte. De breedte van deze zone neemt toe van ongeveer 1 km in het noorden naar 5 km in het zuiden, bij de aansluiting van de NUN op de Noorderhaaks.

- c) Ten zuiden van km 558 (raai 900) breken de golven rechtstreeks op de ondiepten van de buitendelta (de Noorderhaaks). Hier vormt de surfzone zich niet langs de kust maar eigenlijk om de Noorderhaaks heen, die de achterliggende kustzone afschermt van de golven. Dit effect is met name zichtbaar zuidelijk van raai 800. De Noorderhaaks zorgt er ook voor dat de golven vrijwel niet doordringen in het bekken. In het Breewijd is nog een wat hogere golfhoogte zichtbaar. Dit komt door de geulen Schulpengat en Nieuwe Schulpengat waar golven uit zuidelijke en zuidwestelijke richting kunnen doordringen. In het Marsdiep is de golfhoogte over het algemeen beperkt ( $< 0.3\text{m}$ ).

In Figuur 4-7 zijn ook de suppletieontwerpen, met zwarte polygonen, aangegeven. Met uitzondering van de ZM II suppletie liggen de suppletieontwerpen net buiten de directe invloedssfeer van de buitendelta. Golfbreking en afscherming door de Noorderhaaks heeft daarom alleen een direct effect op de ZM II suppletie.



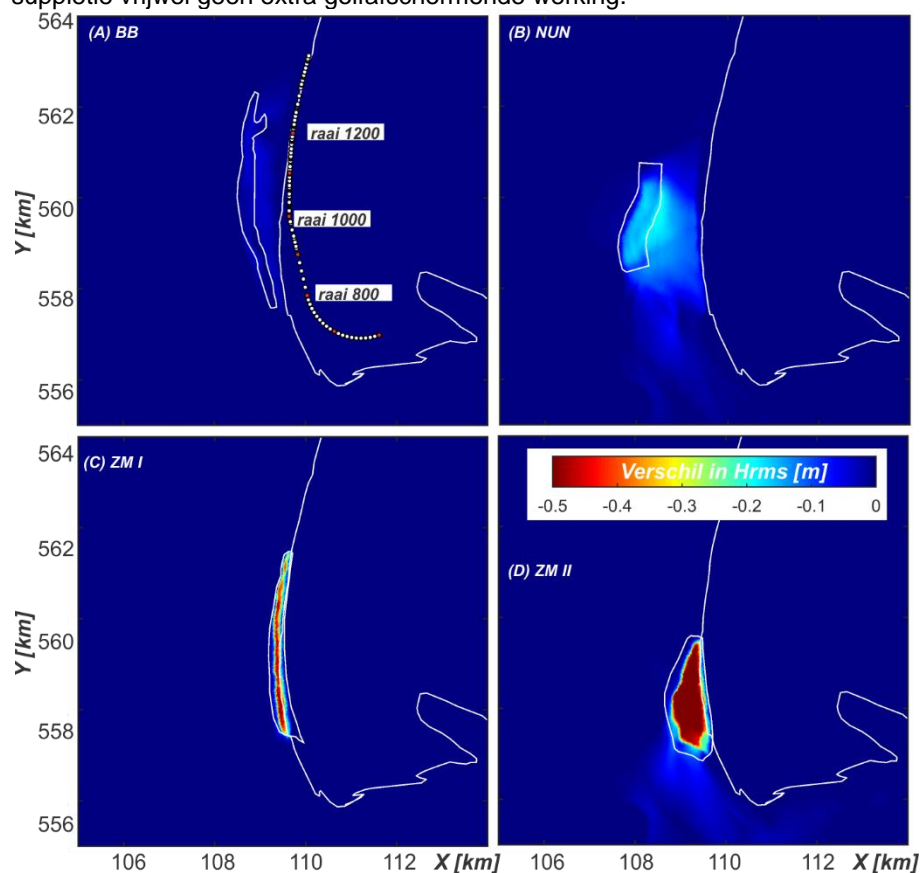
Figuur 4-7: Overzicht van het jaarlijks-gemiddelde golfhoogte bij de bodem van 2019. Polygonen geven de ligging van de verschillende suppletievarianten weer.

#### 4.3.2 Invloed van de varianten op de golven

De beïnvloeding van de golven wordt sterk bepaald door vorm en positie van een suppletie. Bij de varianten NUN en BB zal er golfbreking ter plaatse van de suppletie plaatsvinden. Dit schermt de achterliggende kustzone af (Figuur 4-8).

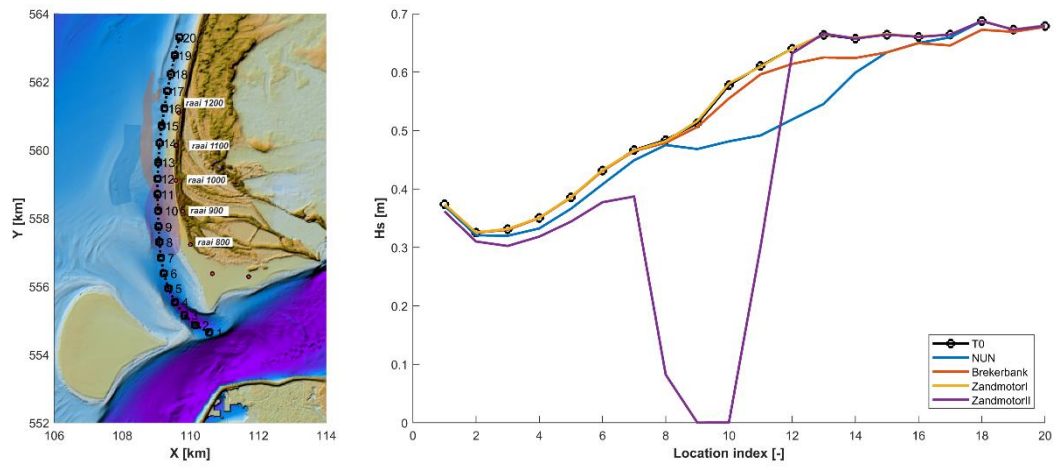
De invloed van een suppletie op de golven is verkregen door de verschillen in de jaarlijks gemiddelde golfhoogte te bepalen. Dit is vervolgens (Figuur 4-9) uitgezet voor een kustlangse raai die de geuligging van het Molengat volgt en zich dan tussen de brekerbank en de kust in noordelijke richting uitstrekt. Op basis van deze figuur is geconcludeerd dat:

- golfafscherming van de kust door de BB variant beperkt is. De kruinhoogte van de suppletie ligt met -4m NAP relatief diep. Alleen bij hoge golven vindt er golfbreking op de suppletie plaats, maar deze condities komen beperkt voor. Jaarlijks gemiddeld geeft dit slechts een zeer beperkte reductie (< 5%) van de golfhoogte langs de kustlijn. Deze reductie is het grootst tussen raai 1000 en 1200.
- de NUN variant enige reductie van de golfhoogte geeft. Tussen raai 800 en raai 1200 is deze afname het grootst, met een gemiddelde waarde tussen de 10 en 20%. Ten zuiden van raai 800 is er al veel golfafscherming, door de Noorderhaaks. Feitelijk zorgt de NUN variant ervoor dat de golfafschermende werking van de buitendelta in noordelijke richting wordt verlengd. In dit opzicht is deze variant dus een efficiënte inzet van zand voor het afschermen van de achterliggende kustlijn.
- de golfbeïnvloeding door de ZM I en ZM II suppletie beperkt is. Bij de ZM I suppletie wordt de surfzone zeewaarts verlegt maar deze verandert verder niet in grootte. De ZM II suppletie steekt ver zeewaarts uit. De Noorderhaaks en de voorliggende ondiepten van de NUN schermen de ZM II suppletie al efficiënt af van de golven, hierdoor geeft deze suppletie vrijwel geen extra golfafschermende werking.



Figuur 4-8: Beïnvloeding van het jaarlijks-gemiddelde golfklimaat door de verschillende suppletievarianten door het verschil tussen  $T1 - T0$  golfhoogte weer te geven. Omdat de ZMI en ZMII een kruinhoogte boven NAP hebben treedt hier een grote reductie van de golfhoogte op de locatie waar de suppletie is aangelegd. Dit is te zien in de rode vlakken van deelfiguur C en D.



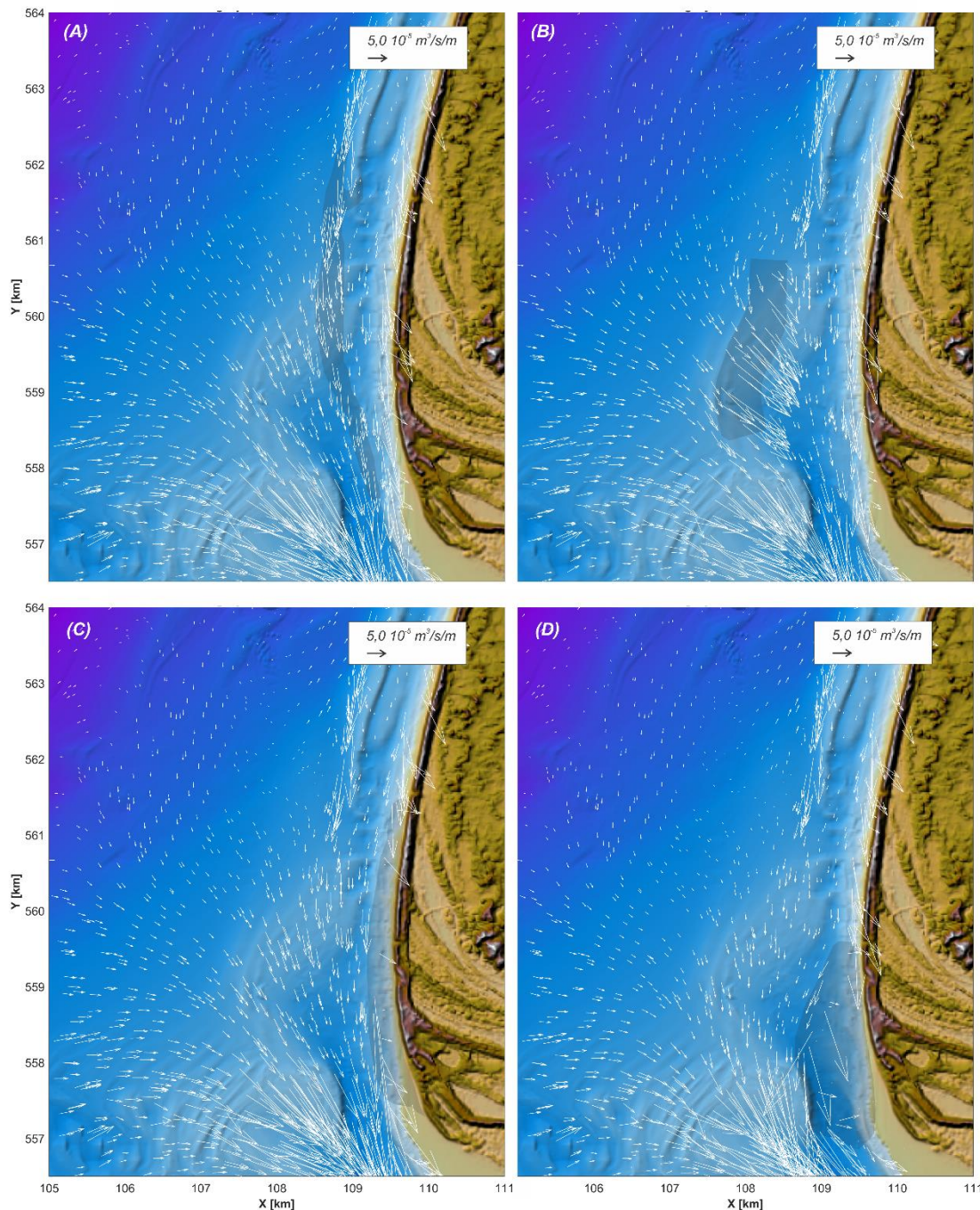


Figuur 4-9: Beïnvloeding van het jaarlijks-gemiddelde golfhoogte door de verschillende suppletievarianten.

### 4.3.3 Invloed van de varianten op sedimenttransporten

#### Algemeen

Figuur 4-10 vat de invloed van de varianten op de sedimenttransporten (inclusief getij en golven) samen. De residuele transporten op de Noordzee zijn klein t.o.v. de transporten in de kustzone. Golven maken hier sediment beschikbaar dat met de getijstromingen wordt getransporteerd. Over het algemeen zijn die transporten landwaarts en zuidwaarts (richting het zeegat) gericht. Ten zuiden van raai 900 (km 558 in Figuur 4-10) zijn de transporten veel groter dan ten noorden hiervan. Met uitzondering van de situatie na aanleg van ZM II overheersen de zuidwaartse transporten in het Molengat. Aanleg van de BB of de NUN suppletie genereert extra transporten (door golven) op de suppletielocatie.



Figuur 4-10: Overzicht van de getijgemiddelde transportvectoren voor de jaarlijks representatieve condities, voor suppletievariant (A) Brekerbank, (B) Noordelijke uitlopers van de Noorderhaaks, (C) Zandmotor I en (D) Zandmotor II. De ligging van de suppleties is geaccentueerd met een grijs vlak.

### ***Brekerbank (BB) suppletie***

Deze variant heeft een verwaarloosbare invloed op de getijgedreven transporten. Alleen via de invloed van golven zijn er lokale effecten waar te nemen (Figuur 4-11A), vooral zeewaarts van raai 1200. Golfdissipatie op de suppletie genereert ter plekke langstransporten. Er is geen duidelijke landwaartse component. Daarnaast is een kleine verandering te zien in de transporten langs de kust, tussen raai 800 en 1100. De verschillen richting het zeegat zijn echter beperkt. Een reductie van de kustlijnerosie lijkt niet op te treden.

### ***Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) suppletie***

De invloed van deze variant op de getijgedreven transporten is beperkt (zie Figuur 4-11B), maar er is wel een duidelijke invloed op de jaargemiddelde transporten. Het grootschalige transportbeeld verandert niet. De transporten aan de zeezijde van de suppletie blijven onveranderd. Ook op de buitendelta blijven de patronen gelijk, met een netto transport dat landwaarts gericht is op de NUN en richting het zeegat is gericht in het Molengat. De ondiepe aanleghoogte leidt tot extra golfbreking en dissipatie, wat resulteert in grote residuele transporten. Deze transporten staan netto landwaarts en richting het Molengat. We zien ook indirecte effecten op de achterliggende kustlijn. Tussen raai 800 en 900 is er reductie van transporten. Er zijn kleinere effecten zichtbaar op het ebschild net ten zuiden van de suppletielocatie en langs de kustlijn van Texel ten noorden van de suppletie. Er is een kleine invloed op de uitwisseling tussen Molengat en Marsdiep.

De varianten BB en NUN geven eigenlijk een vergelijkbare respons. In beide varianten neemt door aanleg van de suppletie de golfdissipatie op de locatie van de suppletie toe. Het grote verschil tussen de twee varianten is de aanleghoogte. Doordat de NUN veel hoger is ontworpen is er veel meer golfafscherming en meer invloed op het systeem.

### ***Zandmotor I (ZM I) suppletie***

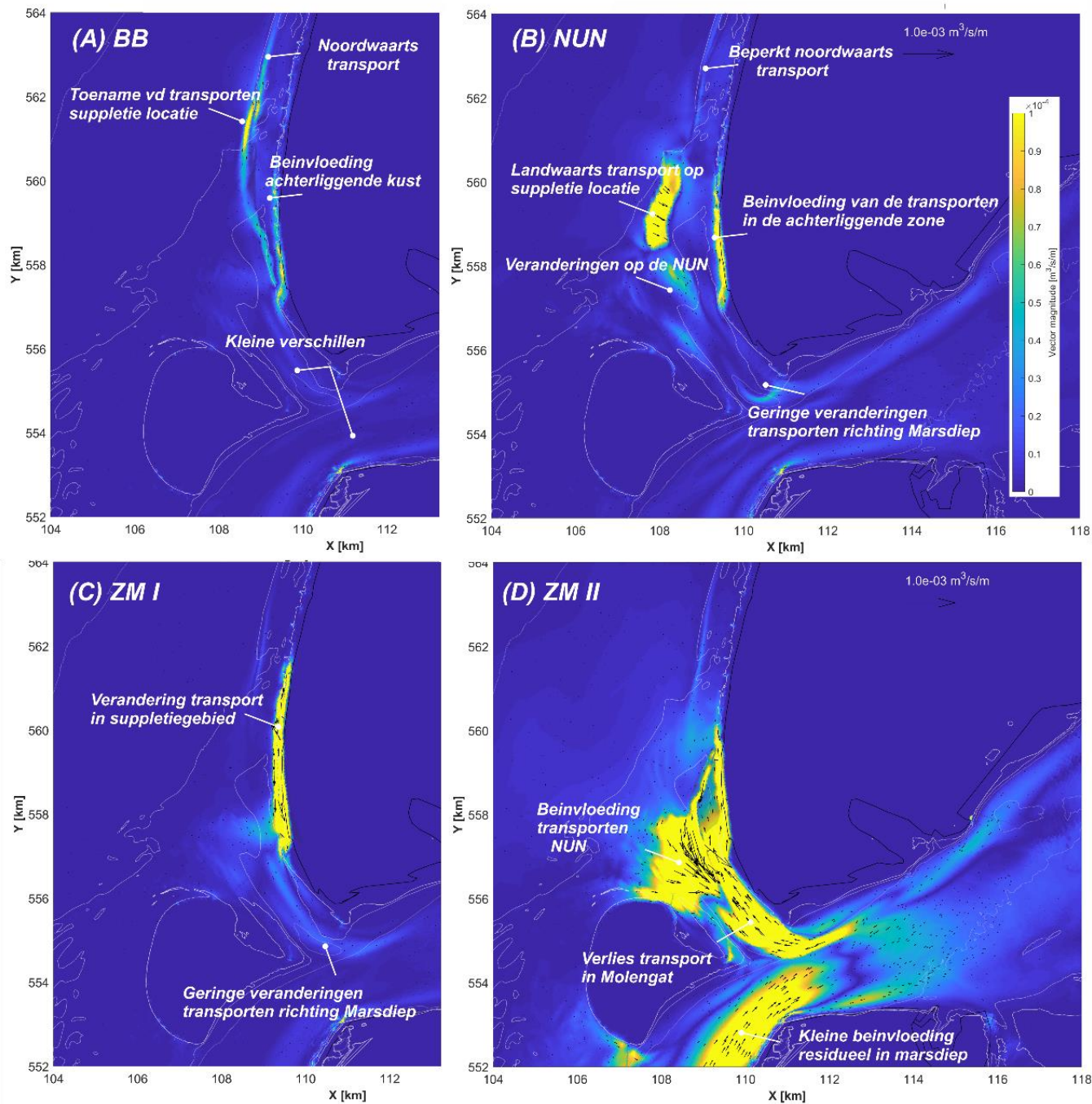
Figuur 4-11C laat zien dat langs de kustlijn er een groot verschil in transporten is. Dit komt doordat de suppletie de transportzone iets zeewaarts verplaatst. Er is weinig verschil in grootte met de T0 te zien. Een belangrijke conclusie is dat de invloed van de suppletie op de transporten in het Molengat beperkt is. De suppletie verplaatst de kustlijn wel zeewaarts, maar het getij stroomt er gewoon omheen. De suppletie veroorzaakt geen grote belemmering van de stroming of het dichtzetten van een geul. Transporten zijn dan vóór en ná suppletie vrijwel identiek.

### ***Zandmotor II (ZM II) suppletie***

Deze variant veroorzaakt grote veranderingen ter plaatse van de suppletie, maar ook op de omliggende buitendelta. Deze veranderingen zijn voor een groot deel gelijk aan die van de getijsimulatie, alleen is de grootte hier dan fors toegenomen. Aan de zeezijde van de zandmotor dragen golven sterk bij aan erosie. Ze maken sediment beschikbaar dat door de toegenomen stroming (contractie) ook sneller wordt getransporteerd, vooral richting het Molengat. Het Molengat is echter relatief diep en daarmee een bezinkput voor dit sediment. Transporten richting de kust zullen beperkt zijn. Door opvulling van het Molengat zullen de verliezen richting Marsdiep weer toenemen.

In het Molengat zelf nemen de transporten niet significant toe door aanleg van de suppletie. De verschilvector geeft hier juist aan dat er een kleine afname van het noordwaarts transport te zien is. Dit is gerelateerd aan het afsluiten van het Molengat en de beïnvloeding van het getij. Aan de noordzijde van de suppletie zijn de verschillen in transporten beperkt. Dit impliceert dat ook deze suppletie niet direct een significante bijdrage gaat leveren aan de kustlijnontwikkeling daar (raai 900-1000).





Figuur 4-11: Verandering in residuele jaargemiddelde sedimenttransporten bij variant (A) BB, (B) NUN, (C) ZM1 en (D) ZM2.

#### 4.3.4 Evaluatie van de suppletievarianten

De variant NUN heeft het grootste effect op het golfklimaat door de ondiepe kruinhoogte. Dit is de enige variant waarbij de erosieve processen langs de eilandkust duidelijk afnemen. Golfbreking op de NUN suppletie genereert een netto landwaarts transport. Het is waarschijnlijk dat deze suppletie landwaarts verplaatst en zo gaat bijdragen aan de volumes in de kustzone.

Op basis van expert judgement worden twee ontwikkelingsscenario's geschetst. De eerste is dat de suppletie onder invloed van golfgedreven erosie snel kleiner en lager wordt en zo opgaat in de onderliggende NUN. Het zand zal dan in langs richting afgevoerd worden, waarbij geen duidelijke respons in de kustlijnen zichtbaar is. Het tweede scenario is dat de suppletie zich als bank kan handhaven in hoogte en volume. De gehele suppletie zal dan onder de invloed van golven landwaarts verplaatsen en uiteindelijk verhelen met de kust van Zuidwest Texel. Dit proces lijkt dan op de aanlanding van het Bornrif Bankje. Na verhelting bouwt de kust tijdelijk sterk uit. Dit zand wordt vervolgens kustlangs verspreidt, waardoor voor lange tijd de aanliggende kust gevoed wordt. Op dit moment is kennis van de onderliggende processen onvoldoende om te voorspellen welk scenario waarschijnlijker is.

De ontwerpen van de varianten BB en ZM I beïnvloeden de processen nauwelijks en zijn eigenlijk geen systeemsuppleties. De variant BB is als smalle bank ontworpen op een locatie waar van nature geen bank aanwezig is. Dat betekent een groot risico dat de suppletie snel zal opbreken en verdwijnen, waardoor, ook bij hogere kruinhoogte, het golfafschermend effect beperkt blijft. De variant ZM I ligt volledig in de MKL rekenschijf en is zodoende efficiënt in het zeewaarts verplaatsen van de kustlijn en MKL. Dat maakt het een veilige keuze met waarschijnlijk schaalvoordelen ten opzichte van reguliere kleinschalige suppleties. De erosieve processen zullen niet afnemen, maar er is veel zand beschikbaar dat via verspreiding in langsricting lokale "hot-spot" erosie kan onderdrukken, waardoor minder frequent moet worden gesuppleerd.

Van de vier varianten heeft de variant ZM II de grootste effecten op de stromingen en transporten. Het is de grootste suppletie en is de enige variant die het Molengat volledig dichtzet. De modellering leerde dat die beïnvloeding vooral lokaal, ter hoogte van de suppletie, is. De variant heeft wel de potentie om het Molengat, de voorliggende NUN en de kustlijn van Texel op korte en lange termijn te beïnvloeden. De meeste invloed is bij de kop van de suppletie. Na aanleg wordt erosie van de voorliggende NUN en zandverlies van de suppletie verwacht. Het is mogelijk dat een nieuw Molengat vormt zeewaarts van de suppletie, of rechtstreeks zeewaarts door het ebschild heen. Na afsluiting van het Molengat worden de afgesloten delen bezinkputten van sediment. Dat betekent dat veel van het toegevoegde sediment terecht komt op een plaats waar ze wel deel blijven uitmaken van de kustzone, maar buiten de MKL rekenschijf liggen en zo niet direct bijdragen aan de kustindicatoren.

In Tabel 4-2 en Tabel 4-3 worden de resultaten van de analyses voor Zuidwest Texel beknopt samengevat in termen van indicatoren, kansen en risico's.



	<b>BB</b>	<b>NUN</b>	<b>ZMI</b>	<b>ZMII</b>
<b>Kustindicatoren direct beïnvloed door de aanleg</b>				
<b>Beïnvloeding dwarsprofielen</b>	Creëert een brekerbank in het profiel welke natuurlijk niet aanwezig zou zijn	Verhoging van de bestaande bank.	Dwarsprofiel wordt zeewaarts verlegd.	Voorliggende geul wordt dichtgezet
<b>Beïnvloeding bathymetrie</b>	Langgerekte brekerbank ontstaat op de voorroever.	Verhoging van bestaande bank	Geen significante beïnvloeding.	Molengat geul per plaatse van de suppletie dichtgezet.
<b>Beïnvloeding kustlijnen</b>	Zeewaarts aangelegd, aansluiting op strand: raaien 1000 - 1100	Zeewaarts aangelegd (geen invloed)	Raaien 850-1200	Raaien 850-900.
<b>Kustlijnen – MKL</b>	+100 m (alleen bij raai 1000 – 1100)	0 m	+ 100 m	+ 500-600 m
<b>Lengte beïnvloeding kustlijn (m)</b>	0 m	0 m	3.9 km	2 km
<b>Geschatte levensduur suppletie</b>	Geen schatting mogelijk op basis van de T0 en T1.	Geen schatting mogelijk op basis van T0 en T1.	7-8 jaar	>10 jaar
<b>Initiële bedekking (=oppervlakte suppletie)</b>	1,4*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	1,5*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	1,5*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>	2,2*10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup>
<b>Strandbreedtes</b>	geen verandering	0 m	tot +220 m	tot +870 m
<b>Intergetijdegebied</b>	geen verandering	geen verandering	Initieel alleen zeewaartse verlegging	grote toename door aanleghoogte
<b>Duinontwikkeling</b>	geen verandering	geen verandering	Initieel geen verandering	direct geen effect, maar indirect wel mogelijkheid tot duingroei
<b>Kustindicatoren beïnvloed door de werking van de suppletie</b>		<b>NUN</b>	<b>ZMI</b>	<b>ZMII</b>
<b>Erosie trends</b>	Geen invloed	Reductie van de erosieve processen kustlijn.	Geen invloed	Vergroting van erosie aan de kop van de suppletie.
<b>Golfbelasting</b>	Beperkte invloed.	Reductie golfbelasting	Geen invloed	Geen invloed
<b>Korte levensduur</b>	Mogelijk	Mogelijk	Niet waarschijnlijk	Mogelijk
<b>Stroomsnelheid</b>	Vrijwel geen beïnvloeding	Initieel kleine beïnvloeding rond/op suppletie. Mogelijke beïnvloeding als suppletie landwaarts verplaatst.	Geen beïnvloeding	Grote lokale beïnvloeding in Molengat en op de NUN aan de kop van de suppletie.
<b>Efficiëntie suppletie</b>	Twijfelachtig. Langs verliezen zijn te verwachten. Weinig effect op de kustlijn.	Mogelijk positieve beïnvloeding door reductie erosie kustlijn en op termijn verhelming met de kust.	Geen vergelijkbaar met huidige strandsuppleties. Mogelijk minder 'hot-spot' overschrijding.	Mogelijk gunstig door dichtzetten Molengat. Tevens risico op grote verliezen naar het Molengat.

Tabel 4-2: Overzicht van effecten op kustindicatoren voor Zuidwest Texel.

<i>Kansen</i>	<i>BB</i>	<i>NUN</i>	<i>ZMI</i>	<i>ZMII</i>
<i>Verhoging zandvolumes kustzone (MKL zone); effect op kustlijn.</i>	Beperkt effect. Alleen tussen raai 980-1100 invloed.	Geen invloed	Groot effect in het gebied tussen raaien 800-1250.	Groot effect in het gebied tussen raaien 800-1050.
<i>Uit de kust drukken van de stroming in de voorliggende geul.</i>	Geen invloed	Geen invloed.	Kleine effect.	Groot effect. De stroming wordt hier ver zeewaarts verlegt.
<i>Reductie van golfbelasting op de kust.</i>	Zeer beperkt. Tussen raai 1000-1200	Aanwezig. 10-20% reductie tussen raai 800-1200.	Geen effect	Geen effect
<i>Langere levensduur dan traditionele strandsuppletie</i>	Niet van toepassing	Niet van toepassing	Mogelijk. Door schaalverhoging vermindering lokale erosie.	Mogelijk, maar meer onderzoek is nodig.
<i>Bevorderen van duingroei</i>	Niet van toepassing	Niet van toepassing	Mogelijk	Mogelijk
<i>Risico's</i>	<i>BB</i>	<i>NUN</i>	<i>ZMI</i>	<i>ZMII</i>
<i>Dichtzeten geul / vaarroute recreatievaart</i>	Beperkt aanwezig. Tussen raai 800-900 ontstaat een drempel.	Aanwezig. Dichtdrukken Molengat bij landwaartse verplaatsing.	Niet aanwezig.	De suppletie zet het Molengat dicht ter hoogte van raai 900.
<i>Onverwachte effecten van geul beïnvloeding op het zeegeatsysteem</i>	Niet aanwezig	Niet aanwezig	Niet aanwezig	Beperkt aanwezig. Vooral een effect op het noordelijke deel van de buitendelta.
<i>Korte levensduur (omdat morfologie te veel afwijkt van de morfologie van het systeem)</i>	Waarschijnlijk.	Aanwezig.	Niet aanwezig. Zal zich uitwerken als een grote strandsuppletie met ongeveer gelijke erosietrend.	Aanwezig. Zeer grote transporten worden geobserveerd. Grote verliezen zijn waarschijnlijk.
<i>Verhoging geul gedreven erosie (in de kust drukken van het Molengat of Oostgat)</i>	Niet waarschijnlijk	Aanwezig. Bij landwaartse verplaatsing van de suppletie kan het Molengat de kust in gedrukt worden (raai 1000-1200)	Niet aanwezig	Niet waarschijnlijk.
<i>Beperkt effect m.b.t. kustjnhandhaving</i>	Waarschijnlijk. De suppletie zal kustlans afgevoerd worden. Er is geen vermindering van de erosieve processen zichtbaar.	Aanwezig. Er zijn echter wel indicaties van golfafscherming. Dus vermindering erosieve processen.	Niet aanwezig. Deze suppletie werkt als een grote strandsuppletie.	Aanwezig. De afgesloten delen van het Molengat kunnen als zandvang fungeren, waardoor er weinig uitwisseling met de kust is.
<i>Beïnvloeding van de omliggende banken.</i>	Niet aanwezig	Aanwezig. De NUN suppletie kan de NUN beïnvloeden. Dit is niet per definitie een negatieve impact.	Niet aanwezig	Aanwezig. De NUN zal zich aanpassen. Met name op de kop van de suppletie.
<i>Gevaar voor recreanten (complexe intergetijde morfologie)</i>	Niet aanwezig	Niet aanwezig. Alleen bij aanlanding een gevaar	Niet aanwezig	Aanwezig. Groot intergetijde gebied en verhoging stromingen aan de kop van de suppletie.
<i>Duur in uitvoering / inefficiënt</i>	Aanwezig. Geen duidelijk bijdrage aan kustlijnhandhaving	Beperkt aanwezig. Succes is afhankelijk van toekomstige ontwikkeling.	Beperkt. Suppletie zal zich als strandsuppletie gedragen, mogelijk voordeel van schaalverhoging.	Aanwezig, als het Molengat als zandput gaat fungeren.

Tabel 4-3: Een Overzicht van de kansen en risico's van de varianten voor Zuidwest Texel.

## 5 Conclusies en Aanbevelingen

### 5.1 Conclusies

Zuidwest Texel (het Molengat) en Ameland Noordwest (Oostgat) zijn geïdentificeerd als het meest kansrijk voor de uitvoering van een systeemsuppletie.

Alleen de varianten Texel NUN en Texel ZM II gedragen zich als systeemsuppletie. Ze reduceren de erosieve processen onderliggend aan de kustlijnerosie van Zuidwest Texel.

De NUN suppletie zorgt voor golfafscherming van de achterliggende kustlijn en draagt zo rechtstreeks bij tot een reductie van de erosie aan de kustlijn. Naast golfafscherming is er een extra zandaanbod op de NUN waardoor er meer transport richting de kust kan optreden. Het is mogelijk dat de suppletie uiteindelijk resulteert in een bankaanlanding en zo voor langere tijd de kustlijn kan voeden.

De ZM II suppletie heeft het meeste invloed op het systeem omdat het Molengat afgesloten wordt en de voorliggende geulen en banken zich hierop gaan aanpassen. Mogelijk leidt dit tot een nieuwe kortsluitgeul door de NUN en zullen de banken van de NUN eroderen. Dit zou niet per definitie ongunstig hoeven zijn voor Zuidwest Texel, maar een voldoende voorspelling hoe dit gaat uitwerken is nog niet te maken. Dat betekent meer risico dan bij de andere varianten.

De twee andere varianten met een zandmotor, Ameland en Texel ZM I, hebben een grote bijdrage aan de kustlijnhandhaving omdat er veel zand op de kust wordt aangebracht. Zulke suppleties zijn interessant vanuit oogpunt efficiëntie. De grote hoeveelheden die met deze varianten zijn gemoeid brengen een substantiële hoeveelheid extra zand in het zeegatsysteem. Dat heeft op langere tijdschalen een positieve invloed (bijv. in de vorm van aanlandingsbanken). Een onverwacht negatief bijeffect wordt niet verwacht omdat het extra aanbod aan zand klein blijft ten opzichte van de natuurlijke ontwikkelingen.

Voor alle suppletievarianten geldt dat beïnvloeding van de processen op de schaal van het zeegat niet waarschijnlijk is. Ze zijn ontworpen buiten de hoofdcirculatie van het Zeegat en hebben vooral lokaal invloed op stromingen en transporten.

### 5.2 Aanbevelingen

Ontwerpen die geen systeemsuppletie zijn, maar wel een schaalvergroting van reguliere suppleties, kunnen ook leiden tot efficiënter kustlijnbeheer. De varianten Ameland Zandmotor en Texel ZM I suppletie vallen hieronder. Een eerste stap in aanvullend onderzoek hiernaar is het in detail analyseren van de grote vooroever/strand suppletie bij Ameland in 2019. De ontwikkeling van deze suppletie is waarschijnlijk een goede maatstaaf voor de ontwikkeling van de Ameland Zandmotor suppletie. Omdat data nog niet beschikbaar waren kon dit niet binnen dit onderzoek gebeuren.

Nader onderzoek is nodig bij elke systeemsuppletie, maar in het bijzonder voor de ZM II suppletie, vanwege de ingrijpende verandering in de processen in het noordelijke deel van de buitendelta van het Zeegat van Texel en de grote verwachte effecten.

Het kwantificeren van het effect van de varianten op de ontwikkeling van de kustindicatoren bleek niet goed haalbaar. Om dat wel mogelijk te maken zal hier modelontwikkeling voor morfologisch modelleren nodig zijn.

De werking van de zeegatsystemen van Texel en Ameland en de grootschalige ontwikkeling van de eilanden is wel bekend en gedocumenteerd. Gedetailleerde beschrijvingen van de kustontwikkelingen op het niveau van de raaien en in termen van de kustindicatoren is echter slechts beperkt uitgevoerd. Ook ontbreekt het aan gedetailleerde evaluaties van de uitgevoerde suppleties. Van deze analyses kan nog veel geleerd worden voor het ontwerpen van suppleties.



## 6 Referenties

- Cleveringa, J., 2001, Zand voor Zuidwest Texel: Technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel. Technical report, Rijksinstituut voor Kust en Zee, Den Haag.
- Elias, E.P.L. 2006. Morphodynamics of Texel Inlet, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft, The Netherlands, 261 pp.
- Elias, E.P.L., 2020a. Workshop Kustfundamentsuppleties bij eilandkoppen. Memo, Deltares Delft, 17p.
- Elias, E.P.L., 2020b. Kustfundamentsuppleties op eilandkoppen. Een inventarisatie van 4 mogelijke locaties. Rapport 11205236-005-ZKS-0003, Deltares Delft, 43p.
- Elias, E.P.L., Oost, A.P. (2021). Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Rapport 11205236-003, Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F, 2020. Systemesuppleties op eilandkoppen. Rekenontwerpen en Morfologische modellering. Rapport 11205236-005-ZKS-0003, Deltares Delft, 43p.
- 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), p. 293–317.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S.G., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. Marine Geology, 415.
- Nederhoff, K., Elias, E.P.L., Vermaas, T, 2016. Erosie op Ameland Noordwest. Modelstudie: simulaties met Delft3D en XBeach. Rapport 1503-0080, Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2020. Morfologische ontwikkeling van De Hors – Texel. Rapport 11204540-000, Deltares, Delft, 59p.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S, 2020. Understanding the morphological processes at Ameland Inlet. Kustgenese 2.0 synthesis of the tidal inlet research. Report 1220339-008-ZKS-0008, Deltares, Delft, 82 p.
- Laan, S.C., 2019. Understanding coastal dynamics at an ebb-tidal delta in the Wadden Sea. A case study of Schiermonnikoog NW with Delft3D Flexible Mesh. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 105 pp.
- Nederhoff, C.M., Schrijvershof, R., Tonnon, P.K., van der Werf, J.J., 2016. The Coastal Genesis II Terschelling - Ameland inlet (CGII-TA) model. Model setup, calibration and validation of a hydrodynamic-wave model. Report 1220339-008-ZKS-0004, Deltares, Delft, 88 p.

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)