

## Beheerbibliotheek Kust Ameland

Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust



## **Beheerbibliotheek Kust Ameland**

Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust

## Beheerbibliotheek Kust Ameland

Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust

<b>Opdrachtgever</b>	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
<b>Contactpersoon</b>	Falco van Bakel & Niels van Kuik
<b>Referenties</b>	Zie pagina 62
<b>Trefwoorden</b>	Ameland, Amelander Zeegat, Pinkegat Zeegat, suppleties, duindynamiek, bodemdaling, kustlijnonderhoud, morfologie

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	1.0
<b>Datum</b>	14-09-2023
<b>Projectnummer</b>	11209263-002
<b>Document ID</b>	11209263-002-ZKS-0002
<b>Pagina's</b>	79
<b>Classificatie</b>	
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Nienke Vermeer	
	Marc Hijma	
	Maaïke Maarse	
	Ellen Quataert	

# Samenvatting

Om de kennis over het kuststelsel uit te breiden en te verspreiden voert Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat kustonderzoek uit binnen het kennisprogramma B&O Kust (Beheer en Onderhoud Kust). Dit gebeurt in nauwe samenwerking met andere onderzoeksinstituten en met Rijkswaterstaat. In deze beheerbibliotheek van de kust van Ameland wordt de meest recente kennis vanuit onderzoek en beheer samengebracht en inzichtelijk gemaakt. De beheerbibliotheek biedt onder andere een basis voor het opstellen van het suppletieprogramma, kustadvies en onderzoek. Het omvat een beschrijving van het kustlijnbeleid en -beheer, morfologische systeemwerking, kustverdediging/primaire waterkering en gebruiksfuncties van de kust. De kennis die landt in de beheerbibliotheek is zowel ontwikkeld binnen het programma B&O Kust als ook andere kust(onderzoek)projecten en wetenschappelijk onderzoek.

De voorliggende beheerbibliotheek van het kustvak Ameland is een actualisatie van de tweede versie door Mastbergen et al. (2017). Tekst, figuren en tabellen zijn aangevuld en geactualiseerd. Ook zijn er resultaten van nieuwe studies opgenomen. Elias et al. (2022b) en Elias & Oost (2021) hebben bijvoorbeeld een grootschalige analyse gedaan van de morfologische processen in respectievelijk het Amelandse Zeegat en Pinkegat Zeegat.



# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>B&amp;O Kust en de beheerbibliotheken</b>	<b>7</b>
1.1	Kustonderhoud en -onderzoek	7
1.2	Waarom een beheerbibliotheek?	7
1.3	Wat staat er in een beheerbibliotheek?	7
1.4	Kustviewer	8
1.5	Kustlijnkaartenboek	8
1.6	Leeswijzer	8
<b>2</b>	<b>Algemene gebiedsbeschrijving</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Beleid t.a.v. kustonderhoud en waterveiligheid</b>	<b>11</b>
3.1	Achtergrond kustbeleid dynamisch handhaven	11
3.2	Basiskustlijn voor Ameland	14
3.3	Waterveiligheidsbeleid	15
<b>4</b>	<b>Gebruiksfuncties van de kust van Ameland</b>	<b>18</b>
4.1	Inleiding	18
4.2	Waterveiligheid	18
4.2.1	Kustverdedigingswerken	18
4.2.2	Primaire waterkering	19
4.2.3	Beoordeling van de primaire waterkering	19
4.3	Strandrecreatie	20
4.4	Natuur	21
4.4.1	Natura 2000 wetgeving	21
4.4.2	Algemene beschrijving	23
4.4.3	Landschapsecologische elementen	25
4.4.4	Geomorfologie en reliëf	26
4.4.5	Bodem	27
4.5	Drinkwaterwinning	28
<b>5</b>	<b>Langetermijnontwikkelingen</b>	<b>29</b>
5.1	Inleiding	29
5.2	Paleografische ontwikkeling	29
5.2.1	Pleistocene ontwikkeling	31
5.2.2	Subrecente ontwikkelingen	32
5.3	Bodemdaling	33
<b>6</b>	<b>Beschrijving van het morfologisch systeem</b>	<b>40</b>

6.1	Hoofdlijnen van het morfologisch gedrag	40
6.2	Amelander Zeegat	40
6.2.1	Algemene kenmerken	40
6.2.2	Grootschalige morfologische ontwikkeling van het Amelander Zeegat	41
6.2.3	Morfologische ontwikkeling van de kustlijn	44
6.3	Pinkegat	46
6.3.1	Algemene kenmerken	46
6.3.2	Grootschalige morfologische ontwikkeling van het Pinkegat	47
6.3.3	Morfologische ontwikkeling van de kustlijn	53
6.4	Centrale eilandkust	55
6.5	Dynamiek van de duinen	57
6.5.1	Dynamiek in de zeereep	57
6.5.2	Dynamisch beheer	59
6.5.3	Volumeveranderingen in de zeereep	61
<b>7</b>	<b>Kustlijnontwikkeling</b>	<b>62</b>
7.1	Hoofdlijnen	62
7.2	Zandsuppleties	62
7.3	Ontwikkeling kustindicatoren	66
7.3.1	MKL – BKL	66
7.3.2	Duinvoet	67
7.3.3	Strandbreedte	67
7.3.4	Faalkans eerste duinenrij/zeereep	69
	<b>Referenties</b>	<b>71</b>
<b>A</b>	<b>Kustindicatoren: berekenmethode</b>	<b>75</b>
A.1	Gemiddeld hoog- en laagwater	75
A.2	Duinvoet	76
A.3	Strandbreedte	76
A.4	Faalkans van de eerste duinenrij	77

# 1 B&O Kust en de beheerbibliotheken

## 1.1 Kustonderhoud en -onderzoek

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het onderhoud van de Nederlandse kust. Hiervoor suppleert Rijkswaterstaat jaarlijks gemiddeld 11 miljoen m<sup>3</sup> zand. Voor ontwerp, volume en de uitvoeringsperiode van de suppletie is kennis van het zandige kuststelsel nodig.

In de loop der jaren is veel kennis over het kuststelsel ontwikkeld. Toch komen er voortdurend nieuwe onderzoeksvragen naar voren, bijvoorbeeld of zandsuppleties nog efficiënter en duurzamer kunnen worden uitgevoerd. Tevens is er nog geen eenduidig beeld van de effecten van suppleties op de ecologie van de kust en wordt hiertoe meerjarig onderzoek uitgevoerd. Om de kennis over het kuststelsel uit te breiden en te verspreiden voert Deltares - in opdracht van Rijkswaterstaat - kustonderzoek uit binnen het kennisprogramma B&O Kust (Beheer en Onderhoud Kust) in nauwe samenwerking met andere onderzoeksinstituten en met Rijkswaterstaat. Nieuwe inzichten die uit het onderzoek voortkomen, kunnen ertoe leiden dat de suppletiepraktijk wordt aangepast.

## 1.2 Waarom een beheerbibliotheek?

Het hoofddoel van de beheerbibliotheek is het samenbrengen en inzichtelijk maken van de meest recente kennis per kustvak. Beheer en onderhoud vindt plaats in een complex (morfologisch) systeem. Het begrijpen van die complexiteit is van belang voor de kustlijnverzorging met zandsuppleties, maar ook voor maatregelen van andere beheerders.

Gebruikers van de beheerbibliotheek zijn Rijkswaterstaat, Deltares en andere (kennis)partijen en regionale beheerders. De beheerbibliotheek ondersteunt het opstellen van het suppletieprogramma, kustadvies en de programmering van kustonderzoek.

## 1.3 Wat staat er in een beheerbibliotheek?

De beheerbibliotheek beschrijft de toestand van het betreffende kustvak en omvat een beschrijving van de morfologische systeemwerking, de kustverdediging en de primaire waterkeringen. Verder bevat de beheerbibliotheek een overzicht van het uitgevoerde kustbeheer, met nadruk op de eerder uitgevoerde suppleties, en de waargenomen effecten van dat beheer. Ten slotte wordt in de beheerbibliotheek de informatie over de gebruiksfuncties van de kust (zoals recreatie en natuur) samengevat. Het gaat daarbij om informatie die relevant is voor het vaststellen van het suppletieprogramma. De kennis in de beheerbibliotheek komt voort uit het programma B&O Kust, maar ook uit andere kustprojecten en wetenschappelijk onderzoek. Tevens wordt opgedane ervaring en kennis uit de uitvoering meegenomen in de beheerbibliotheek.

De voorliggende beheerbibliotheek van het kustvak Ameland is een actualisatie van de tweede versie door Mastbergen et al. (2017). Tekst, figuren en tabellen zijn aangevuld en geactualiseerd. Ook zijn er resultaten van nieuwe studies opgenomen. Resultaten van de studie door Elias et al. (2022b) en Elias & Oost (2021) naar de morfologische processen van respectievelijk het Amelandse Zeegat en het Pinkegat Zeegat zijn bijvoorbeeld in deze beheerbibliotheek verwerkt.



## 2 Algemene gebiedsbeschrijving

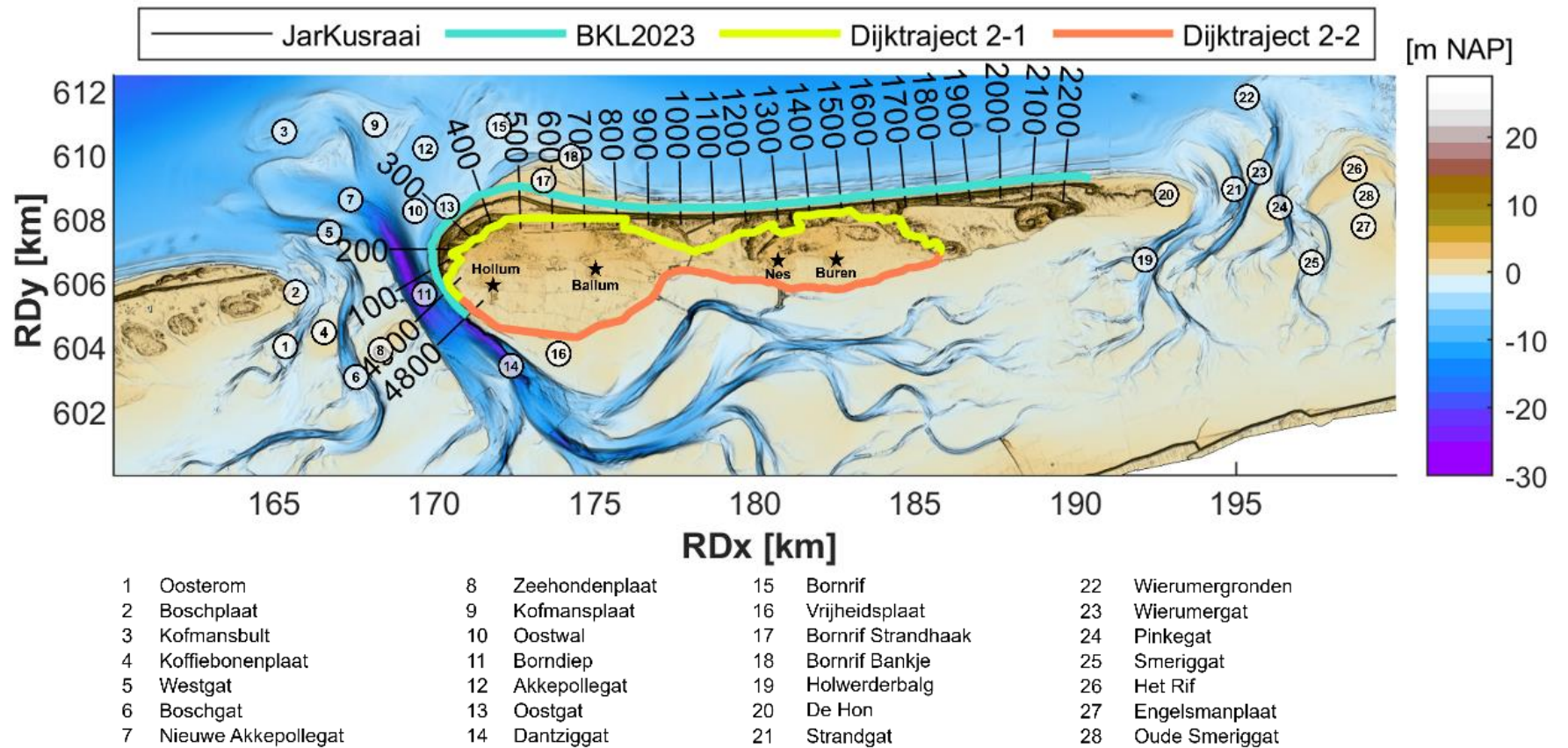
Ameland (Figuur 2-1) is, na Schiermonnikoog, het op één na meest oostelijke eiland van de rij van bewoonde Nederlandse Waddeneilanden. Het eiland is ongeveer 27 km lang met een maximale breedte van 4 km. Het totale landoppervlak beslaat zo'n 270 km<sup>2</sup>. Uit data over inwoners per gemeente van het Centraal Bureau voor de Statistiek (2023) volgt dat Ameland in 2023 3840 inwoners kende. De meeste inwoners wonen in Nes. Naast Nes zijn er nog drie dorpen op Ameland: Hollum, Buren en het kleinste dorp Ballum.

Ameland bestaat voornamelijk uit zandduinen. Ten oosten van het dorp Buren ligt het natuurgebied het Oerd. Dit is een oud begroeid duingebied met enkele hoge duinen en vochtige duinvalleien waar zeewater via een aantal geulen vrijelijk in- en uitstroomt. Nog verder naar het oosten ligt het natuurgebied de Hôn (Figuur 2-1), dit is een duin- en kweldergebied. Het is de eilandstaart. De oorspronkelijke zandplaat raakt geleidelijk bedekt met jonge duinen en kwelders aan de Waddenzeekant. Het Oerd en de Hôn zijn in trek bij veel vogelsoorten.

Het eiland is begrensd door twee zeegaten: het Amelander Zeegat aan de westzijde en het Friesche Zeegat aan de oostzijde. Het Friesche Zeegat bestaat weer uit twee aparte zeegaten, van elkaar gescheiden door de Engelsmanplaat. Het westelijke en kleinere zeegat heet het Pinkegat en het oostelijke, grotere zeegat is de Zoutkamperlaag. De morfologische ontwikkelingen van deze zeegaten – deels onder de invloed van menselijk ingrijpen – bepalen in grote mate de ontwikkeling van Ameland en de lokale veranderingen bij de eilandkop en -staart.

Aan de oostzijde van het eiland kan de natuurlijke dynamiek vrijwel ongestoord plaatsvinden. Aan de westzijde bevindt zich de primaire waterkering dat deels uit een dijk en deels uit duinen bestaat. Aan de Noordzeekant bestaat de waterkering uit een rij aaneengesloten duinen (Dijktraject 2-1), in beheer bij Rijkswaterstaat. Aan de Waddenzeezijde bestaat de waterkering uit de Waddenzeedijk (Dijktraject 2-2), dat in het beheer bij het Wetterskip Fryslân is. Verder zijn er aan de westzijde diverse harde kustverdedigingswerken uitgevoerd en vinden er regelmatig zandsuppleties plaats om erosie van de eilandkop door de opdringende geul Borndiep tegen te gaan. Het centrale kustgedeelte van het eiland, tussen de eilandkop en staart bij JarKus raaien 1000 – 2000, wordt indirect beïnvloedt door de naastliggende zeegaten. Als onderdeel van de cyclische ontwikkeling van de Amelander buitendelta landen er periodiek grote zandvolumes aan op de noordwestkust van Ameland (zie ook Hoofdstuk 6).





Figuur 2-1: De kust van Ameland middels een hoogtekaart van de kustzone op basis van de meest recente Vaklodingen en AHN3.

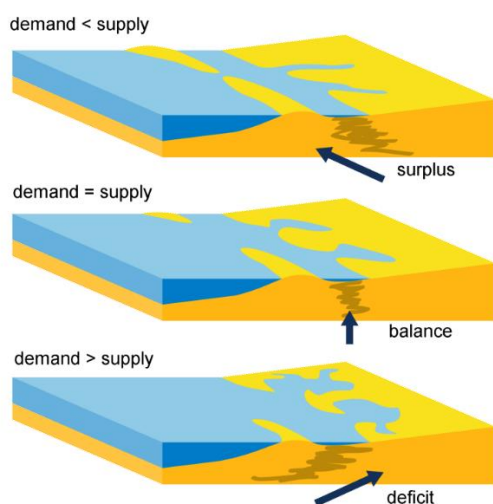


## 3 Beleid t.a.v. kustonderhoud en waterveiligheid

Sinds 1990 wordt de Nederlandse kust dynamisch gehandhaafd met zandsuppleties. Paragraaf 3.1 licht de achtergrond van dit kustbeleid toe en paragraaf 3.2 doet dit voor de ligging van de Basiskustlijn en de beheerpraktijk voor het kustvak Ameland. Paragraaf 3.3 beschrijft het beleid met betrekking tot waterveiligheid en beoordeling van de primaire waterkering.

### 3.1 Achtergrond kustbeleid dynamisch handhaven

*Kusterosie* - De Nederlandse kust vertoont gemiddeld genomen al duizenden jaren een eroderende trend. Op kleine tijd- en ruimteschaal is soms wel sprake van afwisseling tussen kustopbouw en -erosie. De oorzaak van de eroderende trend is een grote zandvraag, terwijl er slechts een gering zandaanbod is (Figuur 3-1). De grote zandvraag is het gevolg van een stijgende zeespiegel en van grootschalige ingrepen in de getijbekkens. Het geringe aanbod wordt veroorzaakt doordat de aanvoer van zand vanaf de diepere Noordzeebodem vrijwel tot nul is gereduceerd (Hoofdstuk 5.2) en de rivieren eveneens al lange tijd nauwelijks meer zand naar de kustzone transporteren.



Figuur 3-1: Samenspel van vraag (demand) en aanbod (supply) van sediment. Een tekort (deficit) van sediment zal uiteindelijk leiden tot erosie en landwaartse terugtrekking van de kust. (Nichols, 1989, aangepast door RWS).

*Dynamische kusthandhaving* - In 1990 besloot de regering dat de positie van de kustlijn gehandhaafd moest worden, zodat de veiligheid van het achterland en de aanwezige functies langs de kust (natuur, recreatie, drinkwaterwinning) duurzaam behouden blijven (Ministerie van Verkeer en Waterstaat 1990). Sindsdien wordt het structurele zandverlies aangevuld met zandsuppleties. Het gesuppleerde zand wordt door stroming, wind en golven over het kuststelsel verspreid.

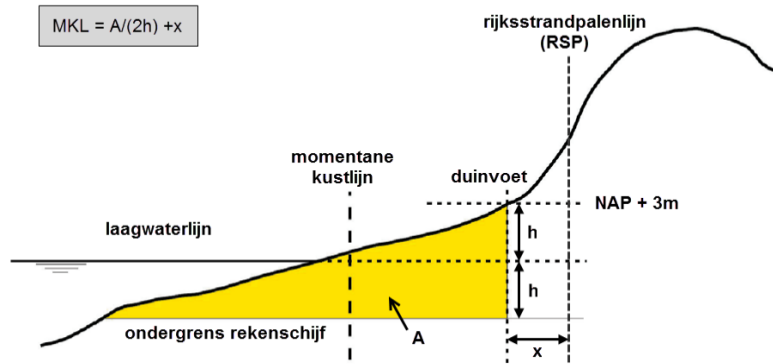
*Basiskustlijn (BKL)* - Om te bepalen waar het zand langs de kust gesuppleerd moet worden, is in 1990 de 'Basiskustlijn' ofwel BKL, als referentie gedefinieerd. De BKL wordt gebruikt als instrument om eventuele kustachteruitgang te signaleren. De BKL vertegenwoordigt een zandvolume dat (kustdwars) aanwezig is in het kustprofiel rondom de laagwaterlijn, tussen de duinvoet en de ondiepe vooroever. De positie van de BKL wordt berekend aan hand van dit aanwezige volume zand en uitgedrukt in een positie ten opzichte van de Rijksstrandpalenlijn

(RSP). De BKL-positie is initieel gebaseerd op de trend in de kustlijnliggingen tussen 1980 en 1989 (bovenste deel Figuur 3-3). Elk jaar wordt de ligging van de kustlijn berekend en vergeleken met de positie van de Basiskustlijn. Als de Basiskustlijn structureel overschreden dreigt te worden, wordt het zandverlies met suppleties aangevuld. Het benodigde jaarlijkse suppletievolume om de kustlijn op die manier te handhaven werd in 1990 vastgesteld op 6 miljoen m<sup>3</sup> zand.

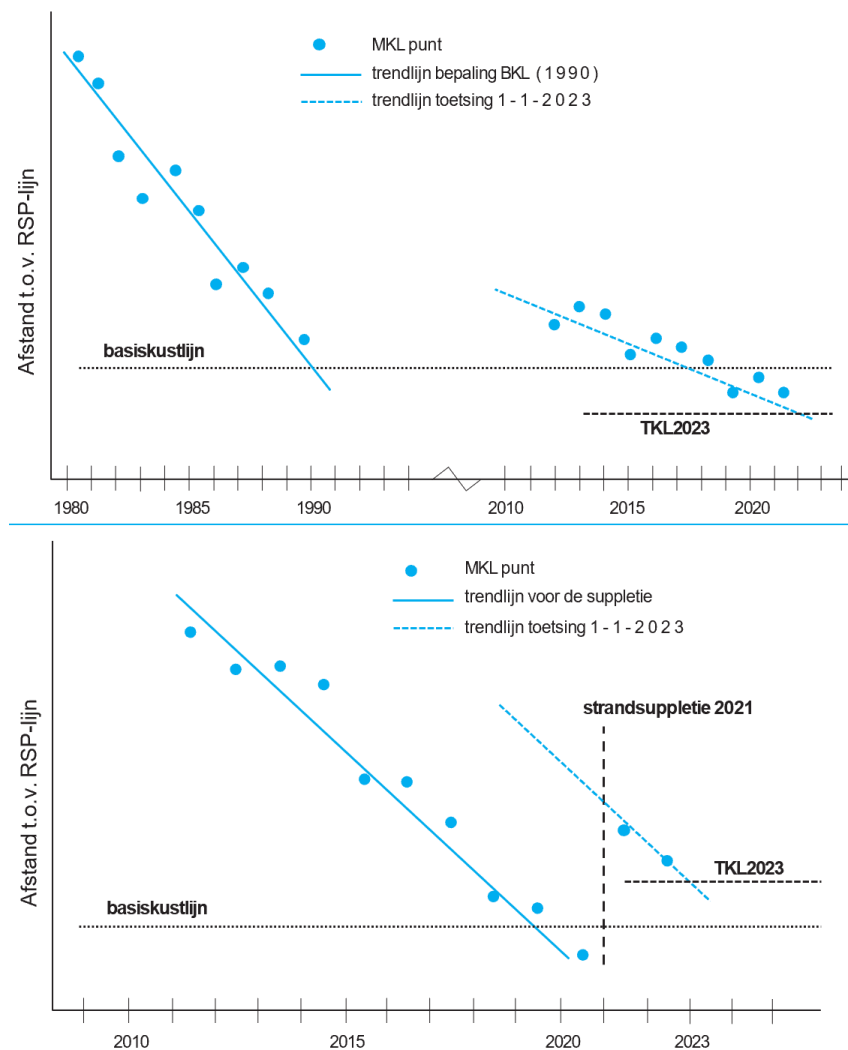
*Kustfundament* - In de jaren na 1990 groeide het inzicht dat er niet alleen structurele erosie optrad in de ondiepe kustzone, maar ook in dieper water (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1995; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003; Mulder, 2000). Het structurele zandverlies in deze zone zou op termijn kunnen leiden tot een toename van de zandverliezen in de ondiepe kustzone. De benodigde inspanning voor het handhaven van de Basiskustlijn zou daardoor in de toekomst aanzienlijk groter worden. Daarom besloot de regering in 2001 dat het voor een duurzame handhaving van veiligheid en functies in het duingebied nodig was om het zandverlies in het gehele kustfundament te compenseren. Het kustfundament is destijds (rekenkundig) gedefinieerd als de zone tussen de binnenduinrand en de doorgaande -20m NAP-dieptelijn. Het hele oppervlak van het kustfundament moet meegroeien met de zeespiegel. Het landelijke suppletievolume werd daartoe verhoogd van 6 naar gemiddeld 12 miljoen m<sup>3</sup> zand per jaar. Met het aanleggen en onderhouden van de Hondsbossche Duinen en de Tweede Maasvlakte, waarbij tot op heden geen BKL is vastgesteld, is hier in de loop der jaren in totaal 1 miljoen m<sup>3</sup> aan jaarlijks suppletievolume bijgekomen. In navolging op het advies vanuit Kustgenese 2.0 is het jaarlijkse suppletievolume voor de gehele Nederlandse kust echter verlaagd naar 10 miljoen m<sup>3</sup> voor 2022-2023 en 11 miljoen m<sup>3</sup> vanaf 2024 (Tweede Kamer der Staten-Generaal, 2021). Hiervan is 10 miljoen m<sup>3</sup> bestemd voor locaties waar een basiskustlijn is vastgesteld. Voor de langere termijn wordt onderzocht of en wanneer een toename van het suppletievolume in de rede ligt.

*Herziening Basiskustlijn* - Om ervoor te zorgen dat de Basiskustlijn overeen blijft komen met de, vanuit de verschillende functies gezien, gewenste kustlijn, is de Basiskustlijn geëvalueerd in 2001, 2012 en 2017, en op verschillende locaties herzien (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003, Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012, en Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2018). In de nieuwe Waterwet en het Nationaal Waterplan is, net als in de voorgaande Wet op de Waterkering, de noodzaak tot regelmatige (iedere 6 jaar) herziening van de Basiskustlijn vastgelegd. Het hoofddoel van de herziening van de basiskustlijn is om (weer) de juiste signaalfunctie voor het kustonderhoud te creëren. Een herziening houdt de basiskustlijn dus actueel. De volgende herziening vindt in de loop van 2023 plaats.

*Momentane Kustlijn (MKL) en Toekomstige Kustlijn (TKL)* - Sinds 1965 wordt de kustlijn jaarlijks gemeten (m.a.w. JarKus: JAaRijks KUSTmeting). Op basis van deze JarKus-profielen kan de positie van de Momentane KustLijn (MKL) bepaald worden. De MKL-positie wordt, analoog aan de BKL-positie, berekend op basis van het aanwezige volume zand tussen de duinvoet en de ondiepe vooroever en ook uitgedrukt in meters ten opzichte van RSP (Figuur 3-2). Door middel van een lineaire trend in MKL-positie over de laatste jaren wordt de ligging van de Toekomstige KustLijn (TKL) afgeleid voor 1 januari dat volgende jaar (Figuur 3-3). Ieder jaar wordt beoordeeld of de BKL wordt overschreden, door de TKL-positie met de BKL-positie te vergelijken.



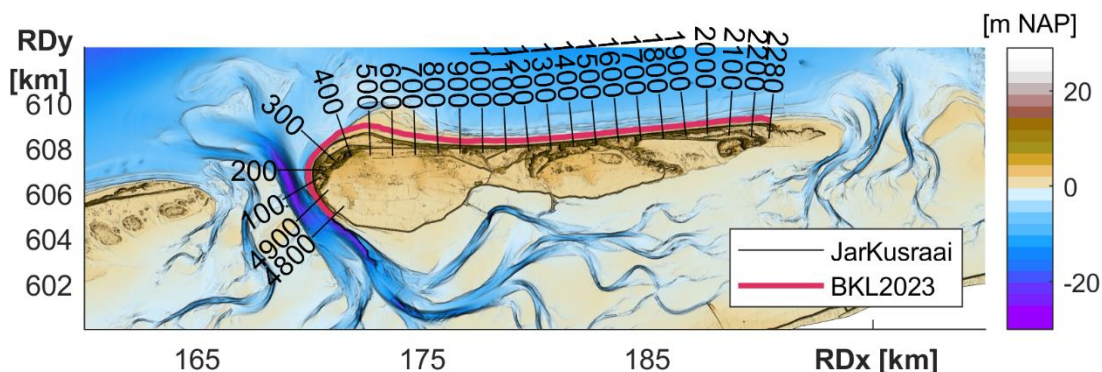
Figuur 3-2: Bepaling Momentane Kustlijn (MKL). Waarbij het zandvolume (gele oppervlak A) wordt bepaald in de zogenaamde rekenschijf tussen de rekenkundige duinvoet (doorgaans + 3m NAP) en de ondergrens. De afstand van het gemiddeld laagwater tot de duinvoet en gemiddeld laagwater tot de ondergrens ( $h$ ) is gelijk. Vervolgens wordt de MKL-positie bepaald door het volume ( $A$ ) te delen door de hoogte van de rekenschijf ( $2h$ ) en de afstand tot de rijksstrandpalenlijn daarbij op te tellen.



Figuur 3-3: Voorbeeldweergave hoe de jaarlijkse Toekomstige Kustlijn (TKL) wordt afgeleid uit de trend in de Momentane Kustlijn (MKL) van de voorgaande jaren. Voor de bepaling van de BasisKustLijn (BKL) in 1990 is gebruik gemaakt van de trend in MKL van de jaren ervoor. Het tweede voorbeeld geeft aan hoe voor de bepaling van TKL 2022 wordt omgegaan met een trendbreuk (namelijk, een strandsuppletie) (Kustlijнкаartenboek 2022).

## 3.2 Basiskustlijn voor Ameland

Voor Ameland is de BKL vastgesteld tussen raaien 4800 en 2280. Figuur 3-4 geeft de ligging van de huidige Basiskustlijn voor Ameland, samen met de positie van enkele JarKus raaien. De positie van de BKL voor de JarKus raaien 4916 tot 400 (Ameland Noordwest) en 1700 tot 2240 (Ameland Oost) is de afgelopen periode geëvalueerd en wordt hierbij herzien. In de loop van 2023 vindt de vaststelling van deze nieuwe BKL plaats. Hieronder worden de aanpassing aan deze nieuwe BKL (2023) toegelicht. De vigerende (en oude) BKL-ligging is te zien in de Kustviewer (<https://www.openearth.nl/coastviewer-static/>).



Figuur 3-4: Ligging van de herziene Basiskustlijn (2023) voor Ameland, samen met de positie van enkele JarKus raaien (2022 vaklodingen aangevuld met de AHN3).

### Herziening BKL 2023

De positie van de BKL voor Ameland Noordwest en Ameland Oost is herzien en zal in de loop van 2023 worden vastgesteld (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023). De regionale afspraken waar eerder sprake van waren, zijn verwerkt in de nieuwe ligging van de BKL die aansluit bij de huidige praktijk (~2023) en komen daarmee te vervallen. In beide gevallen heeft het herzien van de basiskustlijn geen gevolgen voor waterveiligheid, het kustonderhoud en andere functies.

### *Ameland Noordwest*

Het betreft het gebied waar de zandplaat het Bornrif ca. 30 tot 40 jaar geleden is aangeland, wat tijdelijk voor veel aanzanding van de kust heeft gezorgd (zie ook Hoofdstuk 6). De BKL is vastgesteld na deze aanlanding en ligt vooral op de raaien 300-400 ver zeewaarts. Deze positie sluit niet goed aan op de huidige morfodynamiek en is lastig te handhaven. De laatste jaren was er sprake van continue overschrijdingen van de BKL ondanks frequente suppleties. Daarom wordt de BKL aangepast (deels zeewaarts, deels landwaarts), zodat deze beter aansluit op de huidige morfodynamiek en weer kan gaan dienen voor het signaleren van structurele erosie. De nieuwe positie is gebaseerd op de gemiddelde ligging van de kustlijn over de afgelopen 10 jaar. Vervolgens zijn hier enkele aanpassingen aan gedaan. Het kustdeel rondom raai 300 is minder ver landwaarts verlegd dan deze gemiddelde ligging, om ervoor te zorgen dat de BKL niet te dicht bij de duinen komt te liggen (in verband met waterveiligheid). De BKL rondom raai 200 wordt niet landwaarts verlegd om de aanwezige functies te behouden.

### *Ameland Oost*

In dit gebied spelen vooral natuurbelangen. De BKL hoeft om veiligheidsredenen niet strikt te worden gehandhaafd. Daarom zijn er in 2000 bestuurlijke afspraken gemaakt over het moment van suppleren. Er wordt pas ingegrepen als er sprake is van een gemiddelde overschrijding over de raaien 1700 tot 2300. Dit houdt in dat er wordt gesuppleerd als de gemiddelde kustlijn van de afzonderlijke trajecten raai 1700-2000 of raai 2000-2300 structureel landwaarts ligt van de basiskustlijn. Doordat de kust wordt onderhouden volgens

de bestuurlijke afspraken, speelt de basiskustlijn een andere rol dan in de rest van Nederland. Een overschrijding op raainiveau is immers niet doorslaggevend, maar een gemiddelde overschrijding over een bepaald aantal raaien wel. Deze bestuurlijke afspraken worden verwerkt in een nieuwe ligging van de BKL, die aansluit bij de huidige praktijk. De BKL wordt hiertoe verlegd naar de meest landwaartse positie van de kustlijn in de jaren van gemiddelde overschrijding. De eerdere bestuurlijke afspraken komen hiermee te vervallen. Hiermee krijgt de BKL zijn signaleringsfunctie op individueel raainiveau terug.

Meer informatie over de geschiedenis van bestuurlijke afspraken en voorgaande herzieningen is te vinden in de Factsheets herziening BKL 2023 (Quataert & de Goede, 2023).

### 3.3 Waterveiligheidsbeleid

#### Eerste Landelijke Beoordeling van Primaire Waterkeringen

In de Waterwet is vastgesteld dat de veiligheid van alle primaire waterkeringen elke twaalf jaar moet worden beoordeeld. De beoordeling van de veiligheid van een primaire kering dient te worden uitgevoerd volgens procedurele regels. De basis voor de beoordeling was het Wettelijk BeoordelingsInstrumentarium 2017 (WBI 2017<sup>1</sup>). Het WBI 2017 bevat de methoden en regels die waterkeringbeheerders dienen te gebruiken bij de beoordeling van de primaire waterkeringen. Het WBI 2017 verving de VTV (Voorschrift Toetsen op Veiligheid). De vorige beoordelingsronde liep van 2017 tot 2023. Deze beoordelingsronde was de eerste ronde op basis van de overstromingskansbenadering (LBO-1, sinds 2017 vigerend) en werd gebruikt om een eerste veiligheidsbeeld van de keringen te schetsen, ervaring op te doen met de nieuwe systematiek en te leren voor de toekomst.

#### Tweede Landelijke Beoordeling van Primaire Waterkeringen

De vorige beoordelingsronde tussen 2017 en 2023 stond in het teken van ervaring opdoen met de normwijziging die in 2017 heeft plaatsgevonden. In 2023 is de Tweede Landelijke Beoordeling van Primaire Waterkeringen Overstromingskansen (LBO-2) gestart met een nieuwe wettelijke regeling, de Omgevingsregeling. De LBO-2 loopt van 2023-2035 en de overstap naar overstromingskansen van primaire waterkeringen staat centraal. De komende periode ligt de nadruk op het op orde brengen van de primaire waterkeringen voor 2050. Dat betekent dat in 2035 een nauwkeurig beeld van de veiligheidsopgave bekend moet zijn.

Om dit te bereiken heeft het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat samen met de waterkeringbeheerders een beoordelingsprocedure ontwikkeld. De beoordelingsmethodiek voor de landelijke beoordelingsronde die loopt tot 2035 is een doorontwikkeling van de in 2017 in gebruik genomen overstromingskansbenadering. In het programma BOI 2020-2023 zijn verschillende onderdelen van het instrumentarium doorontwikkeld en in de komende jaren wordt er verder aan gewerkt. Meer informatie is te vinden in het BOI-portaal van het Informatiepunt Leefomgeving (IPL): [www.iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/primaire-waterkeringen/boi-portaal/beoordelings-ontwerpinstrumentarium-boi/](http://www.iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/primaire-waterkeringen/boi-portaal/beoordelings-ontwerpinstrumentarium-boi/).

De gegevens over de belasting op de waterkering (bijvoorbeeld golfcondities en waterstanden) die nodig zijn voor de beoordeling, worden aangeleverd in de hydraulische belastingendatabase. De beheerders van de waterkering zijn verantwoordelijk voor gegevens over de actuele fysieke toestand van de waterkering.

---

<sup>1</sup> <https://iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/primaire-waterkeringen/beoordelen-primaire-waterkeringen/>

De methode van beoordeling hangt in grote mate af van de soort waterkering. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen:

- dijken & dammen,
- duinen (ook wel duinwaterkeringen genoemd)
- waterkerende kunstwerken (bijvoorbeeld sluizen of kademuren) en
- niet waterkerende objecten (NWO's, zoals kabels en leidingen).

Voor al deze categorieën zijn beoordelingsinstrumenten beschreven in het BOI.

De primaire waterkeringen zijn voor ongeveer 90% bij de waterschappen en voor ongeveer 10% bij Rijkswaterstaat in beheer. Op dit moment is de dijk van Ameland in beheer bij het Wetterskip Fryslân en de duinwaterkering in beheer bij Rijkswaterstaat. Zij zijn verantwoordelijk voor het (laten) uitvoeren van de beoordeling en de beschikbaarheid van de actuele gegevens van de waterkering. In het volgende tekstkader staan begrippen die in het waterveiligheidsbeleid gebruikt worden toegelicht.

De beoordeling van de waterkering van Ameland is uitgewerkt in paragraaf 4.2.3.

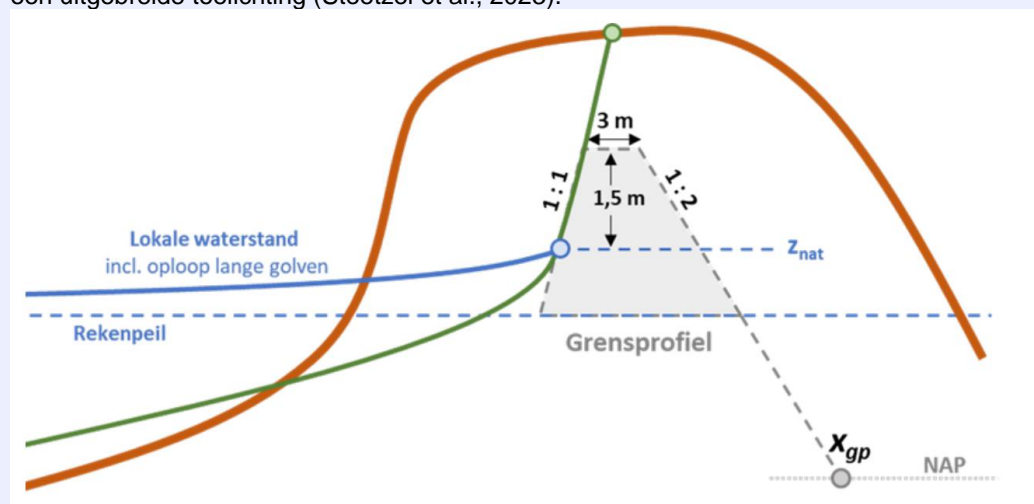
### Begrippenlijst Beoordeling Waterkering

#### *Aansluitingsconstructie*

Een aansluitingsconstructie is een overgang (aansluiting) tussen twee verschillende type waterkeringen, vaak tussen een duin en een dijk.

#### *Grensprofiel*

Het grensprofiel is een pragmatische wijze om aan te tonen dat er een minimaal volume zand in het profiel aanwezig is tijdens en na het initiële faalmechanisme duinafslag om de wettelijke veiligheid van het binnendijks gelegen gebied te waarborgen. De rol en definitie van het grensprofiel is in het BOI (2023-2035) minder strikt voorgeschreven dan in het WBI, zie voor een uitgebreide toelichting (Steetzel et al., 2023).



Bron: Steetzel et al. (2023). De rode lijn is het duinprofiel en de groene lijn het afslagprofiel.

#### *Hybride kering*

Dit is een kering die bestaat uit een combinatie van twee type waterkeringen die de waterveiligheid waarborgen, bijvoorbeeld een dijk achter een duinenrij of een dijk-in-duin constructie.

#### *Legger*

De legger van de primaire waterkering registreert de precieze ligging van de waterkering. Leggers kunnen de vorm hebben van een kaartenboek of een digitaal (GIS) bestand. De Waterwet verplicht sinds 2009 dat er voor elk waterstaatswerk een legger wordt opgesteld.



#### *Omgevingswaarde*

Een omgevingswaarde legt de kwaliteit vast voor de fysieke leefomgeving. Voor waterveiligheid zijn de omgevingswaarden waaraan dijktrajecten in 2050 moeten voldoen vastgelegd in het Besluit kwaliteit leefomgeving (Bkl). De omgevingswaarde voor de meeste dijktrajecten is de maximale toelaatbare 'overstromingskans per jaar'. Voor een aantal dijktrajecten is een andere of aanvullende omgevingswaarde in het Bkl vastgelegd.

#### *Signaleringsparameter*

Gebruikte term om 'de andere parameter voor de signalering over de veiligheid van een dijktraject' aan te duiden. De monitoring van de omgevingswaarden in relatie tot de signaleringsparameters zorgt ervoor dat tijdig maatregelen kunnen worden getroffen om de veiligheid van de primaire waterkeringen te borgen.

#### *Voorland*

Dit is het gebied dat aan de zeezijde van een waterkering gelegen is.

#### *Zeereep*

Dit is de duinenrij die direct aan het strand grenst. Deze kan samenvallen met, of zeewaarts liggen van, de primaire waterkering.

## 4 Gebruiksfuncties van de kust van Ameland

### 4.1 Inleiding

De kustzone is niet alleen belangrijk voor de waterveiligheid, maar biedt ruimte aan vele gebruiksfuncties, zoals natuur, recreatie en drinkwaterwinning. Met die gebruiksfuncties wordt rekening gehouden bij de vaststelling van de Basiskustlijn en het suppletieprogramma. Dit hoofdstuk geeft een overzicht en korte beschrijving van de waterkeringen (paragraaf 4.2), strandrecreatie (paragraaf 4.3), natuur (paragraaf 4.4) en drinkwater (paragraaf 4.5) voor Ameland.

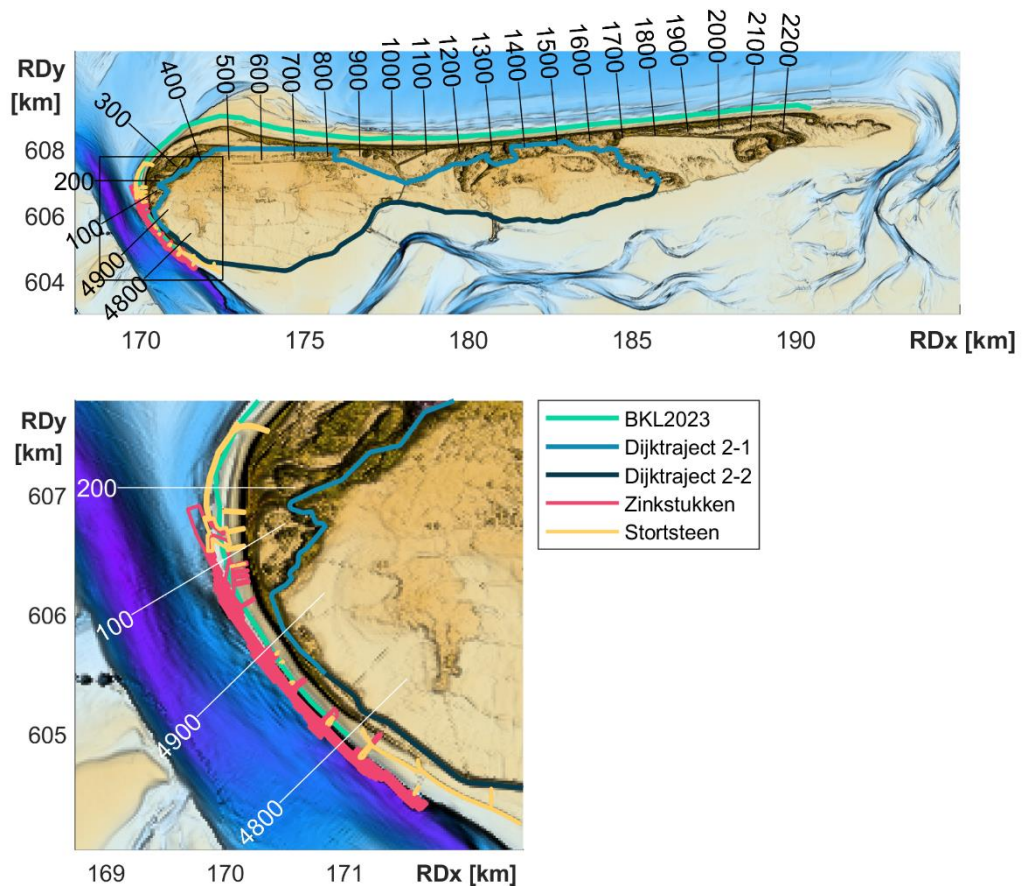
### 4.2 Waterveiligheid

#### 4.2.1 Kustverdedigingswerken

De kustverdediging van west en noordwest Ameland bestaat uit een combinatie van harde kustverdedigingsmaatregelen en het herhaald uitvoeren van zandsuppleties op het strand (Figuur 4-1). Harde verdedigingswerken zijn vooral aangelegd aan de west-zuidwest zijde van Ameland, waar het Borndiep dicht langs het eiland ligt. De eerste harde verdedigingsmaatregelen zijn uitgevoerd in 1947, in de vorm van zinkstukken. In 1979 is dit gevolgd door de aanleg van een stortstenen onderwaterdam en door de aanleg van stortstenen dammen dwars op de kust. Figuur 4-2 geeft een beeld van de aanwezige bestorting en zinkstukken. In 1994 is er voor de laatste keer grootschalig onderhoud uitgevoerd en is de bestaande bestorting aangevuld. Recente metingen laten zien dat het opdringen van het Borndiep vooral richting de Vrijheidsplaat (zie Figuur 2-1 voor locatie) de voet van de bestorting erodeert (zie ook Paragraaf 6.3.2), dat kan resulteren in strandvallen. In de toekomst kan dit problemen geven, omdat de bestorting een essentieel onderdeel is voor de kustveiligheid.



Figuur 4-1: Kustverdediging Ameland. Links: Strandhoofden beschermen de eilandkop ter plaatse van het Borndiep in 1954 (<https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat). Rechtsboven: kustverdediging Ameland-West (satellietdataportaal eind 2022, de blauwe vierkanten geven de ligging van de strandhoofden weer) en uitvoering van een suppletie op de eilandkust in 2019 (satellietdataportaal 2019).



Figuur 4-2: Kustverdediging Ameland; BasisKustLijn (BKL) 2023, overzicht van de zandduinen (dijktraject 2-1), de Waddenzeedijk (dijktraject 2-2), de zinkstukken en het stortsteen voor het gehele kustvak (boven) en ingezoomd op Ameland Zuidwest (onder). De bestanden van de harde kustverdediging zijn op te vragen bij de beheerder (Rijkswaterstaat).

#### 4.2.2 Primaire waterkering

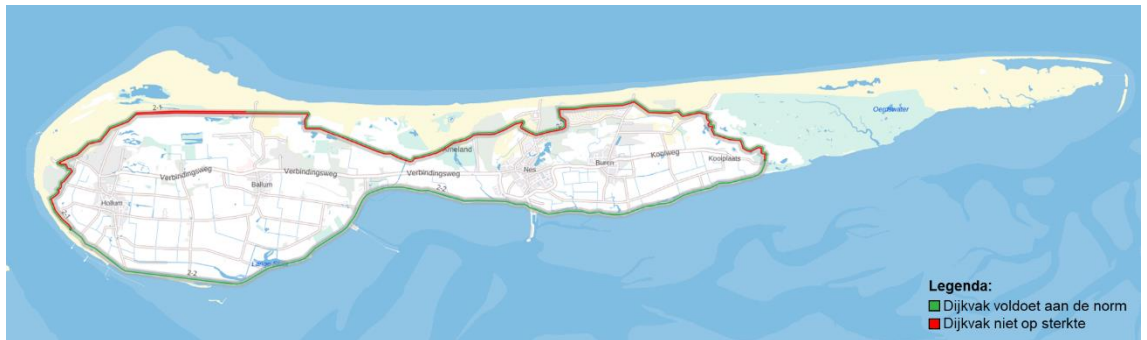
Tegenwoordig wordt de veiligheid tegen overstromingen gewaarborgd door de aanwezigheid van een primaire waterkering bestaande uit duinen en dijken. De primaire waterkering van Ameland bestaat uit twee trajecten: dijktraject 2-1 en 2-2 (Figuur 4-2). Dijktraject 2-1 beslaat de Noordzezijde en bestaat volledig uit duinen. Dit dijktraject is in beheer bij Rijkswaterstaat. Het is 20,19 km lang, heeft een signaleringsparameter van 1:1000 en een omgevingswaarde van 1:300 ([www.waterveiligheidsportaal.nl](http://www.waterveiligheidsportaal.nl)). Dijktraject 2-2 ligt aan de zuidzijde en bestaat uit Waddenzeedijk. Dit dijktraject is in beheer bij het Wetterskip Fryslân. Het is 16,53 km lang en heeft een signaleringsparameter en omgevingswaarde van 1:1000.

#### 4.2.3 Beoordeling van de primaire waterkering

De beoordeling van de normtrajecten van Ameland (2-1 en 2-2) is te vinden in het waterveiligheidsportaal ([www.waterveiligheidsportaal.nl](http://www.waterveiligheidsportaal.nl)). Figuur 4-3 geeft de actuele veiligheidsstatus van de primaire keringen voor Ameland weer.

Op 19 april 2022 is beoordeeld dat dijktraject 2-1 'Duinen Ameland' niet aan de norm voldoet. Twee van de negen beschouwde tracédelen bieden onvoldoende veiligheid tegen overstromen; De primaire duinwaterkering aan de noordwestkant van Ameland, tussen JarKus raai 480 en 680, voldoet niet aan de signaleringwaarde en de ondergrens. De primaire duinwaterkering aan de noordwestkant van Ameland, ten oosten van raai 1700 voldoet niet aan de signaleringswaarde, maar wel aan de ondergrens. Op 20 juni 2022 is beoordeeld dat dijktraject 2-2 'Waddenzeedijk op Ameland' wel aan de norm voldoet. Dit trajectoordeel wordt in hoge mate bepaald door het feit dat de kering recent is versterkt. Deze

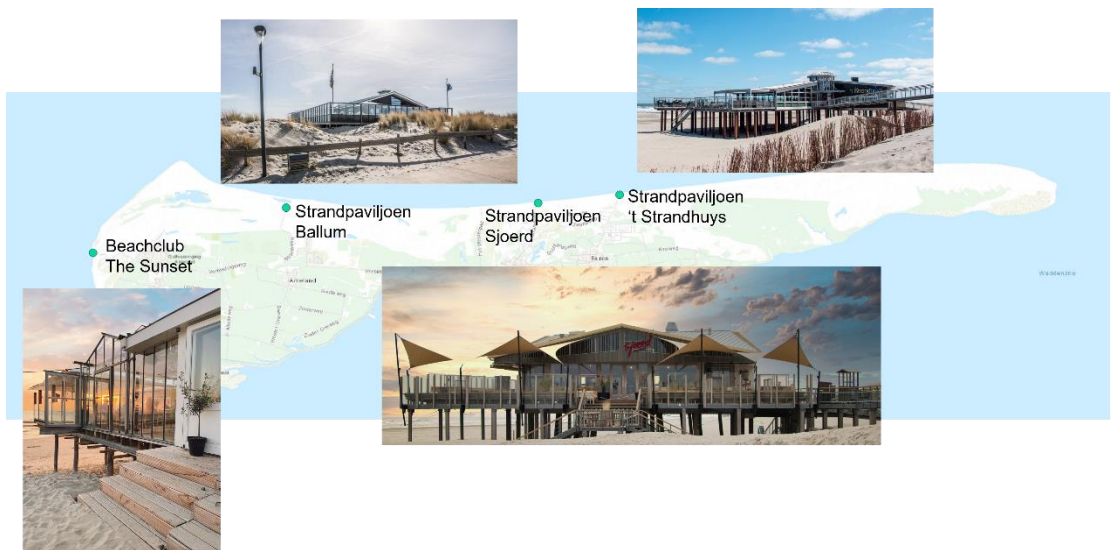
versterking, als onderdeel van het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), betrof het hele normtraject 2-2 en is in 2018 opgeleverd. De kering is voor 50 jaar vooruit ontworpen (planperiode van 2015 tot 2065) op basis van de oude normering (Witteveen en Bos / Wetterskip Fryslân, 2013). In het ontwerp is rekening gehouden met verwachte klimaatveranderingen, zeespiegelstijging en bodemdaling.



Figuur 4-3: Actuele veiligheidsstatus van de primaire keringen voor normtraject 2-1 en 2-2 ([www.waterveiligheidsportaal.nl](http://www.waterveiligheidsportaal.nl), geraadpleegd april 2023).

### 4.3 Strandrecreatie

De stranden van Ameland zijn schoon én veilig, en dragen daarom al meer dan 35 jaar de Blauwe Vlag. Dit is een internationale onderscheiding die elk jaar wordt toegekend aan stranden die veilig en schoon zijn. Ook is Ameland onderscheiden met de gouden Quality Coast Award. In het hoogseizoen wordt het strand Ameland bewaakt door de KNRM. Aan de vlaggen op het strand is te zien of het veilig is om de zee in te gaan. Ten slotte zijn vier jaarrond strandpaviljoens te vinden op het strand van Ameland (Figuur 4-4). Hier kan men zowel zomers als in de winter terecht.



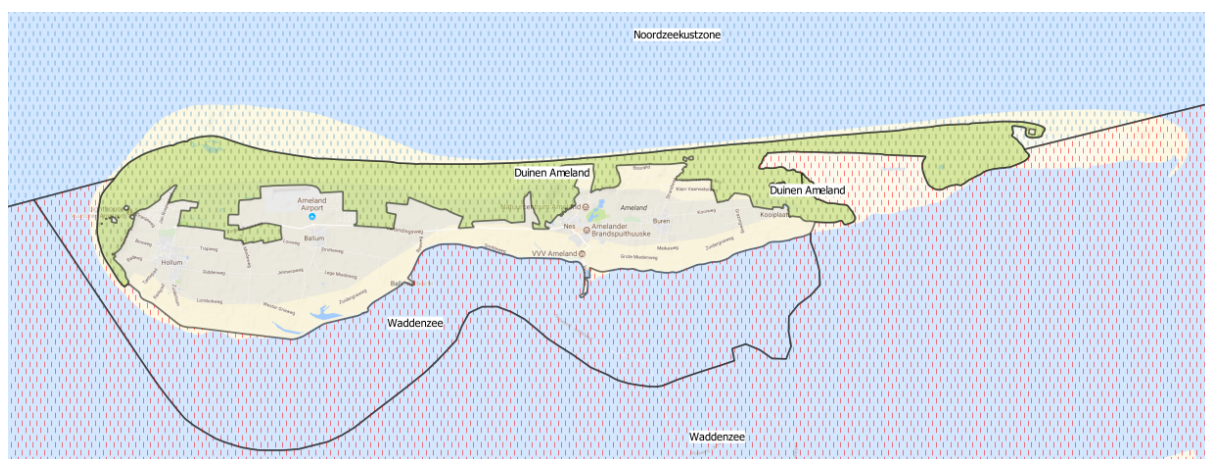
Figuur 4-4: De vier strandpaviljoens van Ameland (foto's: VVV Ameland).



## 4.4 Natuur

### 4.4.1 Natura 2000 wetgeving

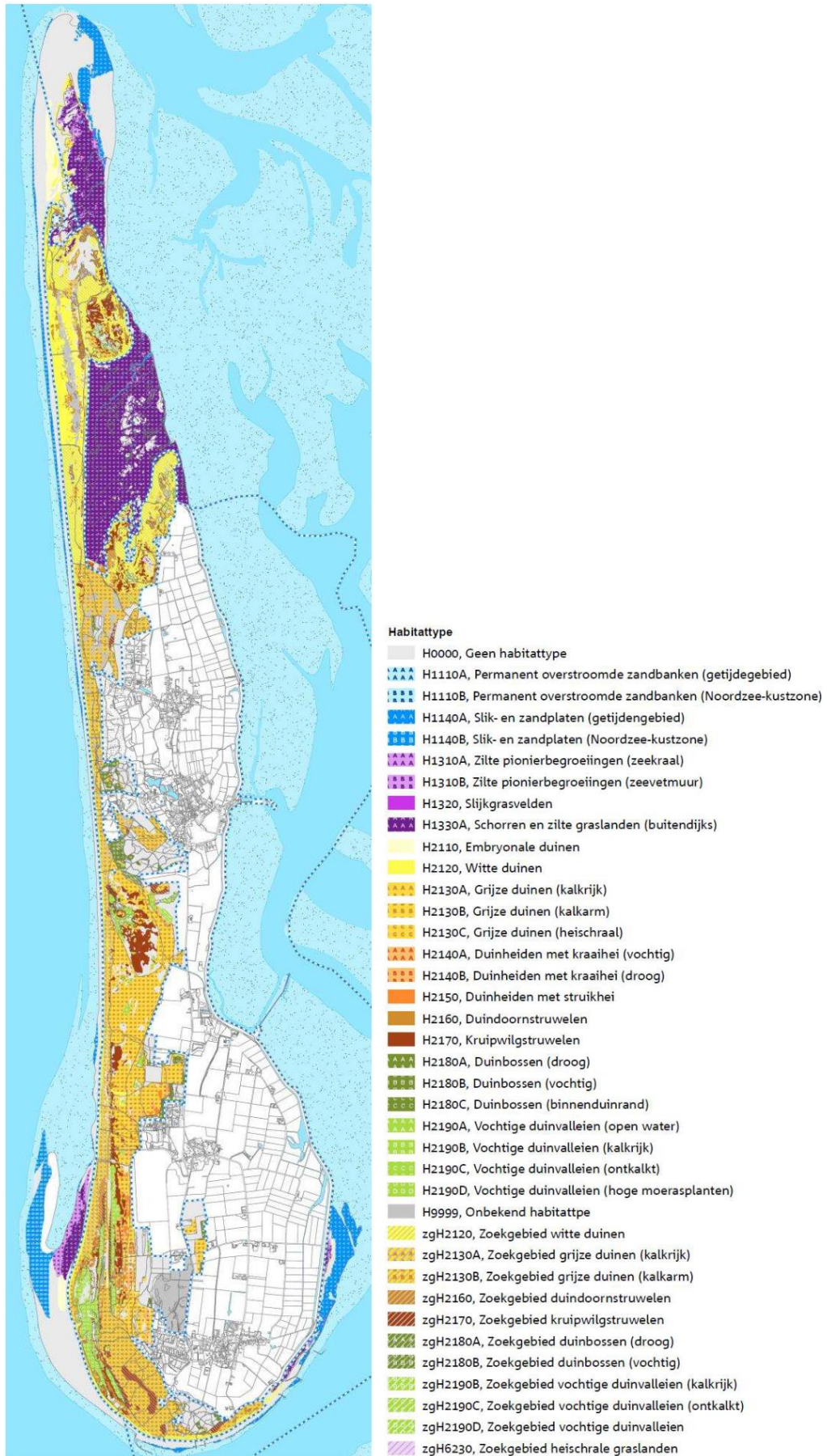
De duinen, het strand en de zee rondom Ameland zijn belangrijke gebieden voor de natuur. Alle delen van het eiland die onder invloed staan van de zee zijn onderdeel van het Natura 2000-gebied Waddenzee. Het duingebied van Ameland dat niet onder invloed van de zee staat is apart aangewezen als Natura 2000-gebied “Duinen Ameland”. De zee en de stranden aan Noordzeezijde behoren tot aan de duinvoet tot het Natura 2000-gebied “Noordzeekustzone” (Figuur 4-5). Het beheerplan is in 2021 verlengd met een periode van 6 jaar met ingang van oktober 2022, dus tot en met juni 2028 tenzij er eerder een nieuw beheerplan wordt vastgesteld (Gedeputeerde Staten van de provincie Fryslân, 2021).



Figuur 4-5: Ligging van de Natura 2000 gebieden Noordzeekustzone, Waddenzee en Duinen Ameland. Bron: GIS-kaart Natura2000 gebieden 17 feb 2017

Voor gedetailleerde informatie over de specifieke gebieden, habitats en soorten wordt geadviseerd de online informatie te raadplegen via de website van Natura 2000 (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Natura 2000-gebieden, zie link hieronder).

Regio	URL
Ameland	<a href="https://www.natura2000.nl/gebieden/friesland/duinen-ameland">https://www.natura2000.nl/gebieden/friesland/duinen-ameland</a>
Waddenzee	<a href="https://www.natura2000.nl/gebieden/friesland/waddenzee">https://www.natura2000.nl/gebieden/friesland/waddenzee</a>
Noordzeekustzone	<a href="https://www.natura2000.nl/gebieden/friesland/noordzeekustzone">https://www.natura2000.nl/gebieden/friesland/noordzeekustzone</a>



Figuur 4-6: Overzicht van de habitattypen op Ameland (Lammerts et al., 2017).



#### 4.4.2 Algemene beschrijving

##### **Duinen Ameland** (*Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Natura 2000-gebieden*)

Het Natura 2000-gebied Duinen Ameland wordt landschappelijk gekenmerkt door een uitgestrekt duingebied dat aan de Noordzeezijde wordt begrensd door het strand en aan de andere kant door open poldergebied, recreatiecomplexen en de kwelders van het Nieuwlandsreid. Het duingebied, dat ook twee bossen omvat, strekt zich uit over de gehele lengte van het eiland en grenst in het oosten aan de zandplaat De Hôn. Het duingebied bestaat uit drie oudere kernen, die door jongere duinreeksen zijn verbonden. De drie kernen zijn de duincomplexen van rond Hollum en ten oosten daarvan, de duinen bij Nes en Buren en het Oerd op de oostpunt. Deze oudere kernen zijn pas in de 19<sup>e</sup> eeuw door stuifdijken verbonden. De laagte tussen Ballum en Nes werd tot in de 19<sup>e</sup> eeuw periodiek doorstroomd. Tussen Hollum en Ballum zijn in het begin van de 19<sup>e</sup> eeuw stuifdijken aangelegd (de Lange Duinen). Ten noorden hiervan is ook nog een primaire vallei ontstaan. Tussen Ballum en Nes is in de tweede helft van de 19<sup>e</sup> eeuw door stuifdijkaanleg en natuurlijke duinvorming een aaneengesloten duinenrij ontstaan. In de duinen van het Klein Vaarwater en de Kooидуinen heeft vrij recent (eerste helft 20<sup>e</sup> eeuw), onder andere als gevolg van (over)begrazing en kustafslag, nog sterke verstuiving plaatsgevonden. Het eiland heeft aan de westkant natte duinvalleien.

##### **Noordzeekustzone** (*Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Natura 2000-gebieden*)

Het Natura 2000-gebied Noordzeekustzone bestaat uit de kustwateren van de Noordzee langs de Noord-Hollandse kust ten noorden van Bergen en langs de hele waddenkust tot aan de Eems. De zeewaartse grens ligt op de doorgaande NAP -20 meter dieptelijn. Langs de Noord-Hollandse vastelandkust ligt de grens aan de landzijde op de laagwaterlijn: het Natura 2000-gebied bestaat daar alleen uit de met water bedekte kustzone. Op de eilanden behoren de stranden tot aan de duinvoet ook tot de Noordzeekustzone. Op de Waddeneilanden ligt de grens op de duinvoet en is daardoor dynamisch: bij duinaangroei verplaatst de grens zich zeewaarts, bij duinafslag landinwaarts met de duinvoet mee.

In de Natura 2000 doelenuitwerking wordt het zeegebied ten noorden van Ameland aangewezen als kansrijk gebied. Het gebied heeft verschillende kwaliteiten, zoals de aanwezigheid van schelpdierbanken en andere kenmerkende soorten bodemdieren met een relatief lange levensduur en opgroeiende vis. In het gebied kwamen schelpdierbanken van *Spisula* voor, tegenwoordig is het vooral *Ensis*. *Spisula* en kleine exemplaren van *Ensis* worden gegeten door onder andere zwarte zee-eenden, die overwinteren in de Noordzeekustzone. Momenteel is dit vrijwel de enige locatie waar zwarte zee-eenden langdurig rusten en foerageren in de Noordzeekustzone. De locatie is daardoor van groot belang voor de zwarte zee-eenden. Belangrijk voor de zwarte zee-eenden is voldoende voedsel en voldoende rust in de winterperiode, zodat de eenden deze schelpdieren kunnen eten.

Het groene strand op de westkant van Ameland omvat verschillende habitattypen, zoals embryonale duinen (Figuur 4-7), zilte pionierbegroeiingen met zeekraal en zeevetmuur en zeer lokaal ook vochtige duinvalleien. Vooral de embryonale duinen zijn van belang als broedgebied van bontbekplevier, strandplevier en dwergstern. Aanvoer van voldoende zand is nodig ter behoud van de embryonale duinen. Ook zijn er maatregelen nodig om te zorgen voor voldoende rust op de (potentiële) broedlocaties tijdens het broedseizoen.

Op de oostpunt van Ameland (ca. JarKus raai 2300-2400) ligt het dynamische gebied de Hôn. Het aanzien van het gebied is aan sterke verandering onderhevig door wind en water en zonder enige vorm van beheer is hier een zone ontstaan met strandvlakte, embryonale

duinen en witte duinen. Aanvoer van voldoende zand en een ongestoorde, natuurlijke ontwikkeling zijn de belangrijkste voorwaarden voor behoud van het habitattype. Deze zone is een potentiële broedplek voor strandplevier en dwergstern, mits er voldoende rust is tijdens het broedseizoen en de embryonale duinen zich ongestoord kunnen ontwikkelen.



*Figuur 4-7: Embryonale duinen op Noordwest Ameland (foto Jaap Hofker, Ameland)*

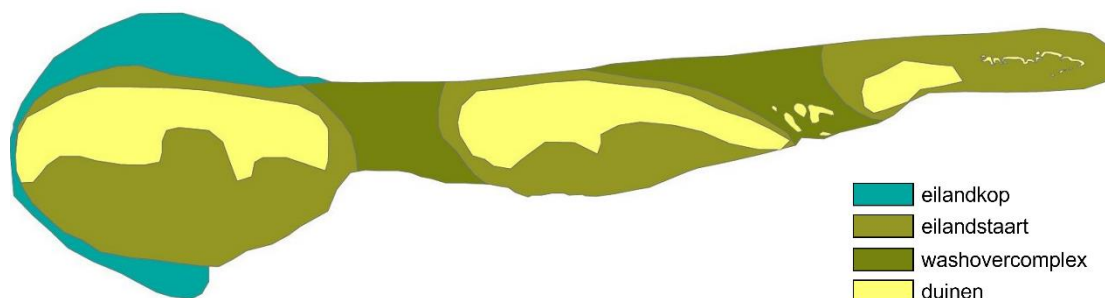
**Waddenzee (Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, Natura 2000-gebieden)**

Het Nederlandse deel van de Waddenzee is een dynamisch zoutwatergetijdengebied tussen de vastelandskust van Groningen, Friesland en Noord-Holland enerzijds en duin en stranden van de eilanden Texel, Vlieland, Terschelling, Ameland, Schiermonnikoog en Rottum anderzijds. Kleine, ingesloten duincomplexen op de kwelders van de Waddeneilanden, alsmede de gehele eilanden Griend, Rottumerplaat en Rottumeroog (inclusief Zuiderduinen) horen eveneens bij het Natura 2000-gebied Waddenzee. De niet onder invloed van zeewater staande delen van Texel, Vlieland, Terschelling, Ameland en Schiermonnikoog zijn elk voor zich apart aangewezen als zelfstandig Natura 2000-gebied.

Door de getijdenwerking is er een complex systeem van geulen, ondiep water en zand- en slibbanken ontstaan. Langs de randen van het gebied zijn in het verleden grote kweldergebieden ontstaan. Deze oude kwelders zijn bijna allemaal ingepolderd, maar vanaf ongeveer het jaar 1900 zijn ook nieuwe kwelders ontstaan. Op de Waddeneilanden gebeurde dat door de aanleg van stuifdijken aan de uiteinden (vooral de oostzijde) van de eilanden. Deze platen lagen al wel hoog genoeg voor vorming van kwelders, maar voordat de stuifdijken waren aangelegd was het milieu te dynamisch voor kwelderplanten. De stuifdijken worden momenteel niet meer onderhouden, en op de oostpunten van Ameland en Schiermonnikoog zijn openingen (stormvloedgeulen) ontstaan. De toegenomen dynamiek heeft tot nog toe niet geleid tot kwelderverlies.

#### 4.4.3 Landschapsecologische elementen

Anders dan op de westelijk gelegen eilanden Vlieland en Terschelling, zijn op Ameland de hoofdelementen van een natuurlijk functionerend Waddeneiland (modeleiland, Löffler e.a., 2008) te herkennen. Vergeleken met de oostelijker gelegen eilanden wijkt Ameland weer af door de complexere opbouw. Deze bestaat namelijk uit een zich herhalende reeks van dezelfde hoofdelementen (zie Figuur 4-8): maar liefst drie duinboogcomplexen en twee voormalige overslagvlakten (*washovercomplexen*) worden door de eilandkop in het westen en de eilandstaart in het oosten begrensd. Dit is anders dan bij Schiermonnikoog en ook op bijvoorbeeld de Duitse eilanden Borkum, Langeoog en Spiekeroog. Deze hebben een meer klassieke opbouw van het modeleiland elk met één duinboog- en één washovercomplex tussen eilandkop en -staart.

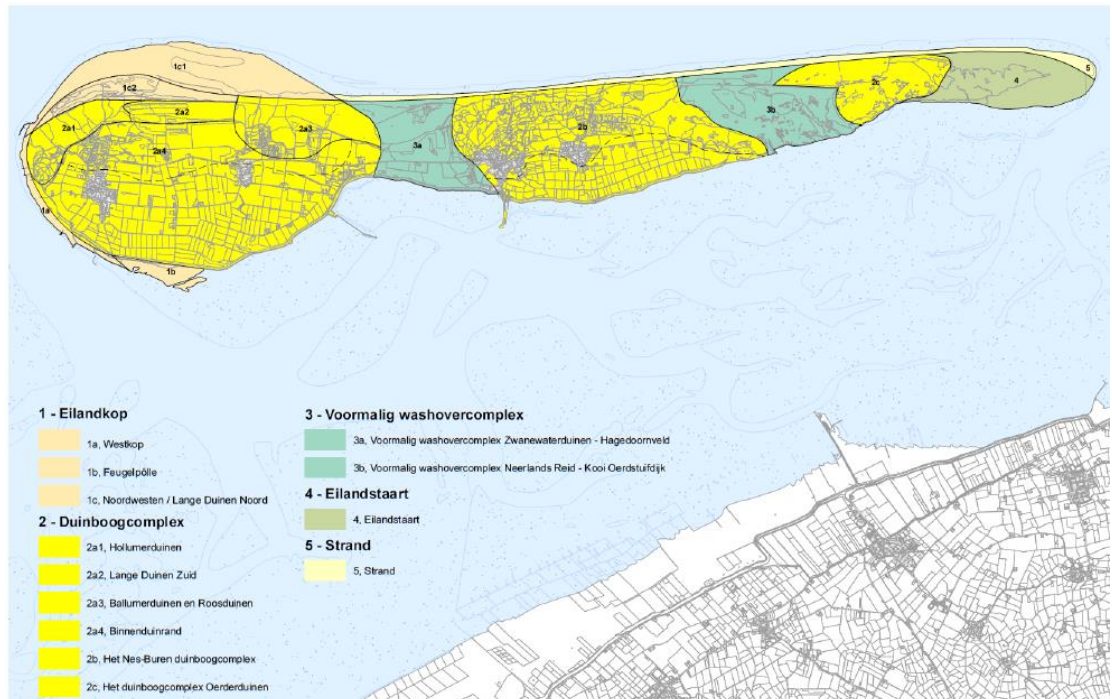


Figuur 4-8: Modeleiland geprojecteerd op Ameland. Strand en vooroever zijn niet apart aangegeven op de kaart (Bron: Gebiedsanalyse, 2017).

Aan de hand van het modeleiland kunnen op Ameland vijf deelgebieden worden onderscheiden (Figuur 4-9):

1. Eilandkop inclusief Lange Duinen Noord, Tonneduinen en Vrijheidsplaat
  - a. Feugelpôle.
  - b. Westkop
  - c. Noordwesten / Lange Duinen Noord
2. Drie duinboogcomplexen:
  - a. Het Hollum-Ballum duinboogcomplex
  - b. Het Nes-Buren duinboogcomplex, inclusief de Kooiduinen.
  - c. Het duinboogcomplex Oerderduinen.
3. Twee (voormalige) washovercomplexen:
  - a. Het voormalig washovercomplex bestaande uit de Zwanewaterduinen inclusief het Hagedoornveld.
  - b. Het voormalig washovercomplex bestaande uit Neerlands Reid met de duinreeksen c.q. stuifdijken en tussenliggende duinvalleien ten noorden van de Kooi Oerdstuifdijk.
4. Eilandstaart De Hôn.
5. Strand en vooroever: het Noordzeestrand en de vooroever langs het gehele eiland.

Voor een gedetailleerde beschrijving van deze landschapselementen wordt verwezen naar de Gebiedsanalyse 2017 (Lammerts et al., 2017).



Figuur 4-9: Landschapsecologische gebiedsindeling Ameland (bron: Gebiedsanalyse (Lammerts et al., 2017)).

#### 4.4.4 Geomorfologie en reliëf

Deze paragraaf is grotendeels overgenomen uit de Gebiedsanalyse (Lammerts et al., 2017).

De omvang van het eiland neemt duidelijk van west naar oost af. Dit hangt samen met het feit dat door periodieke aangroei en afslag van de eilandkop telkens opnieuw vanuit het westen zand aangevoerd wordt. De afzetting van zand is in de oostelijker gelegen duinboogcomplexen duidelijk minder geweest omdat deze vanuit de Noordzee in west-oost richting plaatsvindt en dus min of meer in de lengterichting langs deze complexen “scheert”. Bovendien liggen de duinmassieven in het oosten enigszins in de luwte van de westelijk gelegen duinen waardoor hier ook de aanstuiving altijd minder is (geweest). Een en ander is op de actuele luchtfoto (Figuur 4-10A) en hoogtekaart (Figuur 4-10B) goed waar te nemen.





Figuur 4-10: Ameland met de drie duinboogcomplexen en daartussen twee (voormalige) washovercomplexen met A) actuele luchtfoto en B) actuele hoogtekartaart.

#### 4.4.5

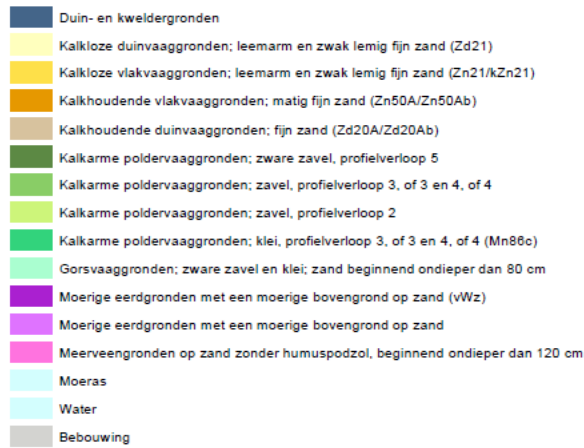
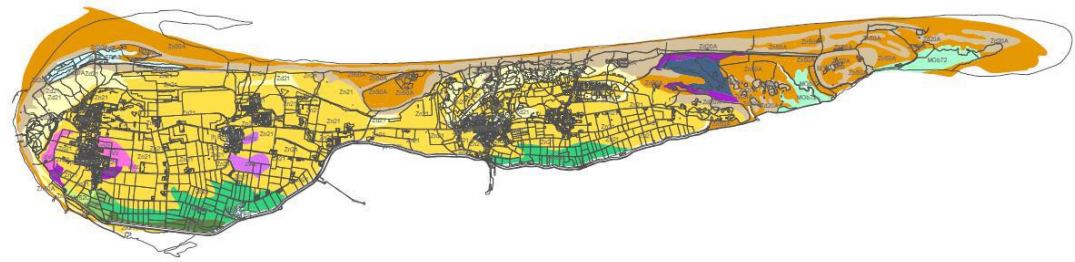
##### **Bodem**

Het overgrote deel van het (oude) duin- en poldergebied is diep ontkalkt en bestaat uit fijnzandige bodems. Vanwege de relatief lage ligging wordt het grootste deel ingenomen door enigszins vochtige vlakvaaggronden (Zn21) (Figuur 4-11). In de oudere hogere duingebieden bij Hollum en Nes-Buren komen duinvaaggronden (Zd21) voor. Deze bestaan uit leemarm en zwak lemig zand.

Langs de noordelijke en westelijke rand wordt het oude duingebied omringd door één of meerdere jonge duinruggen met kalkhoudend fijn zand (kalkhoudende duinvaaggronden: zonder (Zd20A) en met ontkalkte bovengrond (Zd20Ab)). In de lagere delen, langs de zeereep en tussen de ruggen in liggen kalkhoudende vlakvaaggronden. Deze bestaan uit matig fijn zand: zonder (Zn50A) en met ontkalkte bovengrond (Zn50Ab). Deze afwisseling van vochtige en droge kalkhoudende (en deels ontkalkte) duingronden wordt met name aangetroffen in de gebieden van de Lange Duinen, de Zwanewaterduinen, de oostzijde van de Kooiduinen en in het gebied van het Oerd.

De zandplaten langs de periferie van het eiland bestaan uit kalkhoudende vlakvaaggronden (Zn50A) met uitzondering van de zandplaat langs de wadzijde bij de Feugelpôle (kalkloze vaaggrond: Zn21).

Langs de oostrand van de Kooiduinen en in de hoek tussen de Kooiduinen en de Kooi-Oerdstuifdijk heeft zich een strook aan (brakke) moerige gronden ontwikkeld (vWz).



Figuur 4-11: Bodemkaart Ameland (Van Oosten, 1986 in Rus & Bakker, 2012)

## 4.5 Drinkwaterwinning

Ameland was het laatste Waddeneiland waar een waterleiding werd aangelegd in 1961. Destijds waren de watervoorraden in de zoetwaterbellen onder de duinen voldoende voor iedereen op het eiland. Doordat het aantal toeristen elk jaar toenam, nam de druk op het drinkwateraanbod, met name in de zomer, toe. Daarom werd er in 1990 een waterleiding (de Wadleiding) aangelegd vanaf het vasteland. Ameland levert nu zelf een derde van het drinkwater. Dit water komt uit de duinen; Vitens heeft er twee pompstations, een bij Hollum en een bij Buren. De rest van het drinkwater wordt aangevoerd vanuit Friesland (Peters, 2013). Als Ameland zelf nog meer zoetwater zou winnen voor drinkwaterdoeleinden kan dit een aantasting van de ecologische kwaliteit op het eiland betekenen.



# 5 Langetermijnontwikkelingen

## 5.1 Inleiding

De kennis over de langetermijnontwikkelingen van Ameland is relevant voor het beheer van de kust. De paragraaf over de paleografische ontwikkeling (5.2) schetst hoe het landschap van Ameland er gedurende de afgelopen duizenden jaren heeft uitgezien en hoe het de huidige vorm heeft gekregen. Paragraaf 5.3 behandelt de bodemdaling en de invloed ervan op de relatieve zeespiegelstijging en de sedimentbehoefte van het kustfundament.

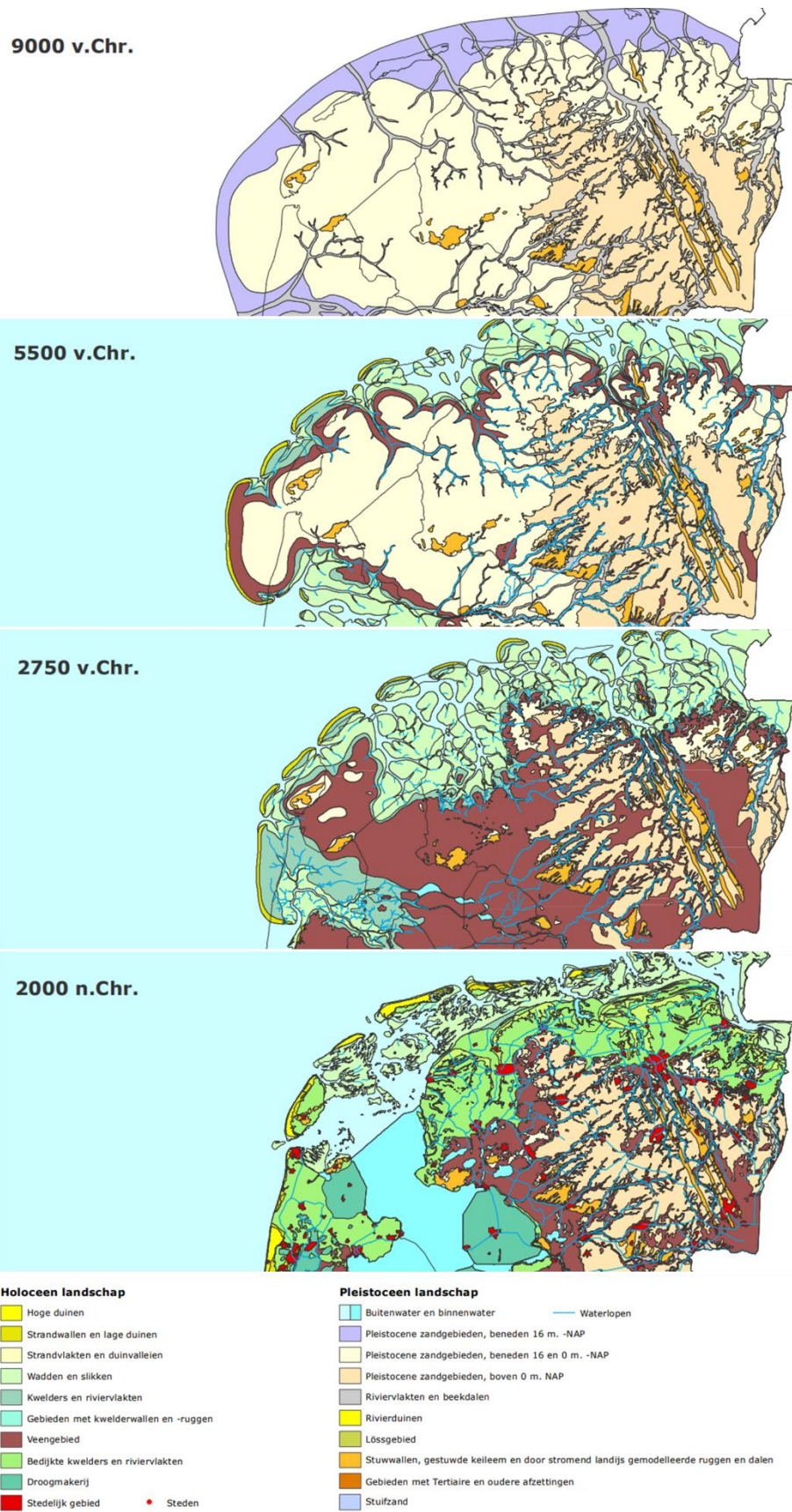
## 5.2 Paleografische ontwikkeling

Het oostelijke Waddengebied is een vrij eenvormig deel van de Nederlandse kust met barrière-eilanden die de dynamische scheiding tussen de Noordzee en de Waddenzee vormen. Tussen de eilanden liggen getijdengeulen die zich in de Waddenzee vertakken om uiteindelijk tegen de zeedijken uit te lopen. Zeewaarts van de eilanden monden de ebgeulen uit op zogenoemde buitendelta's. Er bestaan goede aanwijzingen dat dit systeem van eilanden, platen en geulen zich al vroeg in het Holoceen gevestigd heeft en maar weinig veranderd is. Wel zorgden door de tijd veranderende randvoorwaarden (zoals snelheid van de zeespiegelstijging, sedimentaanvoer, stormklimaat) ervoor dat de dynamiek van het systeem langzaam iets veranderde. Zo is bijvoorbeeld de afstand tussen de eilanden en de kust over duizenden jaren kleiner geworden en zijn mogelijkheden om slib te bergen tegenwoordig sterk gereduceerd (door alle indijkingen). Daarnaast zijn (delen van) kustlijnen vastgelegd door dijk aanleg en door handhaving van de BKL.

Factoren die in de oostelijke Waddenzee een rol speelden bij de paleogeografische ontwikkeling zijn, net als die in andere kustvakken van de Nederlandse kust:

- de ligging van het landoppervlak aan het einde van het Pleistoceen, ongeveer 11.000 jaar geleden;
- de verschillende tijdstippen en manieren van opvullen van de voormalige getijdensystemen in het gebied;
- de vorming van het veen achter de kust; en
- de acties van de mens, die door de tijd sterk toenamen in intensiteit, reikwijdte en schaal.

Voor de algemene ontwikkeling van de paleogeografie wordt verwezen naar Figuur 5-1: het land verdrinkt in stappen over een periode van ca. 5000 jaar. Opvallend daarbij is de continuïteit in organisatie van het kuststelsel door de tientallen eeuwen heen. In de volgende paragrafen worden de pleistocene en subrecente ontwikkelingen van het Waddengebied beschreven. Belangrijke bronnen hiervoor zijn het geologisch onderzoek van het Nederlandse Waddengebied door Van Staalduinen (1977) evenals de beschrijving van de ontwikkeling van het Waddengebied in tijd en ruimte door Speelman et al. (2009).



Figuur 5-1: Paleogeografische kaarten van de Waddenzee (Rijksdienst voor het Cultureel Erfgoed, TNO en Deltares, 2022). Voor meer kaarten zie: [www.cultureelerfgoed.nl](http://www.cultureelerfgoed.nl)

### 5.2.1 Pleistocene ontwikkeling

Een eerste blik op de paleogeografische kaarten van het Waddengebied (Figuur 5-1) leert dat de vorm en ligging van het Pleistocene achterland (ruwweg al het land boven + 1 m NAP) een erg belangrijke rol speelt en zeer waarschijnlijk ook heeft gespeeld in de paleogeografische ontwikkelingen van het gebied. Aan de westzijde van de Waddenzee komen hooggelegen stuwwalresten voor (Texel, Wieringen, Gaasterland). Deze relatief hooggelegen bulten van zand en keileem maken deel uit van een uitgestrekte west-oost verlopende gordel van stuwwallen uit het Saalien (einde ca. 120.000 jaar geleden), die vanuit de Noordzee, door Nederland heen de Noord-Duitse laagvlakte in lopen. Het zijn overblijfselen van een sterk geaccidenteerd landschap dat door de toenmalige gletsjers omhoog is gedrukt, met initiële hoogteverschillen van meer dan 200 m tussen de toppen van de stuwwallen en de bodems van de tussengelegen bekkens (in Nederland het Bekken van Amsterdam, Eemvallei en het IJsseldal). Veel van de hoogteverschillen zijn tijdens de opvolgende warme periode van het Eemien en koude periode van het Weichselien sterk verminderd, maar ze zijn nog steeds niet verdwenen. Gedurende het Weichselien zijn de rivieren die o.a. het Drents plateau afwaterden, sterk ingesneden in de ondergrond. Aan het begin van het Holoceen, zo'n 11.000 jaar geleden, waren die ingesneden rivierdalen uiteraard de aangrijpingspunten voor de stijgende zeespiegel om het land binnen te dringen, met het Hunze- en het Eemsdal als de voornaamste (Figuur 5-1 linksboven). Het Basisveen, dat waarschijnlijk vrijwel overal heeft bestaan en de daarop afgezette oudere Holocene afzettingen, zijn bijna overal geërodeerd door de geulen, die het sediment van de oudere getijdenafzettingen naar binnen brachten. De oudere geulen volgden uiteraard de Pleistocene oppervlakte-morfologie, maar de ligging van de jongere geulen is daar veel minder door beïnvloed. Die sloten aan op riviertjes waarvan de erosiebasis inmiddels met 20 m of meer omhoog was getrokken (Figuur 5-1 rechtsboven).

In de periode tussen de vorming van de oude en de jonge getijdensystemen, ruwweg het Subboreaal (van ca. 5660 tot 2400 jaar vóór heden, zie Figuur 5-1 linksonder) is veen tot ontwikkeling gekomen. Hier en daar zijn daar nog stukken van bewaard, maar de jonge geulen hebben er ook veel van opgeruimd. Verder landwaarts zijn meer voormalige veengebieden onder de jonge getijdenafzettingen bewaard. Waar de geulen van jonge getijdenafzettingen eroderend hebben gewerkt, is het erg lastig op lithologische gronden onderscheid te maken tussen oude en jonge getijdenafzettingen (van Staalduinen et al., 1977).

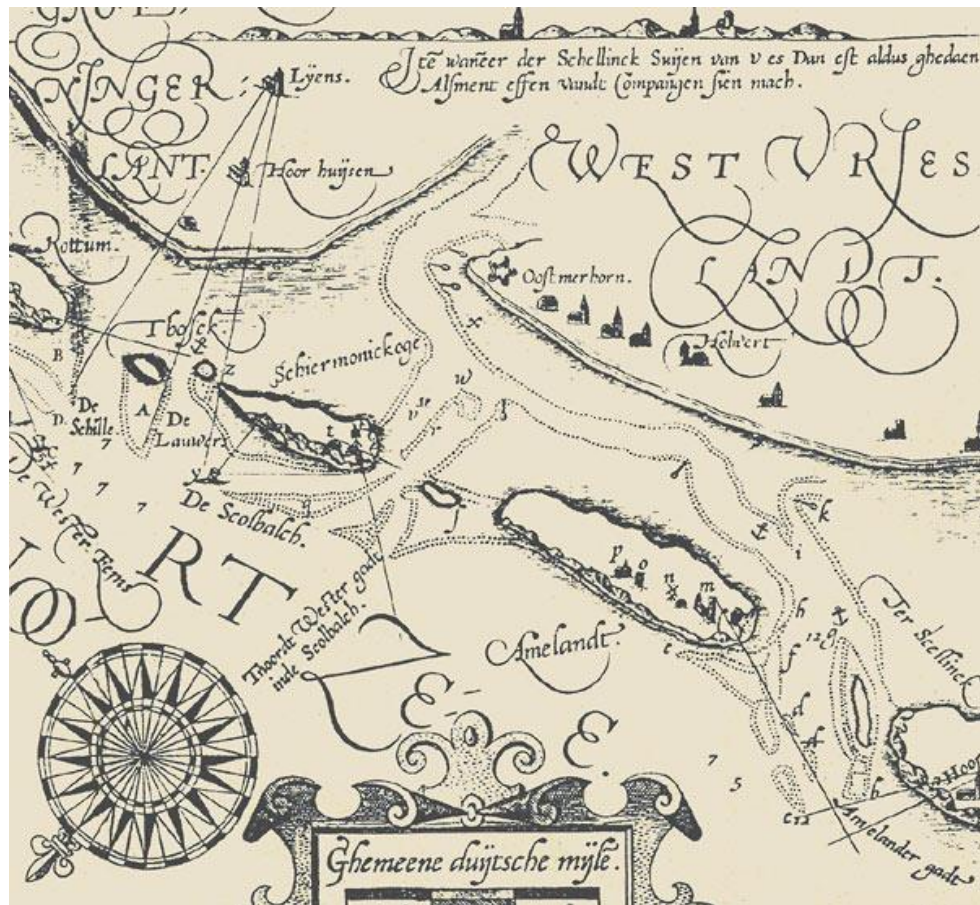
Er wordt aangenomen dat de Waddeneilanden al zeer lange tijd aanwezig waren: men spreekt van 6000 jaar. Daar is erg weinig geologisch bewijs voor te vinden en nog veel minder archeologisch bewijs. Dat is niet zo vreemd, omdat de positie van de eilanden in dit oostelijke waddengebied een tiental kilometers naar het noorden moet hebben gelegen, waarna het zuidwaarts opschuiven van het kustprofiel voor veel erosie zorgde (Van Heteren en Van der Spek, 2003). Oudere posities van de eilanden worden vooral afgeleid uit de ligging van de getijdengeulen van de eerste generatie (Vos en de Vries, 2013). Het aantal Waddeneilanden in de paleogeografische reconstructies neemt volgens Vos en Knol (2015) af over de tijd.

Vanaf 3000 jaar vóór heden kon de sedimentatie de zeespiegelstijging bijhouden en was er ook genoeg sediment om geulen die het binnenland instaken, te doen verlanden. De doorgaande langzame landwaartse migratie van de Waddeneilanden verkleinde de afstand van de Noordzeekust tot het achterland. De getijdengeulen liepen minder ver het land in en door stagnerende waterafvoer trad veenvorming op grote schaal op, als gevolg van de afzetting van dikke pakketten kwelderklei in het zeewaartse deel van de getijdenbekkens.

De oudst bewaard gebleven delen van de eilanden Terschelling en Ameland waarvoor geologisch bewijs is verzameld, dateren uit laat-Romeinse en Vroegmiddeleeuwse periode



(De Jong, 1984; Van Staalduinen et al., 1977). Opvallend is dat zeer weinig bekend is over oudere geullopen dan die uit de late Middeleeuwen, toen de eerste kaarten van kustgebieden werden gemaakt en de waterdieptes in de vaargeulen voor het eerst opgetekend werden (midden 16<sup>e</sup> eeuw; Figuur 5-2).



Figuur 5-2: Kaartuitsnede van de kustzone van de oostelijke Waddenzee en de randzone van de Noordzee (Haeyen, 1585) met enkele geuldieptes (in vadem). Zie ook Oost (1995), p.138-139.

Een combinatie van doorzettende zeespiegelstijging en aantasting van grote veenlichamen in het achterland, tegen de pleistocene zandgronden aan zorgde voor erosie en verdere doordringing van de getijdegeulen het binnenland in. Dit proces zette zich voort tot in de Vroege Middeleeuwen. De Lauwerszee is voor een groot deel in deze periode gevormd.

De versmalling van de oostelijke Waddenzee en de vastlegging van de kusten van de Waddeneilanden zijn twee belangrijke factoren voor de huidige situatie in dit gebied. Het is opmerkelijk dat die processen al zo vroeg gestart zijn en nog steeds spelen. De paleogeografische situatie zet zich dus voort in de huidige tijd.

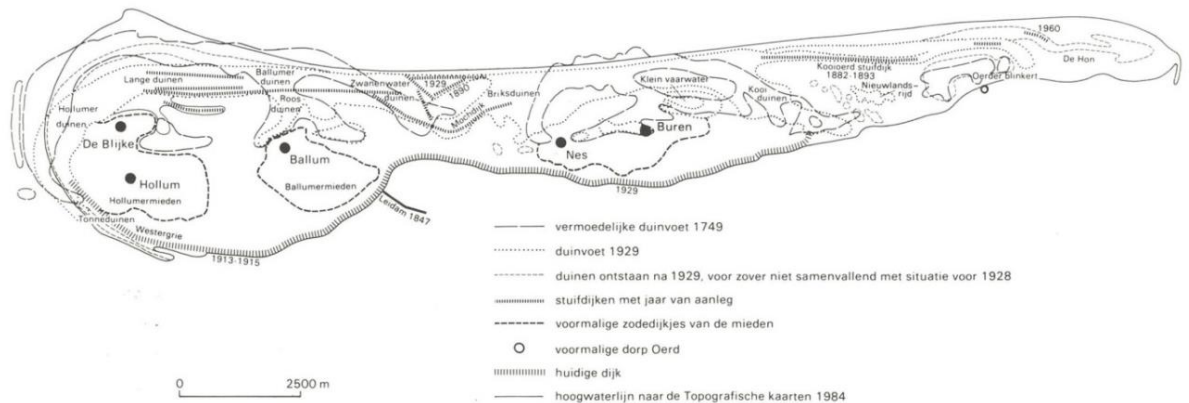
### 5.2.2 Subrecente ontwikkelingen

Tot in de 19<sup>e</sup> eeuw bestond Ameland uit een drietal niet of nauwelijks verbonden boogduincomplexen: dat van Hollum-Ballum, Nes-Buren en het Oerderduin (Figuur 5-3). De eerste twee werden bewoond, het derde complex niet. Tussen de drie boogduincomplexen bevinden zich zogenaemde overwash complexen: tijdens stormen vond via deze laagtes water- en zandtransport plaats van de Noordzeekust naar de Waddenkust; op zo'n moment waren de verbindingen tussen de eilanddelen verbroken. Opvallend is de afname van grootte van de boogduincomplexen van west naar oost.

De grote overwash-geulen bestonden vanaf tenminste het jaar van de eerste tekeningen van het eiland door van Deventer in 1545/59 tot ze werden afgesloten door stuifdijken. Een groot overwashcomplex was aanwezig tussen Ballum en Nes. Het werd in de 19<sup>e</sup> eeuw afgesloten door de aanleg van een serie stuifdijken: een eerste stuifdijk werd hier aangelegd in 1807 en in 1851 verder opgehoogd.

Het andere overwashcomplex, het Reid (ook wel: Neerlands Reid) tussen Buren en het Oerd wordt zelfs al in 1483 genoemd. Na de eerste pogingen om deze af te sluiten in 1855 en 1880, lukte dit uiteindelijk door een stuifdijk aan te leggen in de jaren 1882-1893 (Westhoff et al., 1991; Oost, 1995).

Die stuifdijken zijn in de 19<sup>e</sup> en 20<sup>e</sup> eeuw aangelegd, via paardenkracht met 'molborden'. Nog altijd bestaat de grootschalige morfologie van het eiland uit deze onderdelen. Overwash vond niet meer plaats sinds ca. 1850, behalve via de kleinere overwashkanalen op de staart van het eiland. Tot slot vond het indijken van de kwelder langs de Waddenzee plaats in de vroege 20<sup>e</sup> eeuw.



*Figuur 5-3: De vormverandering van Ameland vanaf de 18e eeuw (naar Westhoff et al., 1991). De individuele duinboogcomplexen blijven door de tijd steeds zichtbaar. Ook nu nog bepalen die boogcomplexen de grootschalige geomorfologie van het eiland, met enkele toevoegingen als de periodieke westelijke aanlanding van zandbanken afkomstig van de ebgetijdendelta en de eilandstaart.*

Samenvattend, het eiland Ameland vertoont het typische beeld van langzame kustlijn-terugtrekking op de lange termijn, die gepaard gaat met stevige erosie aan de westelijke kop van het eiland. Sinds de vastlegging van de kustlijn (1990) is er stabilisatie van het middendeel van de noordelijke kustlijn opgetreden.

### 5.3 Bodemdaling

In Nederland wordt de ligging van het maaiveld en de waterbodem gerelateerd aan het Normaal Amsterdams Peil (NAP). Er zijn momenteel 6 NAP-merken, allemaal gelegen in Midden-Nederland, die als stabiel worden verondersteld en alle andere NAP-merken zijn opgehangen aan deze punten. De laatste landelijke aanpassing van de primaire NAP-merken vond plaats in 2004 na de 5<sup>e</sup> nauwkeurigheidswaterpassing (1996-1999). Ook de jaarlijks gemiddelde zeespiegelstand langs de Nederlandse kust wordt in NAP uitgedrukt; de laatste jaren stond de zee gemiddeld net onder de 0,10 m NAP (Stolte et al., 2023).

Metingen laten zien dat de bodem van Nederland in beweging is, waarbij sommige delen omhoog komen en andere delen juist dalen. De laatste jaren zijn in verschillende rapporten overzichtskaarten voor bodemweging langs de Nederlandse kust gepresenteerd binnen de Bodemdalingsmonitor (Hijma, 2022). De kaarten zijn vooral gemaakt met het oog op het

vaststellen van de bijdrage van bodembewegingen aan relatieve zeespiegelstijging in Nederland en maken het ook mogelijk om bodembewegingsvolumes uit te rekenen. Deze volumes geven inzicht in hoeveel sedimentbehoefte er potentieel is in het kuststelsel als gevolg van bodembewegingen. De kaarten maken onderscheid in geologische en antropogene bodemdaling (Tabel 5-1), uitgesplitst naar de laatste 100, laatste 30 en komende 30 jaar<sup>2</sup>. Hierbij wordt geen rekening gehouden met sedimentatie, het betreft feitelijk de bodembeweging van de top van de Pleistocene afzettingen. Dit betekent dat de verwachte bodemdaling niet gelijk staat aan de feitelijke veranderingen aan het maaiveld of de waterbodembodem. Indien 5 cm bodemdaling optreedt van de top van het Pleistoceen, maar er wordt ook 5 cm zand afgezet, dan is er geen verandering waarneembaar in de ligging van het maaiveld of waterbodembodem. Wel is dan het bodemdalingsvolume bekend dat is opgevuld met sediment.

De verwachte bodemdaling is gebaseerd op gepubliceerde modelberekeningen en kent een grote mate van onzekerheid (+/- 50%), ook al worden de modelresultaten wel vergeleken met de gemeten trends in bodemdaling in de laatste decennia. Er wordt momenteel gewerkt aan de verbetering van de monitoring van bodembeweging langs de Nederlandse kust om de bestaande onzekerheden te verkleinen, waarbij Global Navigation Satellite System (GNSS)-data een steeds grotere rol gaat spelen (Nougues, 2022).

Tabel 5-1: De belangrijkste componenten van bodembeweging in Nederland.

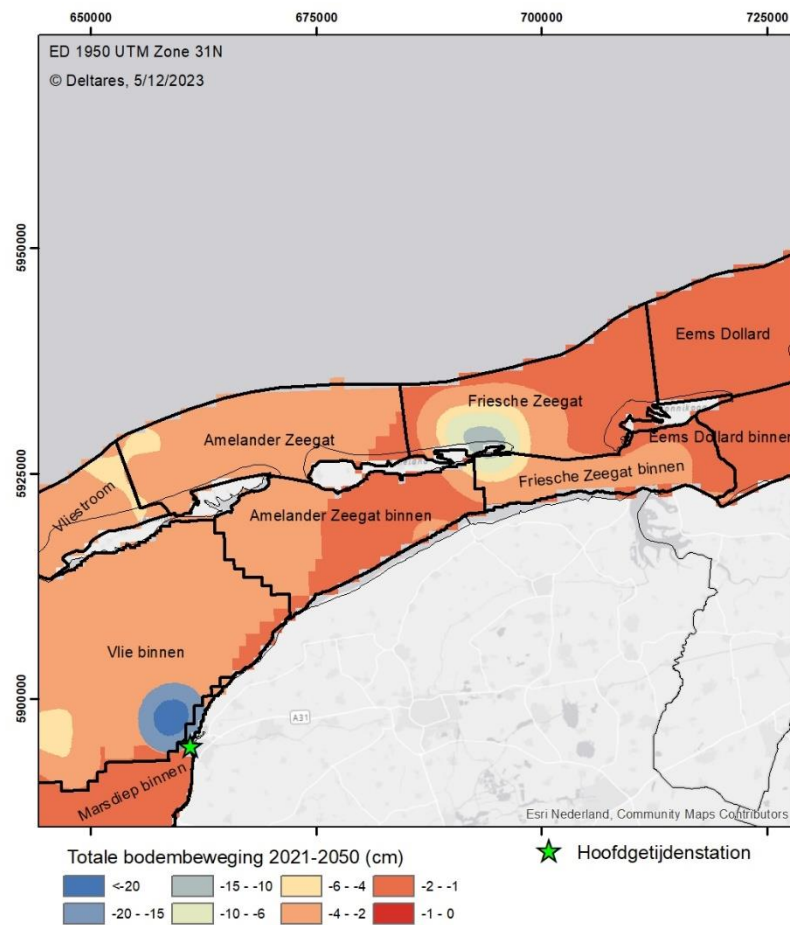
Hoofdoorzaak	Oorzaak	Beschrijving
<b>Geologische bodembeweging</b>	Tektoniek (< 1 cm/eeuw)	Daling of opheffing die wordt veroorzaakt door spanningen in de ca. 100 km dikke Euraziatische aardplaat waar Nederland deel van uitmaakt. De spanningen hangen samen met het naar elkaar toe bewegen van de Afrikaanse en Euraziatische aardplaat en het uit elkaar drijven van Europa en Noord-Amerika.
	Isostasie (2-6 cm/eeuw)	Daling die samenhangt met het terugbuigen van de aardplaat in Noordwest Europa door het afsmelten van de grote ijskappen die in de laatste glaciële periode op Groot-Brittannië en Scandinavië rusten. Bij het ontstaan van de ijskappen was de aardplaat onder het gewicht van het vele ijs doorgebogen. Het proces van herstel (terugbuigen) is nog gaande.
<b>Antropogene bodemdaling</b>	Olie-/gaswinning (cm-dm per eeuw)	Daling aan het maaiveld die wordt veroorzaakt door de drukverlaging in olie- of gasvelden en die zorgt voor samendrukking van de betreffende lagen.
	Zoutwinning (cm-dm per eeuw)	Daling die wordt veroorzaakt door de lage druk in de cavernes die ontstaan door het winnen van zout. De cavernes worden langzaam dichtgedrukt en zorgen voor inzakkings van bovenliggende lagen.
	Grondwaterwinning (cm-dm per eeuw)	Daling die wordt veroorzaakt door de waterdrukverlaging in de bodemlagen in de omgeving van de winning waardoor de laag waaruit wordt gewonnen, maar ook boven en/of onderliggende lagen, worden samengedrukt.
	Peilbeheer (cm-dm per eeuw)	Daling die samenhangt met periodische aanpassing/verlaging (t.o.v. NAP) van het waterpeil in sloten en vaarten in gebieden met maaiveld daling om een gewenste drooglegging (verschil tussen maaiveld en waterpeil) te handhaven.
	Zetting (cm-dm per eeuw)	Daling onder invloed van extra gewicht dat op het maaiveld (of waterbodembodem) wordt aangebracht door de mens en waardoor lagen in de ondergrond worden samengedrukt.

De kaart in Figuur 5-4 is afgeleid van de landelijke kaarten voor bodembeweging langs de Nederlandse kust (Hijma, 2022) en toont de verwachte totale bodemdaling tussen 2021 en

<sup>2</sup> De kaarten worden gemaakt binnen het Bodemdalingsmonitor-programma van B&O Kust en zullen om de zoveel jaar geactualiseerd worden. Actualisaties zullen nodig zijn als bijvoorbeeld modellen voor het berekenen van geologische bodembeweging geoptimaliseerd worden n.a.v. nieuwe inzichten of winningsplannen veranderen.



2050, waarbij is ingezoomd op de omgeving van Ameland. De kaart laat zien dat dit gebied gekenmerkt wordt door sterke bodemdaling in het oosten van Ameland als gevolg van gaswinning, met een maximaal verwachte bodemdaling van 10-12 cm. Rondom Ameland daalt de bodem onder invloed van geologische bodemdaling met circa 2 cm in de periode 2021-2050.



Figuur 5-4: Totale bodembeweging (winning van gas, olie en zout plus de geologische bodemdaling) voor de periode 2021-2050 met de relevante deelgebieden (naar Hijma, 2022).

Tabel 5-2 geeft voor deelgebieden Amelandse Zeegat, Amelandse Zeegat binnen, Friesche Zeegat en Friesche Zeegat Binnen de bodemdalingsgetallen voor de afgelopen en komende 30 jaar. De afname in bodemdaling wordt veroorzaakt door de verwachte afnemende gasproductie.

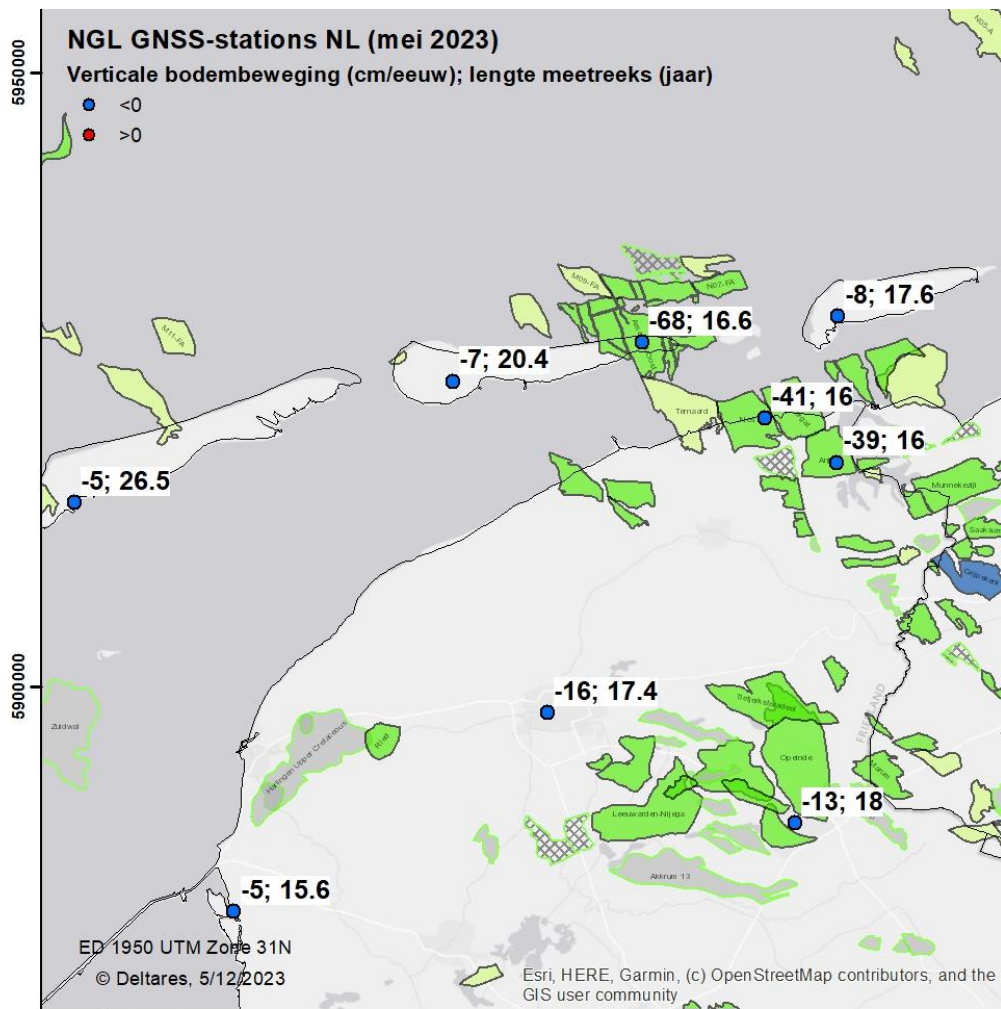
Tabel 5-2: Bodembewegingsgetallen voor de deelgebieden in Figuur 5-4 (deze zijn aangepast ten opzichte van Hijma & Kooi (2018b); zie dat rapport voor onderbouwing van de berekende onzekerheden, zie Hijma (2022) voor de laatst gerapporteerde bodemdalingsvolumes).

Deelgebieden per periode	Gemiddelde geologische bodembeweging (cm)	Gemiddelde bodembeweging door winning van olie, gas en zout (cm)	Gemiddelde bodembewegings-snelheid (cm/jaar)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> )	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm <sup>3</sup> , gem. per jaar)
<i>1991-2020</i>					
Ameland Zeevat	-1.89	-0.16	-0.07	5.85 ± 2.46	0.195 ± 0.082
Ameland Zeevat B.*	-1.77	-0.46	-0.07	6.12 ± 2.28	0.204 ± 0.079
Friesche Zeevat	-1.70	-4.08	-0.19	16.92 ± 3.84	0.564 ± 0.145
Friesche Zeevat B.	-1.66	-4.14	-0.19	9.00 ± 2.04	0.300 ± 0.073
<i>2021-2050</i>					
Ameland Zeevat	-1.89	-0.15	-0.07	5.85 ± 2.46	0.195 ± 0.084
Ameland Zeevat B.	-1.77	-0.21	-0.07	5.40 ± 2.28	0.180 ± 0.080
Friesche Zeevat	-1.70	-1.57	-0.11	9.57 ± 3.33	0.319 ± 0.134
Friesche Zeevat B.	-1.66	-2.26	-0.13	6.09 ± 2.16	0.200 ± 0.079

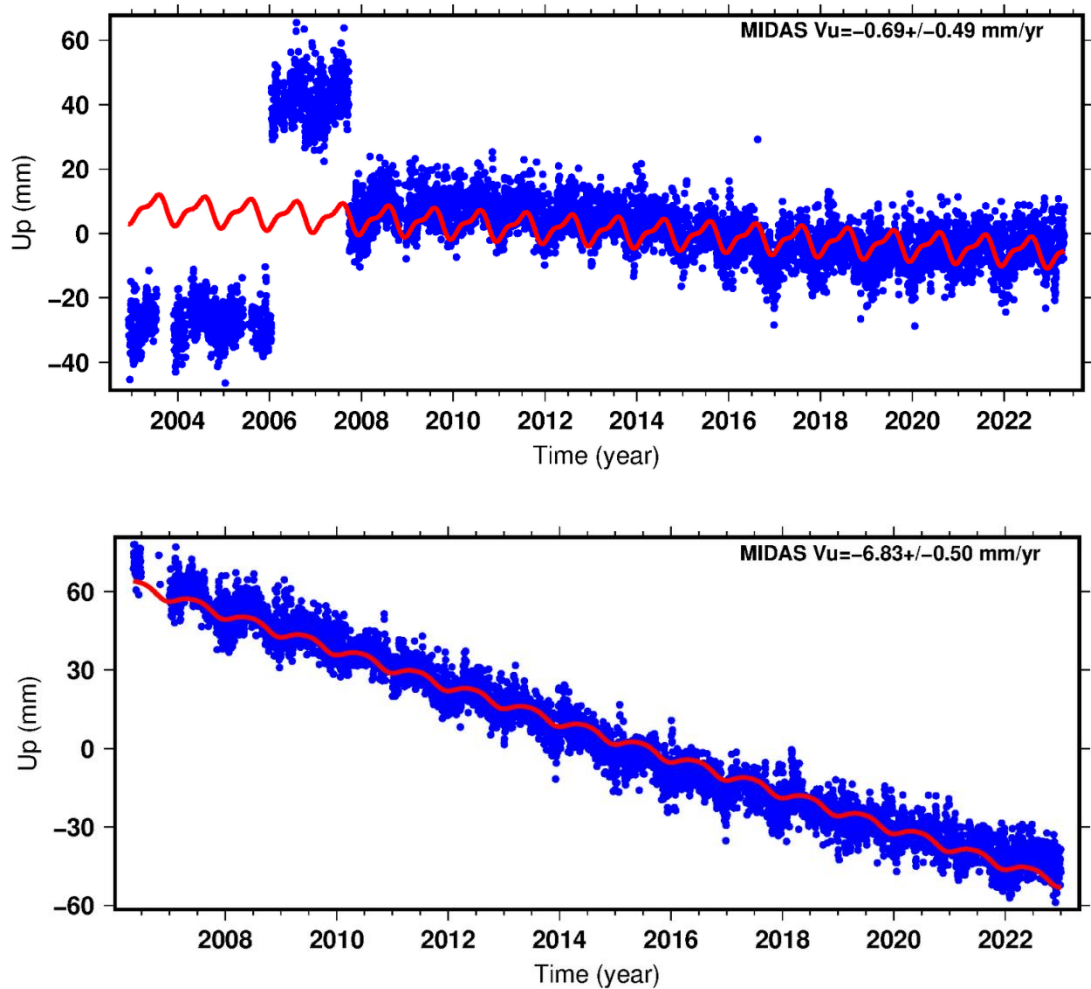
B.\* = Binnen

Op en rond Ameland staan ook GNSS-stations die nauwkeurige hoogtemetingen doen. Belangrijke vragen daarbij zijn altijd wel hoe diep de stations gefundeerd staan en welke bodemdaling ze dus feitelijk meten. Dat is voor vrijwel alle stations echter helaas onbekend (Nougues, 2022). Daarnaast is het essentieel dat aanpassingen aan het station, bijvoorbeeld aanpassingen aan de antenne, goed gedocumenteerd zijn. Figuur 5-5 laat de GNSS-stations op en rond Ameland zien met een meetreeks langer dan 10 jaar: omdat bodembewegingsnelheden laag zijn, is een lange meetreeks nodig om een eventuele trend met enige zekerheid vast te stellen. De data zijn afkomstig van het Nevada Geodetic Laboratory (<http://geodesy.unr.edu/>). De stations geven sterk wisselende snelheden als gevolg van de gaswinning. De stations die niet beïnvloed worden door bodemdaling door gaswinning dalen met snelheden van 5-8 cm/eeuw (Terschelling, Schiermonnikoog, Makkum), in lijn met de gemodelleerde geologische bodemdaling in het gebied (5-6 cm/eeuw). De modellen en de metingen zijn in dit geval dus goed met elkaar in overeenstemming. De stations in de gaswingebieden laten veel hogere snelheden van bodemdaling zien, tot wel 68 cm/eeuw in Ameland-Oost en rond 40 cm/eeuw bij het Lauwersmeer. Figuur 5-6 laat de GNSS-data zien voor twee stations op Ameland. Ameland-West daalt met een constante snelheid onder invloed van geologische bodemdaling, terwijl Ameland-Oost veel sneller daalt door gaswinning. De snelheid van daling in Ameland-Oost lijkt de laatste jaren iets af te nemen. Actuele bodemdalingsdata zijn vanaf eind 2023 openbaar toegankelijk in de Digitale Systeemrapportage Wadden (<https://systeemrapportage.nl/wadden/geologie.html#bodemdaling>).

**Samengevat:** de geologische bodemdaling in het gebied rondom Ameland ligt rond de 5-8 cm/eeuw en is voor Nederland relatief hoog. Door gaswinning dalen delen van Ameland-Oost veel sneller dan dit, met snelheden oplopend tot bijna 70 cm per eeuw. De verwachting is dat de dalingsnelheden hun maximum reeds bereikt hebben en onder invloed van verminderde gasproductie de komende decennia langzaam zullen afnemen. De totale bodemdaling, en dus de bodemdalingsvolumes, zijn voor Nederland relatief fors.



Figuur 5-5: Kaart van omgeving van Ameland met bij ieder GNSS-station de bodemdaling in cm/eeuw. Er worden alleen stations getoond met een meetreeks langer dan 10 jaar. De data is afkomstig van het Nevada Geodetic Laboratory. Ook de ligging van de gasvelden wordt getoond. Donkergroen: actief; lichtgroen: onontwikkeld; grijs: uitgeproduceerd; patroon: tijdelijk niet producerend; donkerblauw: gasopslag.



Figuur 5-6: GNSS-data van het stations op Ameland-West (boven, station BLLM, data gedownload op 12-5-2023 van <http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations/BLLM.sta>) en Ameland-Oost Station (onder, AME1, data gedownload op 12-5-2023 van <http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/stations/AME1.sta>). Het verschil in dalingssnelheid is duidelijk zichtbaar. De blauwe punten zijn de metingen, de rode lijn is de trendlijn.



## 6 Beschrijving van het morfologisch systeem

### 6.1 Hoofdlijnen van het morfologisch gedrag

Ameland is begrensd door twee zeegaten: het Amelander Zeegat aan de westzijde en het Friesche Zeegat aan de oostzijde. Het Friesche Zeegat bestaat weer uit twee aparte zeegaten, van elkaar gescheiden door de Engelsmanplaat. Het westelijke en kleinere zeegat heet het Pinkegat en het oostelijke, grotere zeegat is de Zoutkamperlaag. De morfologische ontwikkelingen van deze zeegaten – deels onder de invloed van de mens – bepalen in grote mate de ontwikkeling van Ameland en de lokale veranderingen bij de eilandkop en -staart. Het centrale kustgedeelte van het eiland, tussen de eiland kop en staart, wordt indirect beïnvloed door de zeegaten. Als onderdeel van de cyclische ontwikkeling van de Amelander buitendelta landen er periodiek grote zandvolumes aan op de noordwestkust van Ameland. Reeds aangelande zandvolumes geven nog steeds een zandimpuls in oostelijke richting. De zandverliezen naar het Pinkegat zijn een mogelijk oorzaak van de grote langstransporten en verliezen van de centrale eilandkust.

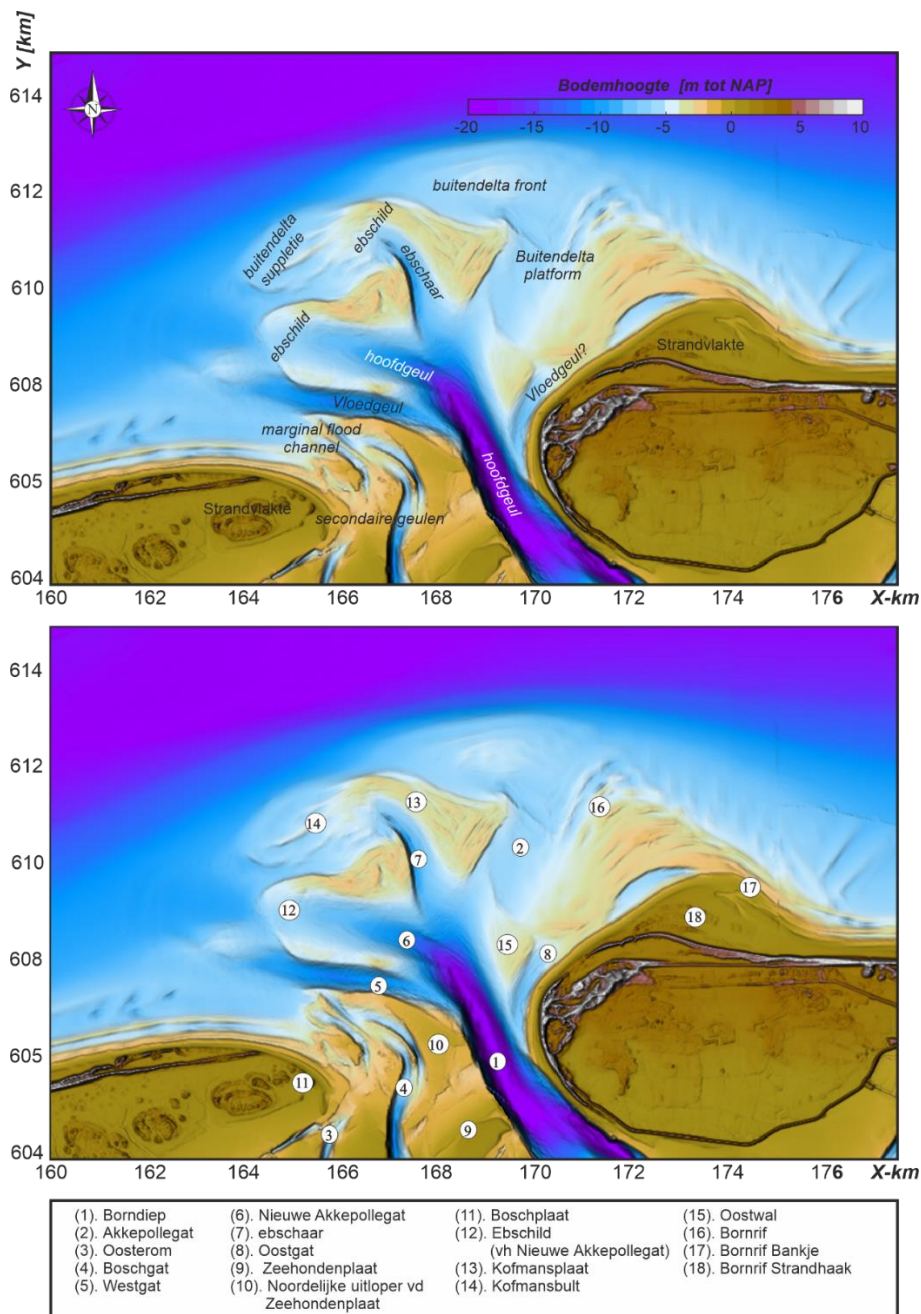
In de volgende paragrafen worden de morfologische veranderingen van de Noordzeezijde van het eiland beschreven. Informatie over de morfologische verandering in de Waddenzee (m.a.w. kombergingsgebieden) staan in aparte kombergingsrapportages beschreven: Zo beschrijven Oost & Cleveringa (2017) de morfologie van het kombergingsgebied van het Borndiep en Oost et al. (2020) beschrijven het kombergingsgebied van het Pinkegat. Eerst wordt het morfologische gedrag van de zeegaten en de buitendelta's beschreven en vervolgens de uitwisseling met de aanliggende eilandkust. Als het geulgedrag van de buitendelta goed wordt begrepen, kan ook de ontwikkeling van de aanliggende eilandkust beter worden begrepen (en voorspeld).

### 6.2 Amelander Zeegat

#### 6.2.1 Algemene kenmerken

In Elias et al. (2019) en Elias et al. (2022b) worden de morfologische processen van het Amelander Zeegat uitgebreid beschreven. In deze paragraaf worden de belangrijkste bevindingen samengevat.

De geulen en banken van de buitendelta van het Amelander Zeegat zijn continu aan verandering onderhevig. Geulen en banken verplaatsen, verdwijnen en (her)vormen. Consistente naamgeving is hierdoor soms lastig. In de rapportage van Elias (2022) zijn op basis van de 2021 bodem de belangrijkste geulen en platen benoemd (Figuur 6-1). Elias et al. (2019) concluderen dat de huidige configuratie van de buitendelta ontstond rond 1926. Voor 1926 grenst het Borndiep nog aan de kust van de eilandstaart van Terschelling. Sinds 1926 ligt de geul dan stabiel tegen de kust van Ameland aan en wordt hier nu op zijn plaats gehouden door in de 2e helft van vorige eeuw aangebrachte verdedigingswerken (bestortingen). De uitstroom van het Borndiep naar de buitendelta varieert dan nog wel in positie, met afwisselend perioden met een westelijke en noordelijke uitstroomrichting.



Figuur 6-1: Overzicht van de geulen en platen van de huidige buitendelta van het Zeegat van Ameland. Bodemligging gebaseerd op de 2021 Vaklodngen van de buitendelta en 2017 Vaklodngen in het bekken. De eilanden zijn ingevuld met het AHN3 (bron: Elias, 2022).

## 6.2.2 Grootschalige morfologische ontwikkeling van het Amelanders Zeegat

De morfodynamiek van de buitendelta wordt gedomineerd door de vorming en verplaatsing van verschillende ebschaar- en ebschild systemen (Figuur 6-2). Deze initieel kleine verstoringen beïnvloeden vervolgens het gehele gedrag van de buitendelta. Deze cyclische verplaatsing van de sediment over de buitendelta van het bovenstroomse naar het benedenstroomse eiland wordt ook wel “sediment-bypassing” genoemd (Elias et al., 2019). De gehele cyclus bestaat uit 5 ontwikkelingsfasen (zie ook Elias et al., 2022b):

*Fase 1; Sedimentaccumulatie langs de bovenstroomse geulwand van de hoofdgeul.*

Sedimentaanvoer langs de kust van Terschelling en de lokale erosie van de Boschplaat resulteren in een overvloedige zandtoevoer naar het zeegat. Via het Borndiep wordt een

gedeelte hiervan afgezet aan de westelijke zijde van de geul. Hier vormt zich een langgerekte ondiepte of bank (Figuur 6-2, 2005 bodem).

*Fase 2; Vorming van verstoringen (Figuur 6-2, 2006 -2007).*

Op deze bank vormen zich kleine instabiliteiten of verstoringen. Als deze verstoringen verbinding maken met de grote ebstromingen door het Borndiep ontstaat een klein geultje of ebschaar. Het geërodeerde sediment accumuleert zeewaarts van dit geultje in de vorm van een klein ebschild.

*Fase 3; Vorming van ebscharen en ebschilden (Figuur 6-2, 2006-2014).*

De initieel kleine instabiliteiten groeien daarna snel uit. Een serie ebscharen met ebschilden ontstaat. De gevormde ebschilden beginnen de ontwikkeling van de westelijke zijde van het buitendeltaplatform te bepalen. De ebscharen ontwikkelen snel en de ebschilden verplaatsen zich tot 500 m per jaar in zeewaartse richting.

*Fase 4; Geul-plaatinteracties (Figuur 6-2, 2014-2019).*

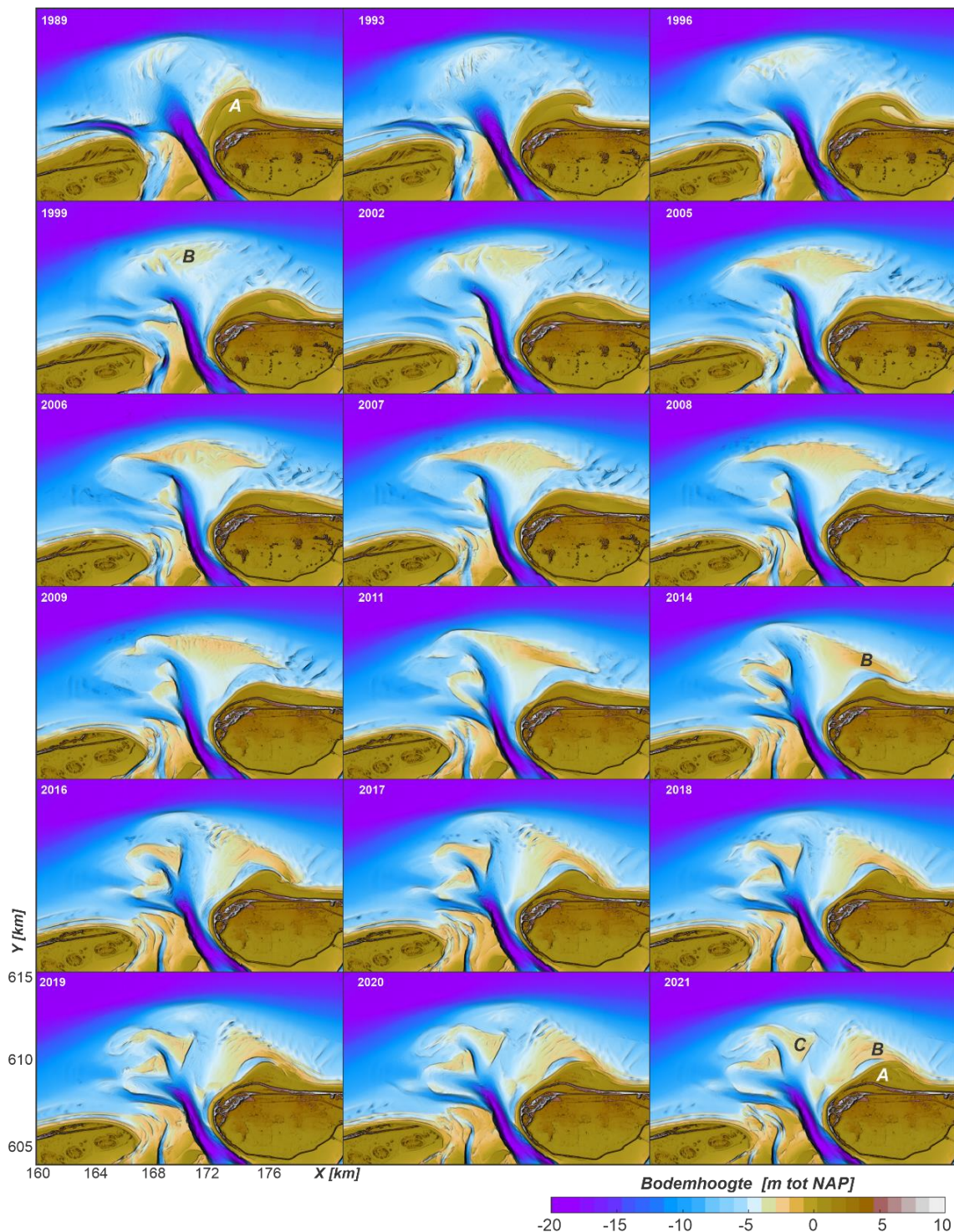
Met toenemende groei en zeewaartse verplaatsing van een ebschild worden de lokale golfgedreven transporten steeds belangrijker. Door de vorming van deze grote bank ver zeewaarts op de buitendelta gaan hier steeds meer golven breken. Deze golven genereren een oostwaarts transport en verplaatsen het ebschild oostwaarts. Hierbij begint de bank de voormalige ebgeul, Akkepollegat, steeds verder naar het oosten te drukken.

*Fase 5; Heroriëntatie van de hoofdgeul en benedenstroomse bankaanlanding (Figuur 6-2, 2019-2020).*

Met de groei van de ebscharen ontstaan er meerdere uitstroomopeningen van het Borndiep de buitendelta op. De uitstroming door het Akkepollegat wordt daarbij steeds minder efficiënt doordat het zeewaartse ebschild de geul dichtdrukt en oostelijk wegduwt. De meest zuidelijke ebschaar heeft een sterker getijverhang en vormt daarmee een efficiënt(er) alternatief. Deze ebschaar ontwikkelt zich dan ook sterk. Rond 2019 zou kunnen worden geconcludeerd dat dit nu de hoofd uitstroomgeul op de buitendelta vormt (het Nieuwe Akkepollegat). Hiermee is het proces van *main ebb-channel switching* 'afgerond'.

Het is nog de vraag hoe het Westgat gaat reageren op deze verandering. Langs het Nieuwe Akkepollegat vormt zich een langgerekte bank die deze geul scheidt van het Westgat. Deze bank zorgt ervoor dat het Westgat in breedte afneemt, maar de geuldiepte neemt toe. Het is mogelijk dat de banken het Westgat steeds verder wegdrücken. Een optie is dan dat het Westgat direct verbinding gaat maken met het Boschgat. Er ontstaat dan (tijdelijk) een twee-geulen systeem zoals dat ook in bijv. 1989 te zien was.





Figuur 6-2: Ontwikkeling van de buitendelta tussen 1989 en 2021 op basis van de Vaklodingen, Sterkte en Belastingen Waterkeringen (SBW) metingen en Kustgenese 2 metingen. De aanlandingsbanken van de 3 sediment-bypassing cycli zijn weergegeven met A, B en C (bron: Elias et al., 2022b).

In de periode 1989-2021 zijn drie series van aanlandingsbanken te onderscheiden: (A) aanlanding van de Bornrif Strandhaak (1985 – heden), (B) aanlanding van het Bornrif Bankje (2017 – heden) en (C) bankvorming door ebschilden (Elias et al. 2019; Elias et al., 2022b) (Figuur 6-2). Alle drie de geïdentificeerde aanlandingscycli hebben als overeenkomst dat het zand van west naar oost over de buitendelta beweegt: Het zand verplaatst vanaf het buitendeltafront, over het Bornrif platform, richting de kust van Ameland. In meer detail zijn de drie aanlandingscycli duidelijk verschillend. Zo wordt de aanlanding van het Bornrif Bankje

vooral gedreven door golven en heeft het getij hier een beperkte invloed. De vorming en de ontwikkeling van de derde aanlandingscyclus werd tot nu toe sterk gestuurd door het getij.

Op het meest zeewaarts gelegen ebschild is tussen maart 2018 en februari 2019 een pilotsuppletie uitgevoerd. Hierbij is 5 miljoen m<sup>3</sup> zand aangebracht (Rijkswaterstaat, 2022). Waarschijnlijk is de omvang van de suppletie niet groot genoeg om de morfologische processen op de buitendelta significant te beïnvloeden (Elias, 2021). De ebschild en ebschaar systemen blijven een gelijkwaardig gedrag vertonen. Tweeënhalf jaar na aanleg is er 2,1 miljoen m<sup>3</sup> aan erosie opgetreden. Dit sediment is in de banken van de buitendelta opgenomen zonder daarbij de autonome morfologische processen te verstoren (Elias, 2021).

Het meest actuele overzicht van de sedimentvolumeveranderingen van de buitendelta is gepresenteerd in Elias et al. (2022a). Elias et al. (2022b) geeft een schatting van de volumes in de aanlandingsbanken. In totaal nemen het bekken en de buitendelta van het Amelandse Zeegat met 72 miljoen m<sup>3</sup> in sedimentvolume toe tussen 1989 en 2017. De grootste toename treedt op in het bekken (43 miljoen m<sup>3</sup>) door opvulling van geulen. De buitendelta neemt 29 miljoen m<sup>3</sup> in volume toe. Erosie van de Boschplaat (30 miljoen m<sup>3</sup>) en de uitgevoerde suppleties (13 miljoen m<sup>3</sup>) vormen de grootste lokale zandbronnen voor deze aanzanding.

Tot slot, er is in 2017-2018 een grootschalige veldcampagne uitgevoerd op de buitendelta van het Amelandse Zeegat als onderdeel van KustGenese 2.0 en SEAWAD. Deze campagne had als doel om het sediment transport en de verdeling van benthos in een dynamisch milieu beter te begrijpen. De data is beschikbaar via 4TU Centre for Research data.

### 6.2.3 Morfologische ontwikkeling van de kustlijn

De aanlandingen van de Bornrif Strandhaak en het Bornrif Bankje zorgen lokaal voor een sterke volumetoename en uitbouw van de kustzone in het aanlandingsgebied (JarKus raai 400-800, Elias et al., 2022b). De Bornrif Strandhaak nam sterk in volume af tot aanlanding van het Bornrif Bankje. De aanlanding van het Bornrif Bankje zorgde vervolgens voor een volumetoename en sindsdien neemt het volume nog steeds toe (raai 600, Figuur 6-4). Deze toename is ook in 2021 nog zichtbaar. De vervorming van de Bornrif Strandhaak (Figuur 6-3) geeft een duidelijke aanwijzing dat het zand in oostelijke richting, naar de centrale eilandkust, wordt getransporteerd. Erosie treedt ook op ten westen van het aanlandingspunt (JarKus raai 100-400, zie raai 400 in Figuur 6-4). Hier zijn frequent terugkerende suppleties nodig om de BKL van de eilandkop te behouden (zie ook Hoofdstuk 7.2).

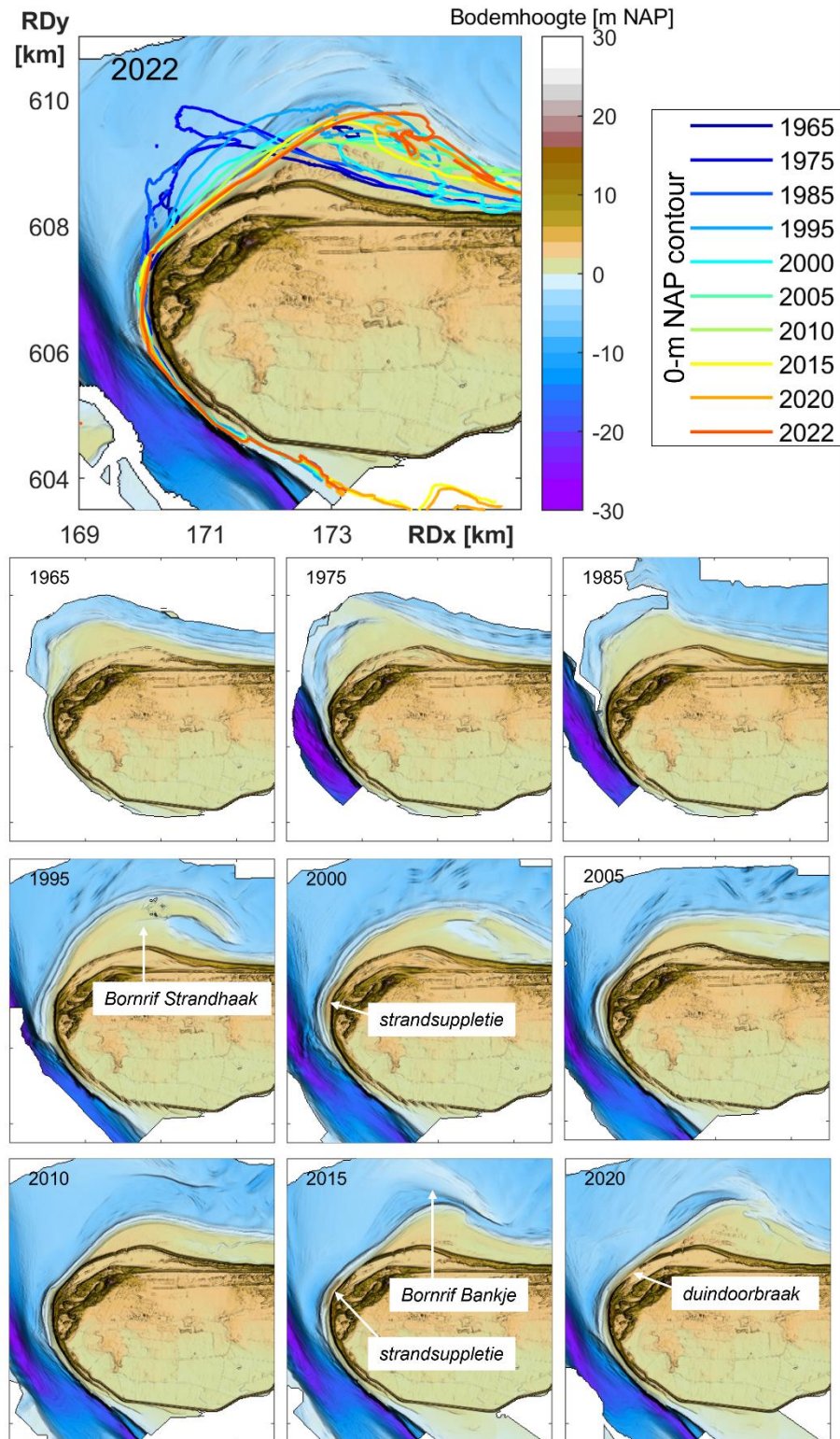
De kustlijn van Ameland wordt in het zuidwestelijk deel beïnvloed door het landwaarts verplaatsen van de geul het Borndiep nabij de kust (raai 4800, Figuur 6-4), en het vroegere Bornrif dat zich langzaam van het westen naar het oosten van het eiland verplaatst. Vanuit de literatuur (Beckering Vinckers, 1943; Cleveringa et al., 2005) worden verschillende redenen gegeven voor deze oostwaartse migratie. Zowel de ontwikkelingen van buitendelta en bekken lijken hiervoor van belang te zijn. De verplaatsing van Borndiep hangt samen met:

- (1) de oostelijke verplaatsing van het kombergingsgebied (tussen de wantijen ten zuiden van Terschelling en Ameland). Vanaf 1830 is dit wantij enkele kilometers verplaatst (van der Spek, 1994). Deze verplaatsing is mede gestuurd door de opvulling van het achterliggende bekken (de Middelsee). Maar ook de oostelijke getij- en windgedreven resttransporten over de wantijen lijken van belang te zijn.
- (2) het verbinden en vastleggen van Boschplaat met Terschelling in de 19e eeuw. Door deze afsluiting is de vorming van kortsluitgeulen over de Boschplaat verhinderd. Het debiet kan alleen nog door het Borndiep.
- (3) het cyclische gedrag in de buitendelta-ontwikkeling (zie Paragraaf 6.2.2.)

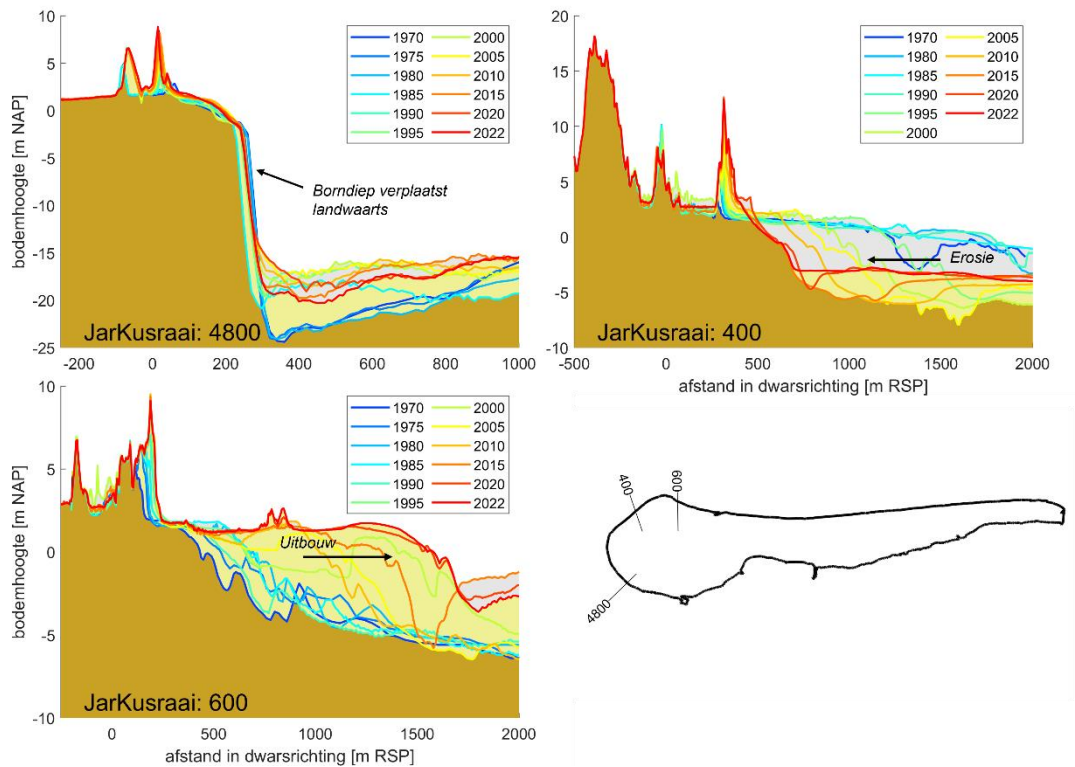
Dit levert problemen op rond de stabiliteit van de bestortingen (ten zuid oosten van raai 4800). In 2015/2016 is er tussen raai 4600 en 4800 een geulwandsuppletie uitgevoerd met



als doel de bestortingen te beschermen en tegemoet te komen aan de langetermijn zandvraag (zie ook Hoofdstuk 7.2).



Figuur 6-3: Ontwikkeling van de eilandkop van Ameland op basis van vergride JarKus data voor 1965 – 2022. In de figuur van 2022 zijn ook de 0-m NAP contourlijnen voor alle getoonde jaren weergegeven.



Figuur 6-4: Drie profielen van de kust aan de westkant van Ameland voor 1970-2022: raai 4800 waar het Borndiep landwaarts verplaatst, raai 400 waar erosie plaatsvindt en raai 600 waar uitbouw plaatsvindt.

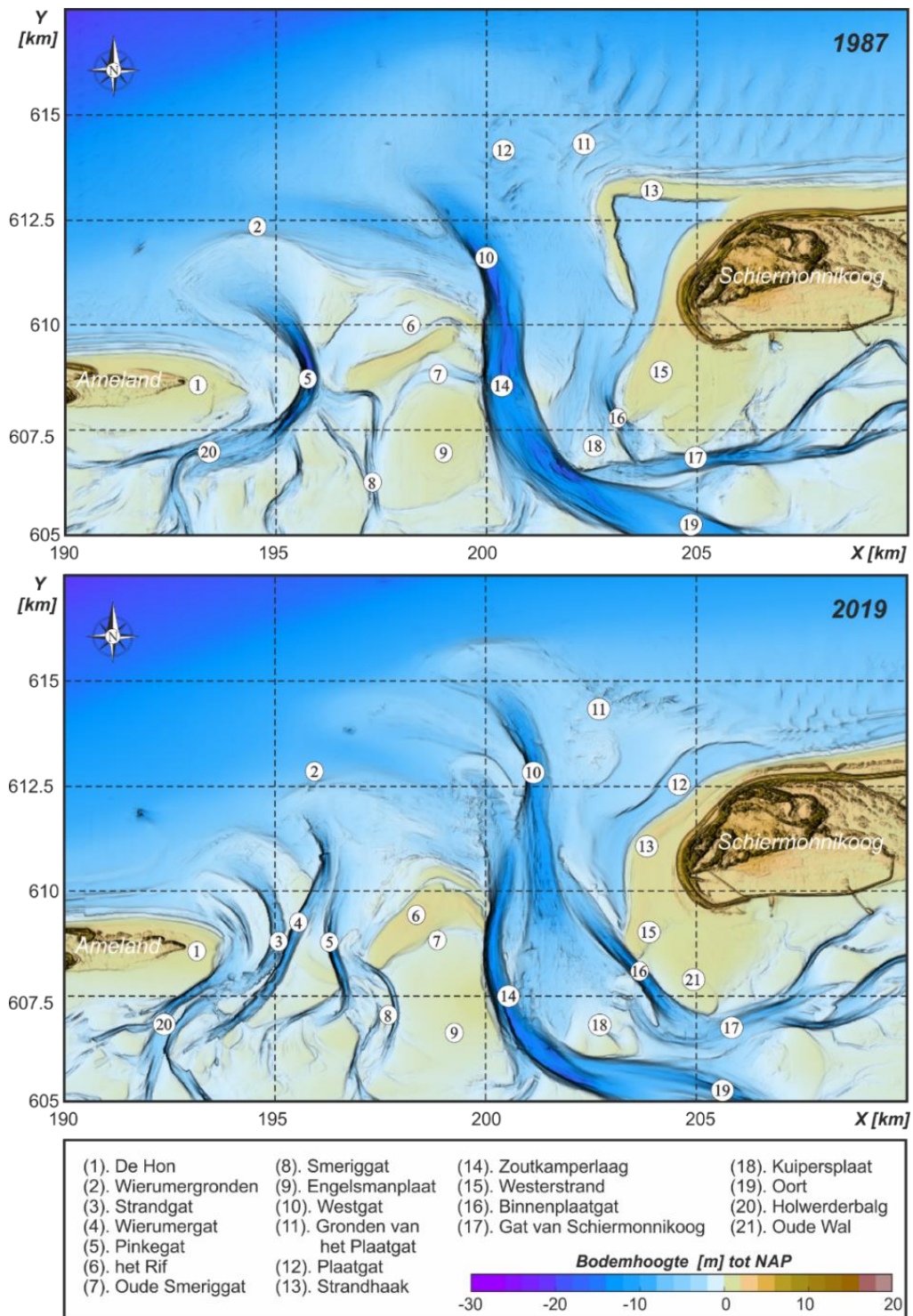
## 6.3 Pinkegat

### 6.3.1 Algemene kenmerken

De grootschalige morfologische processen van de eilandstaart en het Pinkegat staan beschreven in Elias & Oost (2021). In deze paragraaf worden de belangrijkste bevindingen samengevat.

Figuur 6-5 geeft een overzicht weer van de geulen en platen van het Friesche Zeegat. Het Friesche Zeegat bestaat uit twee delen. Het westelijke deel, het Pinkegat is hierbij veel kleiner in omvang dan de oostelijk gelegen Zoutkamperlaag. In deze paragraaf ligt de focus op het Pinkegat, omdat deze naar verwachting de grootste invloed heeft op de morfologische ontwikkeling van Ameland. De beheerbibliotheek van Schiermonnikoog beschrijft de morfologische processen van de oostelijk gelegen Zoutkamperlaag.





Figuur 6-5: Een overzicht van de geulen en platen van het Friesche Zeegat voor 1987 en 2019. De bodemdata zijn afkomstig uit de Vaklodingen datasets. Waar nodig zijn missende datapunten aangevuld met de omliggende jaren. De centrale delen van de eilanden zijn gebaseerd op het Algemeen Hoogtebestand Nederland (AHN) (bron: Elias & Oost, 2021).

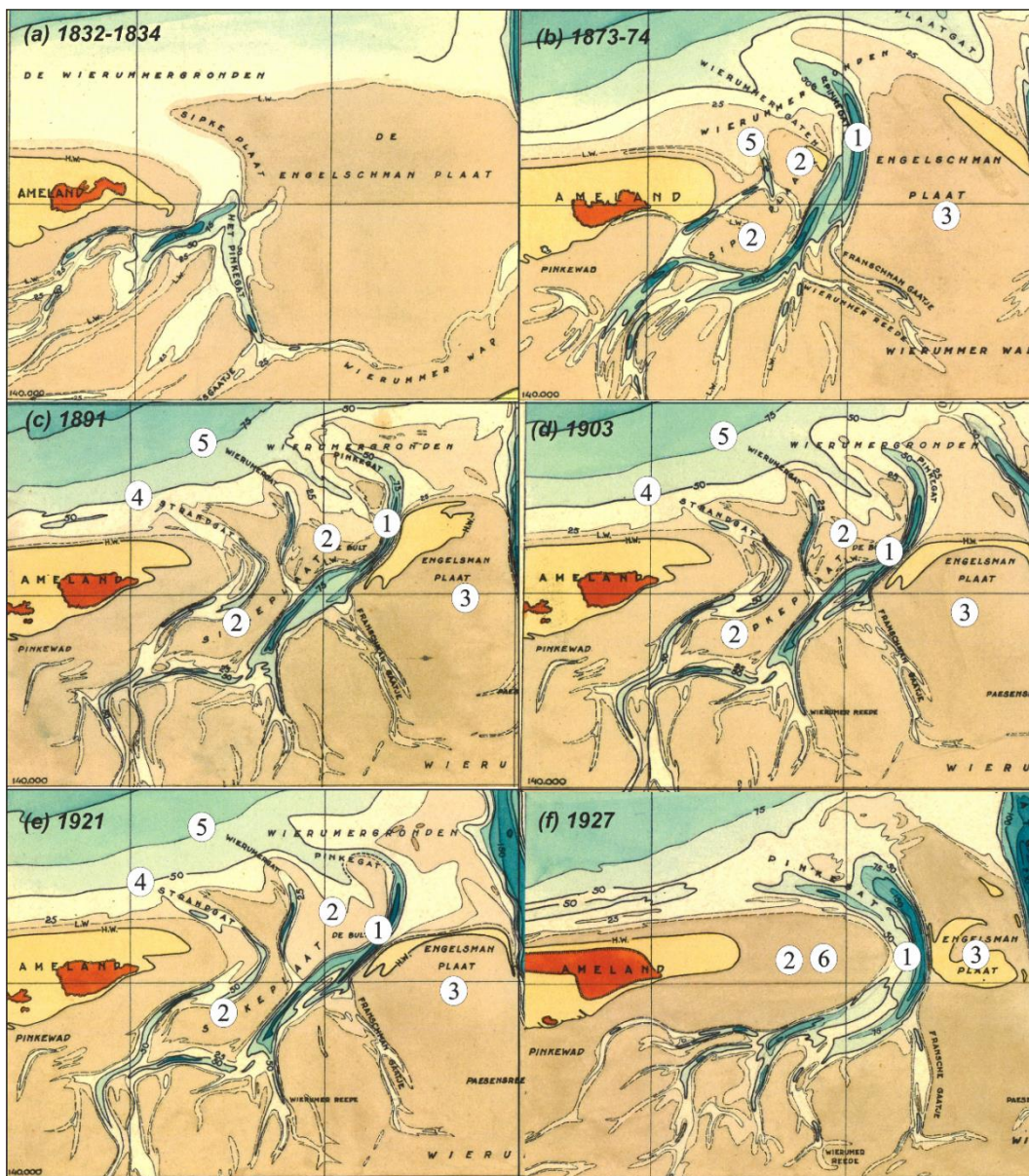
### 6.3.2 Grootschalige morfologische ontwikkeling van het Pinkegat

In de periode 1832-1967 zien we een sterke oostelijke verschuiving van de geulen van het Pinkegat zeegatsysteem op de buitendelta en in de keel (Figuur 6-6 & Figuur 6-7). Daarbij is er in 1832, 1873/74, 1926/27 en 1967 sprake van ruwweg één enkele hoofdgeul. Daartussen traden fasen op waarin meerdere geulen de drainage van het Pinkegat-kombergingsgebied verzorgden. Vooral tot ca. 1900 is het aantal kaarten en andere waarnemingen beperkt,

zodat niet uitgesloten kan worden dat er fasen met één hoofdgeul (welke maar kort bestaan) zijn geweest die gemist worden. Wat wel kan worden geconcludeerd is dat er een zich herhalend patroon voordoet met een interval van ongeveer 40 tot 50 jaar. De afsluiting van de Lauwerszee (1967) heeft een beperkte invloed gehad op het Pinkegat (Oost, 1995; Oost en De Haas, 1992; Elias & Oost, 2021); Ook ná afsluiting van de Lauwerszee zet de ontwikkeling van één enkel geulsysteem naar een meergeulensysteem en terug zich door (Figuur 6-8, Figuur 6-9 en Figuur 6-10). Een enkele hoofdgeul ontstaat in 1987, sindsdien is er een meergeulensysteem aanwezig. Het Pinkegat blijft gehandhaafd langs de oostzijde van de Engelsmanplaat. Periodiek vormen er geulen langs de kop van de Hôn (de staart van Ameland) die oostwaarts migreren en verhelen met het Wierumergat.

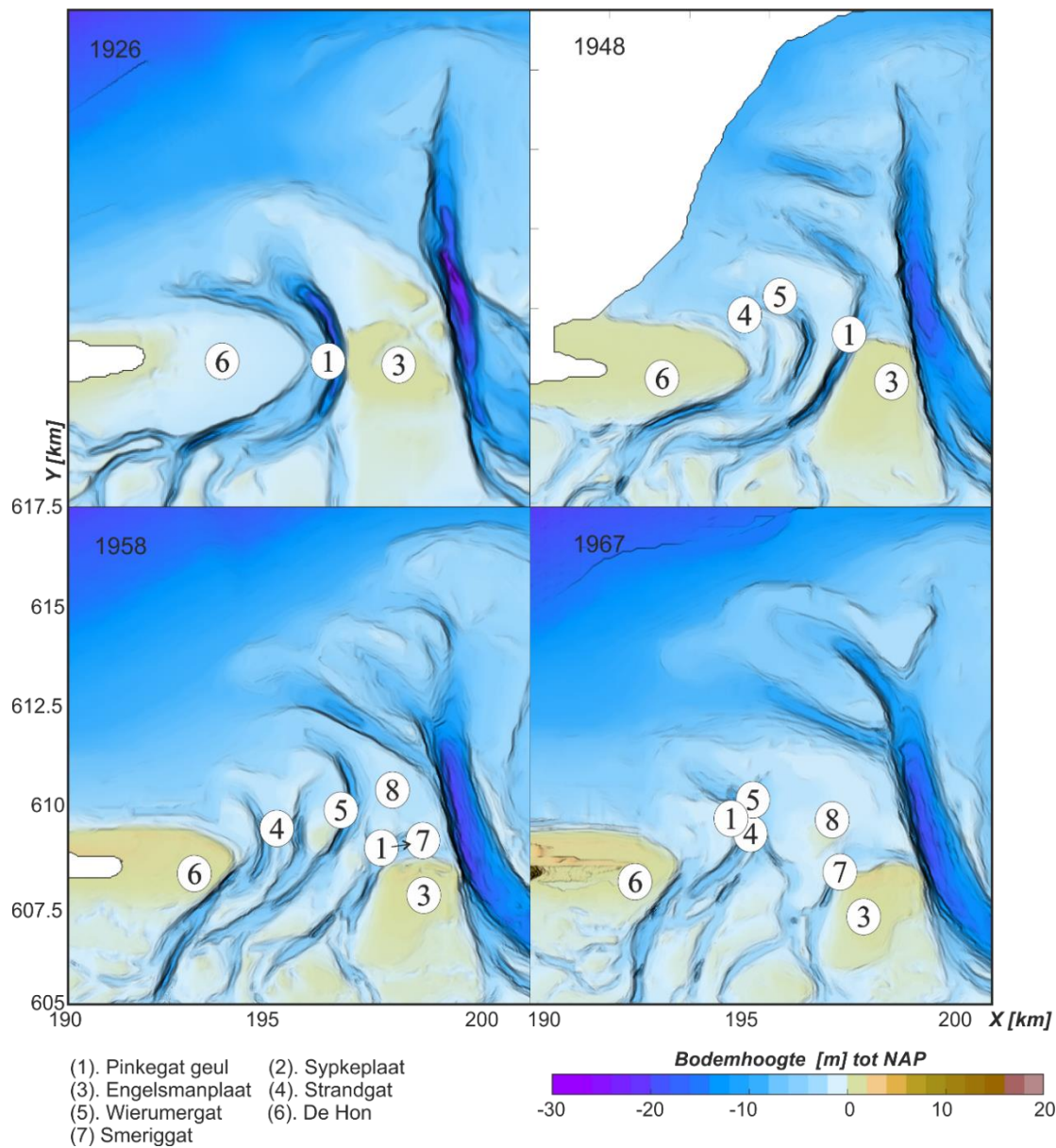
Er is een sterk verband tussen de morfologische veranderingen van de Engelsmanplaat en het Pinkegat zeegat (Elias & Oost, 2021). Uit een analyse van hydrografische kaarten (1834-1927, Figuur 6-6) blijkt dat de grootte van de Engelsmanplaat afneemt. Er vindt erosie plaats aan de westzijde van het platform door verplaatsing van het Pinkegat. Door de structurele erosie van de westelijke zijde blijft er slechts een beperkte plaatbreedte over. Aan de zeezijde van de Engelmansplaat, op de Wierumergronden, vormen zich ondiepe banken (ebschilden). Deze banken verplaatsen onder invloed van de geulverplaatsingen (en golven) richting het oosten en landen aan op Engelsmanplaat. Deze aanlandingsbanken heten Het Rif. De vorming van deze banken lijkt samen te hangen met het zandvolume dat zich in de vooroever bevindt. Voor de afsluiting van de Lauwerszee was er al een groot volume zand beschikbaar, maar het is goed mogelijk dat de afsluiting de vorming van Het Rif heeft versterkt.



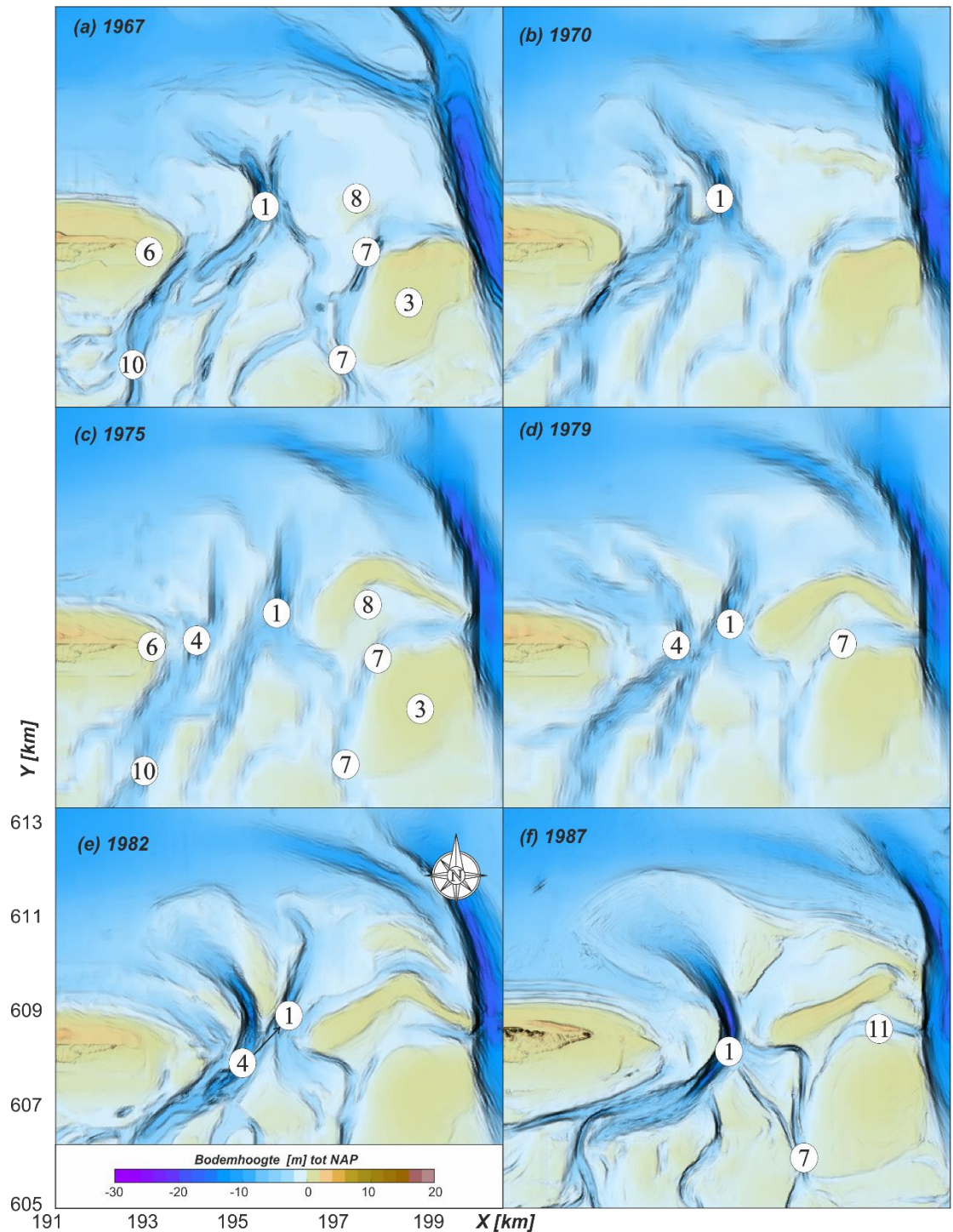


(1). Pinkegat geul (2). Sypkeplaat (3). Engelsmanplaat (4). Strandgat (5). Wierumergat (6). De Hon  
 Figuur 6-6: Ontwikkeling van het Pinkegat in de periode 1832/1834 – 1917 op basis van de hydrografische kaarten (bron: Elias & Oost, 2021).



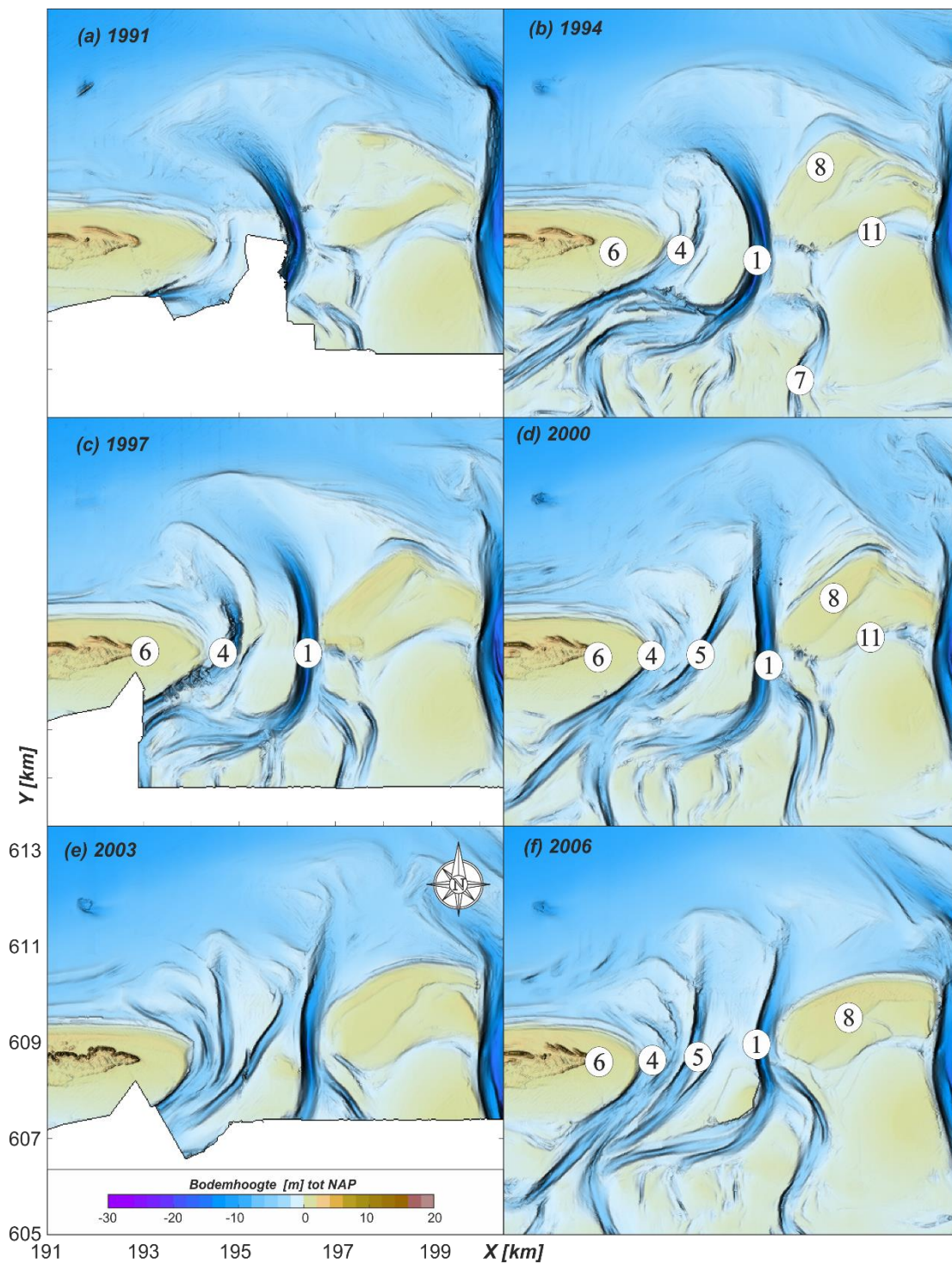


Figuur 6-7: Bodemhoogte Pinkegat vóór afsluiting van de Lauwerszee op basis van gedigitaliseerde bodemkaarten voor de jaren 1926 (deze is gelijk aan 1927 op de hydrografische kaart in Figuur 6-6), 1948, 1958 en 1967 (bron: Elias & Oost, 2021).

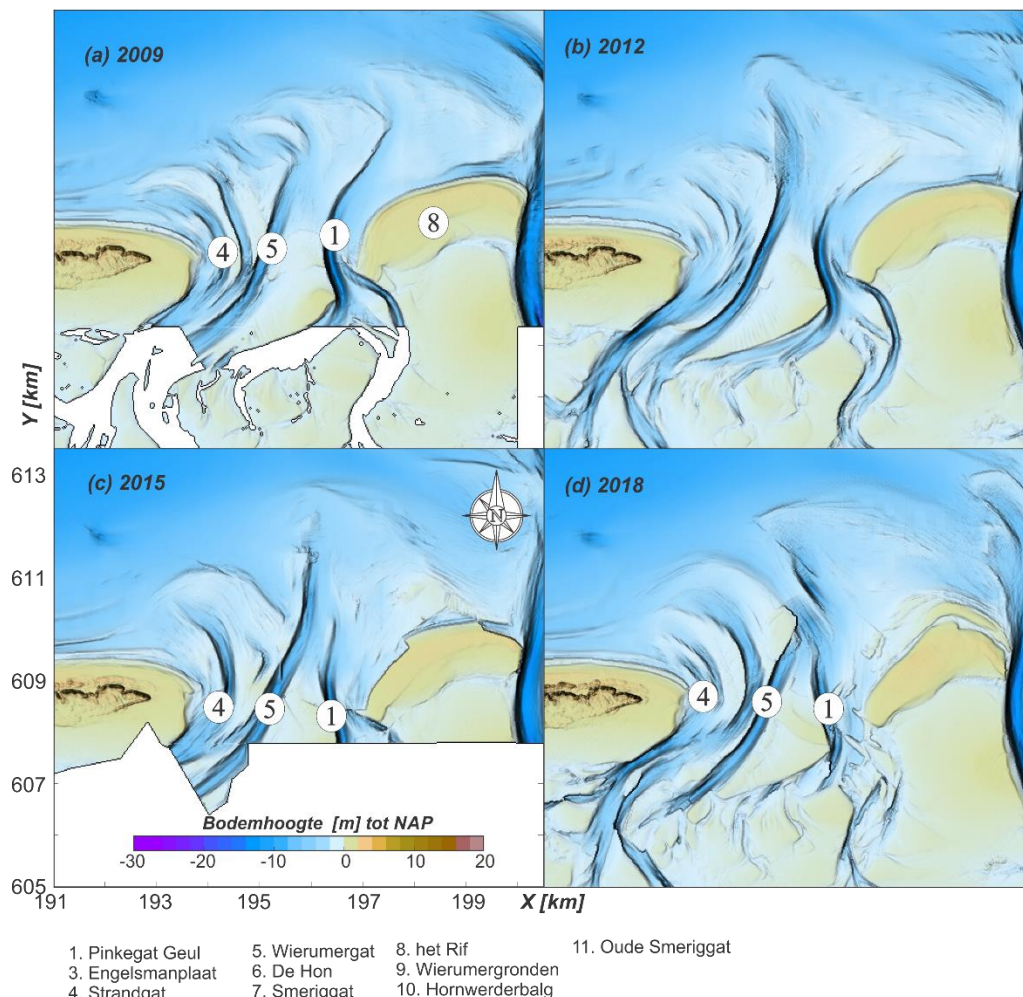


Figuur 6-8: Ontwikkeling van het Pinkegat zeegat over de periode 1967-1987. Naamgeving: (1). Pinkegat Geul, (3). Engelsmanplaat, (4). Strandgat, (5). Wierumergat, (6). De Hôn, (7). Smeriggat, (8). Het Rif, (9). Wierumergronden, (10). Hornwerderbalg, (11). Oude Smeriggat (bron: Elias & Oost, 2021).





*Figuur 6-9: Ontwikkeling van het Pinkegat zeegat over de periode 1991-2006. Naamgeving: (1). Pinkegat Geul, (3). Engelsmanplaat, (4). Strandgat, (5). Wierumergat, (6). De Hôn, (7). Smeriggat, (8). Het Rif, (9). Wierumergronden, (10). Hornwerderbalg, (11). Oude Smeriggat (bron: Elias & Oost, 2021).*

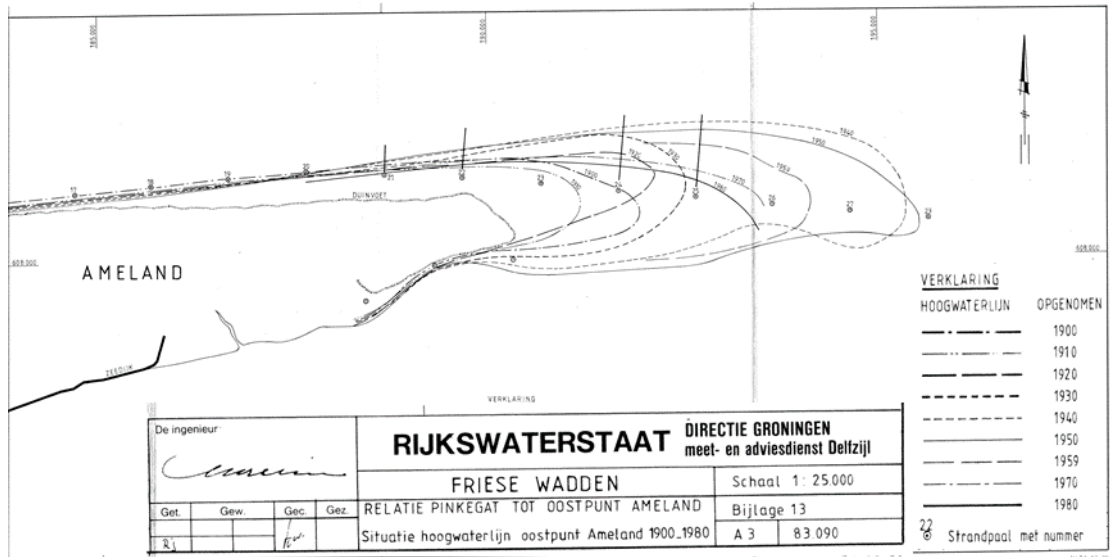


Figuur 6-10: Ontwikkeling van het Pinkegat zeegat over de periode 2009-2018 (bron: Elias & Oost, 2021).

### 6.3.3 Morfologische ontwikkeling van de kustlijn

De staart van Ameland wordt ook wel de Hôn genoemd. Het lijkt erop dat de Hôn bij een meergeulensysteem in het Pinkegat is teruggetrokken. Met de vorming van een één-geulensysteem verplaatst de Hôn zich juist zeewaarts (Elias & Oost, 2021).

Op basis van de ontwikkeling over de periode 1900-1980 geeft Postma (1982) aan dat de ontwikkeling van de eilandstaart een periodiek proces doorloopt. In een tijdsbestek van ongeveer 35 jaar neemt de oostpunt af en groeit dan weer aan. Dit proces wordt geïllustreerd door de ontwikkeling van de gemiddeld hoog water (GHW) over de periode 1900-1980 in Figuur 6-11. Uit deze figuur blijkt dat de kustlijn rond 1910 zijn minimale ligging had bereikt. In de periode 1910-1950 breidt de kustlijn zich sterk uit. Dit hangt samen met de aanlanding van de Sypkeplaat. De 1950 positie ligt door deze aanlanding zo'n 4,3 km oostwaarts van de 1910 ligging. Vanaf 1950 beginnen geulen de aangelande plaat weer te doorsnijden en op te ruimen. Initieel zijn het kleine vloedschaartjes die vormen om de eilandstaart heen. Met de vorming van het Strandgat tussen 1950 en 1958 vindt dan een grote terugtrekking van de eilandstaart plaats.

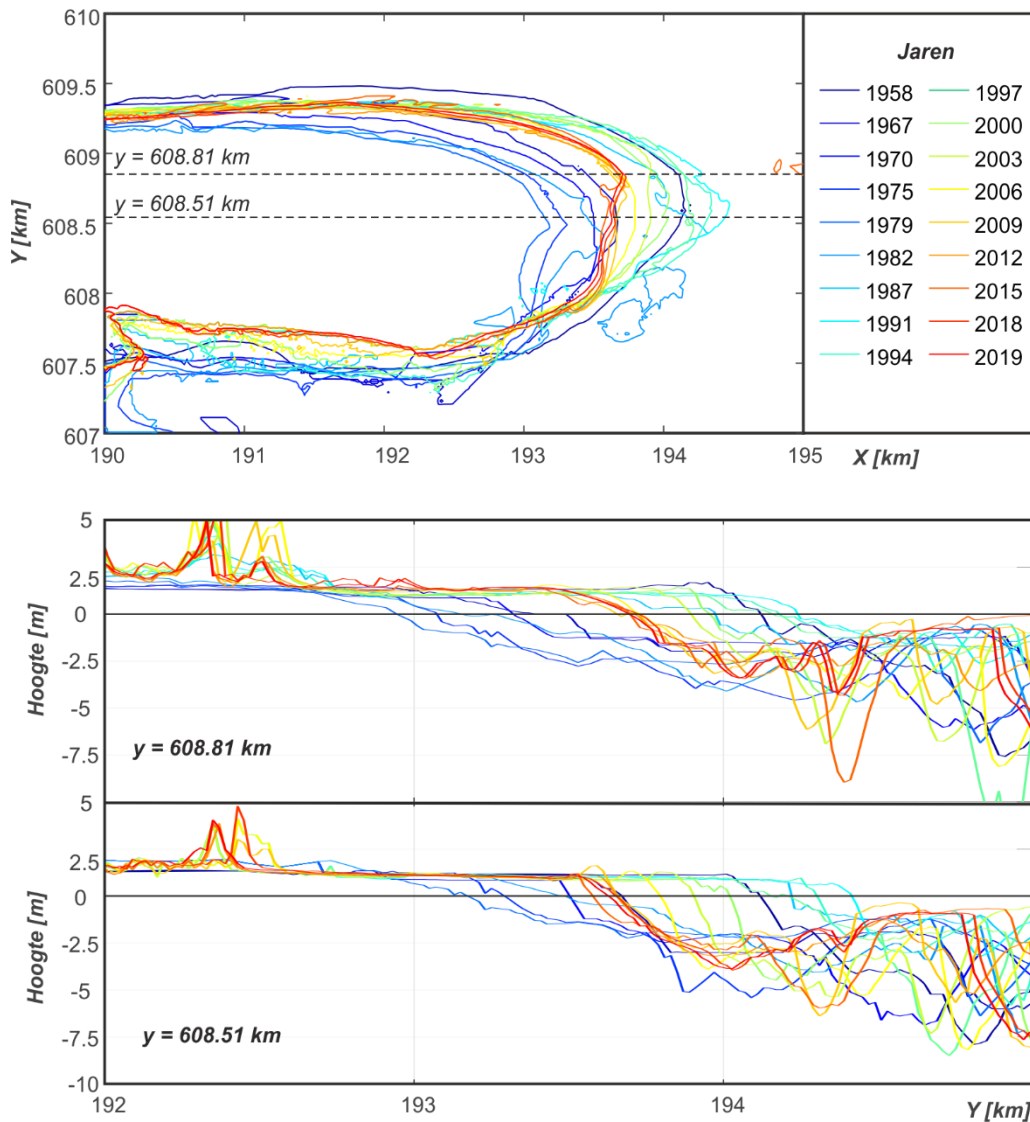


Figuur 6-11: Historische ontwikkeling van De Hôn (Ameland) over de periode 1900-1980. Lijnen geven de Hoogwaterlijn weer (bron: Postma, 1982).

Elias & Oost (2021) gebruiken de 0 m contourlijn om een indicatie te geven van de kustlijnligging (zie Figuur 6-12). Deze contour is afgeleid uit de Vaklodingen over de periode 1958-2019. Omdat hier gebruik is gemaakt van een andere hoogte is de exacte ligging van de kustlijn niet gelijk aan Figuur 6-11, maar voor het verloop van de trends zou dit geen probleem moeten geven. De contourlijnen laten zien dat de eilandstaart gemiddeld 1 km is teruggetrokken in de periode 1958-1975. In de periode 1975-1994 bouwt de kustlijn dan zo'n 1,2 km oostwaarts uit. Deze periode van groei wordt dan weer gevolgd door een periode van terugtrekking. Tussen 1994 en 2012 is deze terugtrekking dan bijna 1 km (ca. 56 m/jaar). De erosie tussen 2012 en 2019 verloopt wat langzamer: 300m (ca. 43 m/jaar). De verplaatsingen suggereren een regelmaat in de eilandstaartontwikkeling, waarbij het rond de 35 jaar duurt om een volledige cyclus te doorlopen. De recente periode lijkt wel af te wijken van deze cyclus. Tussen 2012 en 2019 vond er slechts een kleine verandering plaats. Zo'n periode van stabilisatie is in het verleden ook wel geobserveerd. In de periode 1859-1903 waren de veranderingen van de Hôn ook beperkt. Pas met aanlanding van de Sypkeplaat werd deze stabiliteit doorbroken. De recente stabilisatie zou mede veroorzaakt kunnen zijn door de vele zandsuppleties die in het midden van het eiland zijn uitgevoerd (zie ook Hoofdstuk 7.2). Vergrote langstransporten kunnen het sediment bypassing proces verstoren. De duur van het doorlopen van een volledige cyclus (35 jaar) komt aardig overeen met de berekende lengte van de tijd tussen twee één-geulconfiguraties (zie ook 6.3.2), wat een koppeling lijkt te impliceren tussen geulontwikkeling en eilandpunt ontwikkeling. Het eiland is uitgebouwd in de één-geulen situatie en teruggetrokken als er meerdere geulen ontstaan.

Met behulp van LiDAR data maken Elias & Oost (2021) een schatting van de volumeveranderingen van de eilandstaart in de periode 1997-2019. In totaal is het volumeverlies 0,35 miljoen m<sup>3</sup>. De erosie van de strandzone (-0,72 miljoen m<sup>3</sup>) is wel groter dan de geobserveerde duingroei (+ 0,40 miljoen m<sup>3</sup>). Wat in deze getallen niet is meegenomen is de zakking door gaswinning. Als de gemiddelde zakking van de eilandstaart (0,20 m, zie Hoofdstuk 5.3) wordt meegenomen, met een totaal oppervlakte van 3,1 km<sup>2</sup>, zou de eilandstaart 0,62 miljoen m<sup>3</sup> volume verliezen door de zakking van de ondergrond. Bij elkaar genomen zou dit dan betekenen dat er een netto aanzanding van ongeveer 0,3 miljoen m<sup>3</sup> is geweest.





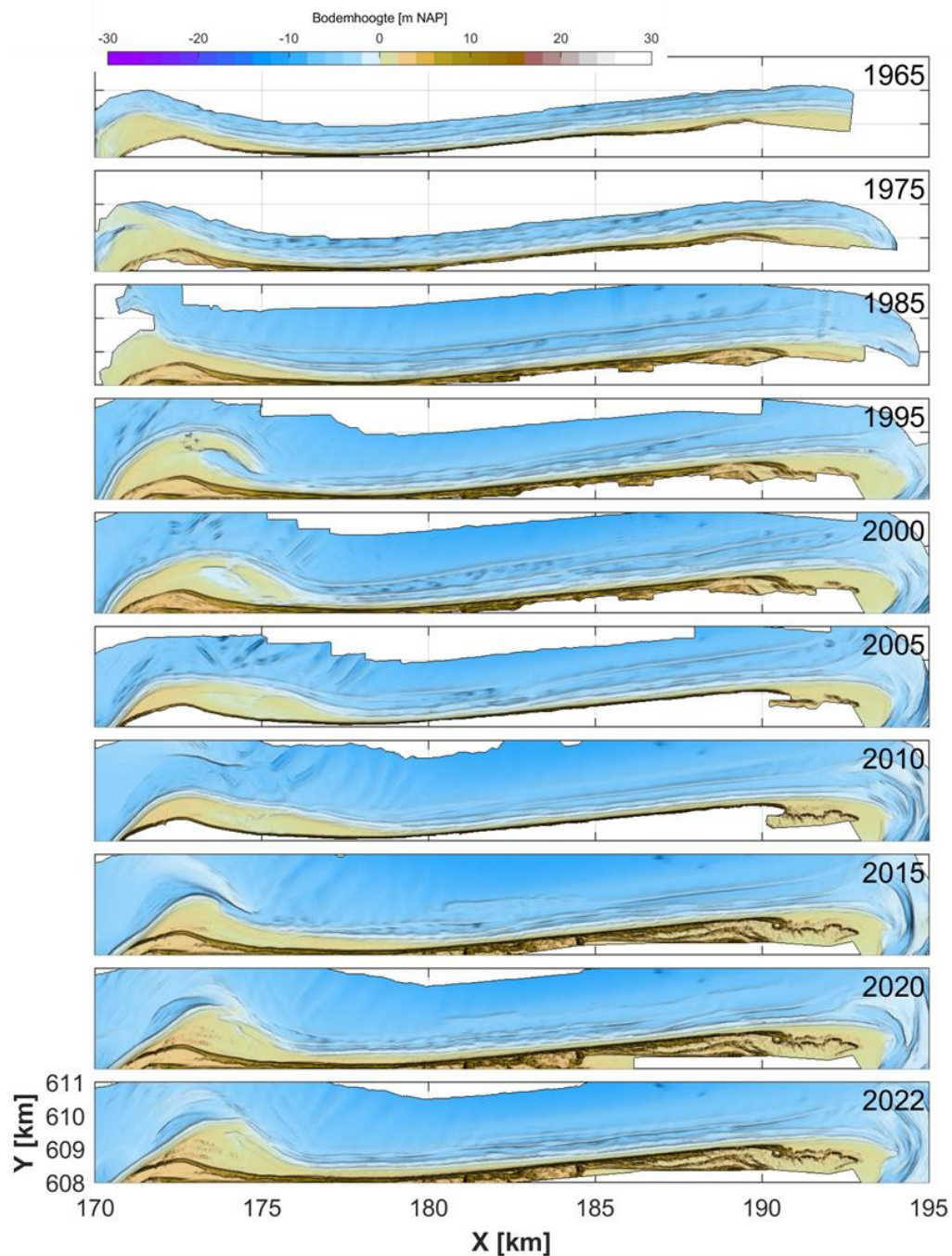
Figuur 6-12: Overzicht van de 0m contourlijn over de periode 1967-2019 afgeleid uit de Vaklodgingen. Onderste twee figuren geven het dwarsprofiel ter plaatse van Y-km 608.81 en Y-km 608.51. Bron: Elias & Oost, 2021.

## 6.4 Centrale eilandkust

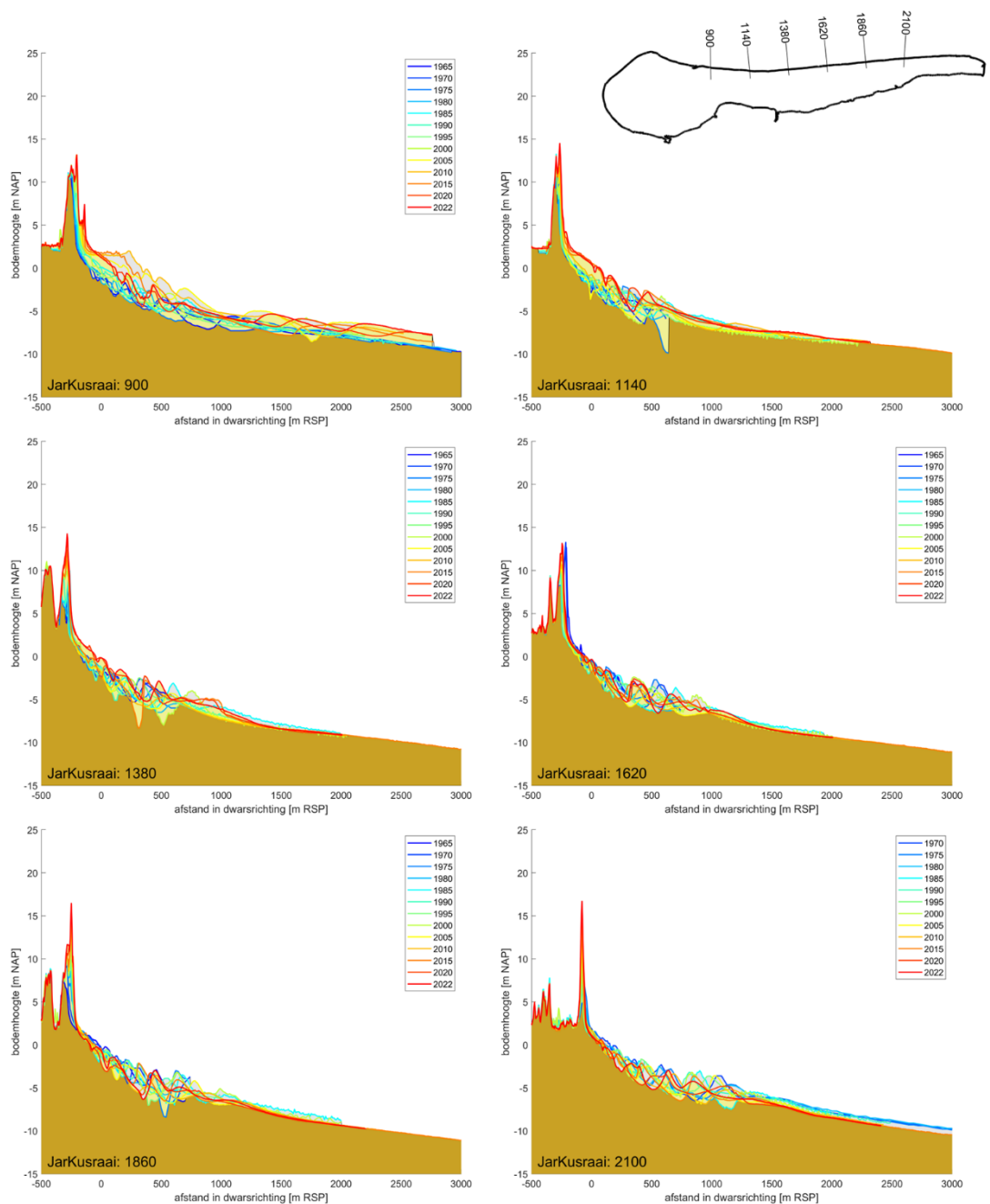
Het gedrag van de centrale eilandkust van Ameland wordt weergegeven in Figuur 6-13, aan de hand van de vergride JarKus data. Figuur 6-14 laat JarKus profielen zien voor zes raaien langs de centrale eilandkust (raai 900 - 2280). Langs de centrale eilandkust zijn duidelijke brekerbanken waar te nemen. Aan de westkant van de centrale eilandkust (bv. raai 900) is duidelijk de aanlanding van de Bornrif Strandhaak vanaf ca. 1985 te zien. Vóór aanlanding van Bornrif zien we een bankenpatroon dat zich vrijwel uniform van zeegat tot zeegat uitstrekt. Afhankelijk van het moment van opname zijn er 2 tot 3 dominante banken aanwezig. Deze banken vertonen een cyclisch gedrag met een cyclustijd tussen de 10 en 15 jaar. De waargenomen cyclus wijkt af van die zoals aanwezig langs de Hollandse Kust (Elias & Bruens, 2013, Wijnberg, 1995). Hier migreren alle banken gelijktijdig zeewaarts.

De aanlanding van Bornrif verstoort lokaal het bankenpatroon. In 1965 is er een bijna continue kustlangse bank aanwezig van zeegat tot zeegat, maar met de aanlanding van de strandhaak Bornrif wordt de bank onderbroken (zie bijv. Figuur 6-13, 1995). Na aanlanding en verhelving van de strandhaak ontstaat er vrij snel een nieuwe continue bank langs de eilandkust en om de Strandhaak heen. Zo is in bijvoorbeeld 2000 al weer een doorgaande

brekerbank te onderscheiden. Aan de oostkant van het eiland lijkt de buitendelta van het Pinkegat een ophangpunt te vormen voor de buitenste bank. Deze bevindt zich hier veel verder uit de kust, terwijl de binnenbank de eilandkust volgt. Vanaf het midden van het eiland oostwaarts gezien zijn er 3 tot 4 dominante banken aanwezig. Er liggen hier een duidelijke buiten-, midden- en binnenbank. Westelijk hiervan zijn er 2 banken aanwezig. In sommige opnamen (zoals 2012) zijn er overal 2 middenbanken aanwezig. Deze lijken samen te hangen met het aanleggen van de vooroeversuppleties in 1998, 2003, 2006 en 2010. Er zijn hier vooroeversuppleties nodig vanwege de grote langtransporten en bodemdaling door gaswinning die voor structurele erosie zorgen (zoals in Hoofdstuk 6.1 is beschreven). In totaal is er hier sinds 1998 ruim 17 miljoen m<sup>3</sup> zand op de vooroever aangebracht. De grote vooroeversuppleties lijken het bankgedrag sterk te beïnvloeden (Holzhauer et al., 2014).



Figuur 6-13: Bovenaanzicht van de morfologie van de eilandkust van Ameland op basis van vergridded JarKus data representatief voor de periode 1965-2022.



Figuur 6-14: JarKus raaien voor de periode 1965-2022 langs de centrale eilandkust van Ameland (900, 1140, 1380, 1620, 1860 en 2100). Het bruine vlak is de minimale bodemhoogte van alle profielen, het grijze vlak de maximale bodemhoogte van alle profielen en het gele vlak het meest recente (2022) profiel.

## 6.5 Dynamiek van de duinen

### 6.5.1 Dynamiek in de zeereep

Binnen het Beheer en Onderhoud Kust programma is het onderdeel “Natuurlijk Veilig” opgenomen. Dit onderdeel van het programma onderzoekt onder andere of, en hoe, de ruimtelijke planning en uitvoering van suppleties (locatie/frequentie) kan bijdragen aan het maximaliseren van biodiversiteit van duinlandschappen op Nederlandse schaal, door gedifferentieerd landschapsbeheer toe te laten zonder andere functies in het gedrang te brengen. Er zijn twee rapporten over verschenen (IJff et al. 2019 en Groen et al. 2019) en de data is openbaar beschikbaar. Zie [www.natuurlijkveilig.nl](http://www.natuurlijkveilig.nl).

In Natuurlijk Veilig wordt de dynamiek en doorstuiving van de zeereep gecategoriseerd in zogenoemde 'responstypen' (Tabel 6-1). Binnen deze responstypen wordt de overstuivingsgradiënt van Type 1 naar Type 5 steeds uitgestrekter in de kustdwarse richting, met een steeds grotere beïnvloeding van de achter de zeereep liggende duinen. De responstypen zijn voor de Nederlandse kust geïdentificeerd m.b.v. luchtfoto's, hoogtekaarten en hoogteverschilkaarten (o.b.v. laseraltimetriegegevens). Op basis van de criteria is per JarKus raai het responstype bepaald. Met de hoogteverschilkaarten is het aantal cm sedimentatie en erosie bepaald, en met een combinatie van de hoogtekaart en de luchtfoto zijn embryonale duinen, kerven en stuifkuilen geïdentificeerd. Er is zowel gekeken naar het gebied direct achter de raai en het gebied aan weerszijden van de raai.

Tabel 6-1: Responstypen met criteria hoe de responstypen zijn bepaald per JarKus raai (gebied voor de zeereep, de kruin, of achter de zeereep, behorend tot een bepaalde JarKus raai).

Aanduiding	Responstype	Criteria
0	Geen zandige kust	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bijvoorbeeld een dijk of boulevard</li> </ul>
1	Nauwelijks dynamiek	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geen sedimentatie op de kruin of achter de zeereep</li> <li>Geen embryonale duinen</li> <li>Evt. lichte sedimentatie aan duinvoet</li> </ul>
2	Beperkte dynamiek voorzijde zeereep	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sedimentatie vóór de zeereep</li> <li>Evt. aanwezigheid en/of ontwikkeling van embryonale duinen</li> <li>Geen sedimentatie op of achter de zeereep</li> </ul>
3	Matig tot forse dynamiek voorzijde en ophoging zeereep	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sedimentatie vóór de zeereep</li> <li>Sedimentatie op de kruin van de zeereep</li> <li>Evt. aanwezigheid en/of ontwikkeling van embryonale duinen</li> <li>Geen sedimentatie achter de zeereep</li> </ul>
4	Dynamische zeereep met beperkte doorstuiving	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sedimentatie vóór en op de kruin van de zeereep</li> <li>Aanwezigheid van stuifkuilen en/of kerven in en/of achter de zeereep</li> <li>Lichte sedimentatie achter de zeereep (&gt;10 cm in 5 jaar voor 10% van het oppervlak)</li> </ul>
5	Gekerfde zeereep met sterke doorstuiving	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sterke sedimentatie vóór en op de kruin van de zeereep (&gt;50 cm in 5 jaar voor 10% van het oppervlak tussen twee JarKus raaien in)</li> <li>Aanwezigheid van kerven die de zeereep helemaal doorklieven</li> <li>Evt. aanwezigheid van stuifkuilen achter de zeereep</li> <li>Sterke sedimentatie achter de zeereep (&gt;50 cm in 5 jaar voor 10% van het oppervlak)</li> </ul>

Er zijn op Ameland tussen 2013 en 2017 nauwelijks veranderingen in de dynamiek van de zeereep waargenomen (Figuur 6-15). De Vries et al. (2019) hebben het duinvolume van de volledige kust van Ameland bepaald voor 2006-2016. Hieruit volgt dat er over het algemeen sprake was van duingroei tussen 2006 en 2016, maar de groei was vrij beperkt. Als mogelijke oorzaak noemen ze dat er door de ligging van het eiland met name sprake is van afluiddige wind. De aanlandige windcomponent is kleiner, waardoor de duingroei beperkt blijft.

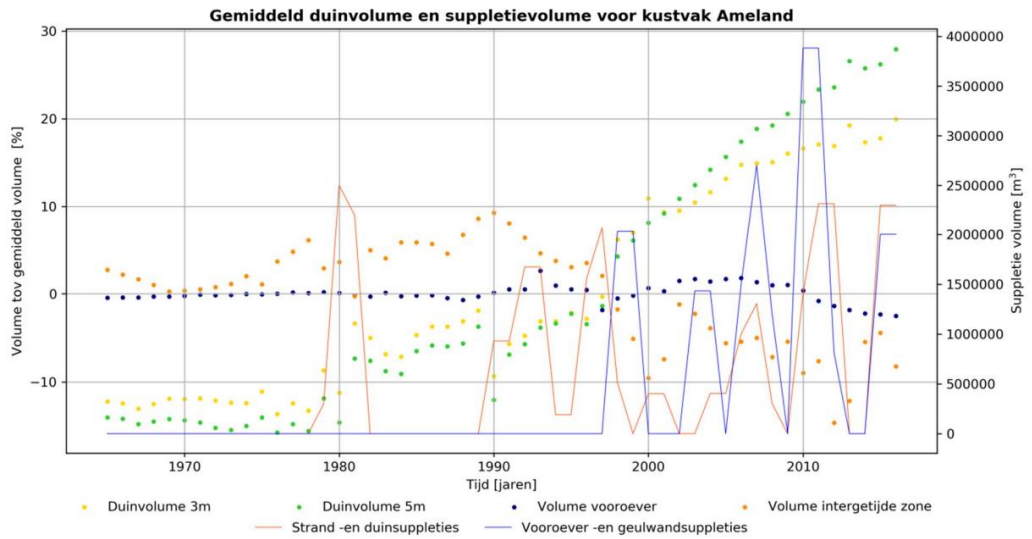




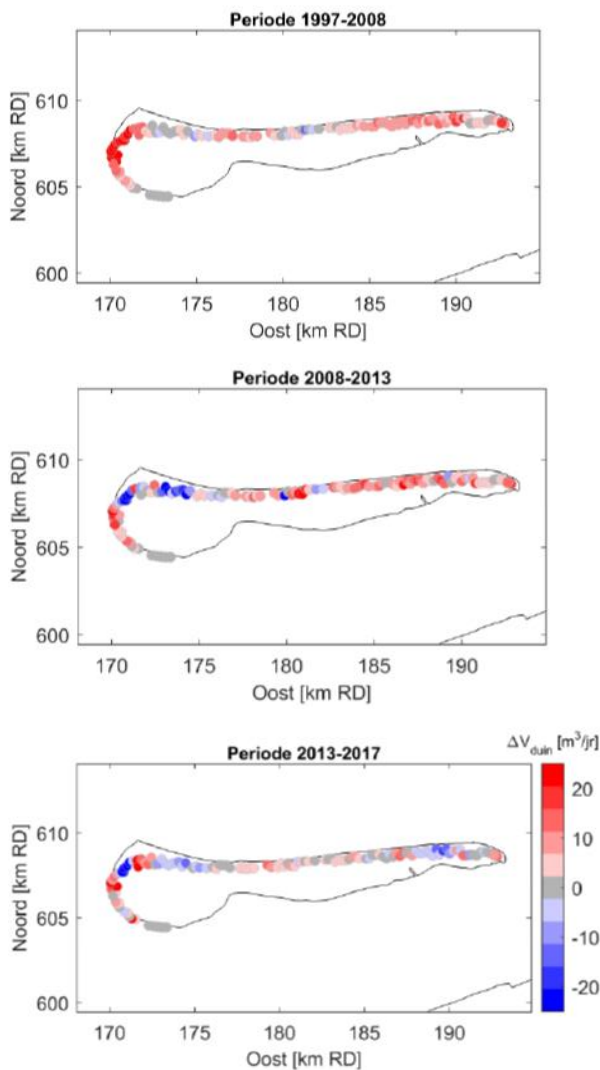
Figuur 6-15: Dynamiek van de zeereep in 2017 (boven) en veranderingen in de dynamiek van de zeereep 2017 ten opzichte van 2013 (onder). Bron: natuurlijkveilig.nl

### 6.5.2 Dynamisch beheer

In een studie van Natuurlijk veilig (IJff et al., 2019) is langs de gehele Nederlandse kust het duinvolume bepaald per JarKus raai voor de volledige periode 1965-2017 (Figuur 6-16 en Figuur 6-17). In de periode 2008-2013 zijn volumetoenames waargenomen langs de kust van midden- en oost-Ameland (rode stippen). In de periode 2013-2017 waren de volumetoenames langs de kust van midden- en oost-Ameland afgezwakt. Langs de kust van west-Ameland zijn de trends nauwelijks veranderd tussen de twee periodes.



Figuur 6-16: Volumeverandering in Ameland van de zeereep (berekend met een duinvoet van 3m en 5m), de vooroever en de intergetijdenzones (stippellijnen) en de volumeverandering van vooroeversuppleties (inclusief geulwandsuppleties, blauwe lijn).



Figuur 6-17: Volumeveranderingen van de zeereep MSL +3m in de perioden 1997-2008, 2008-2013 en 2013-2020 (IJff et al. 2019).

### 6.5.3 **Volumeveranderingen in de zeereep**

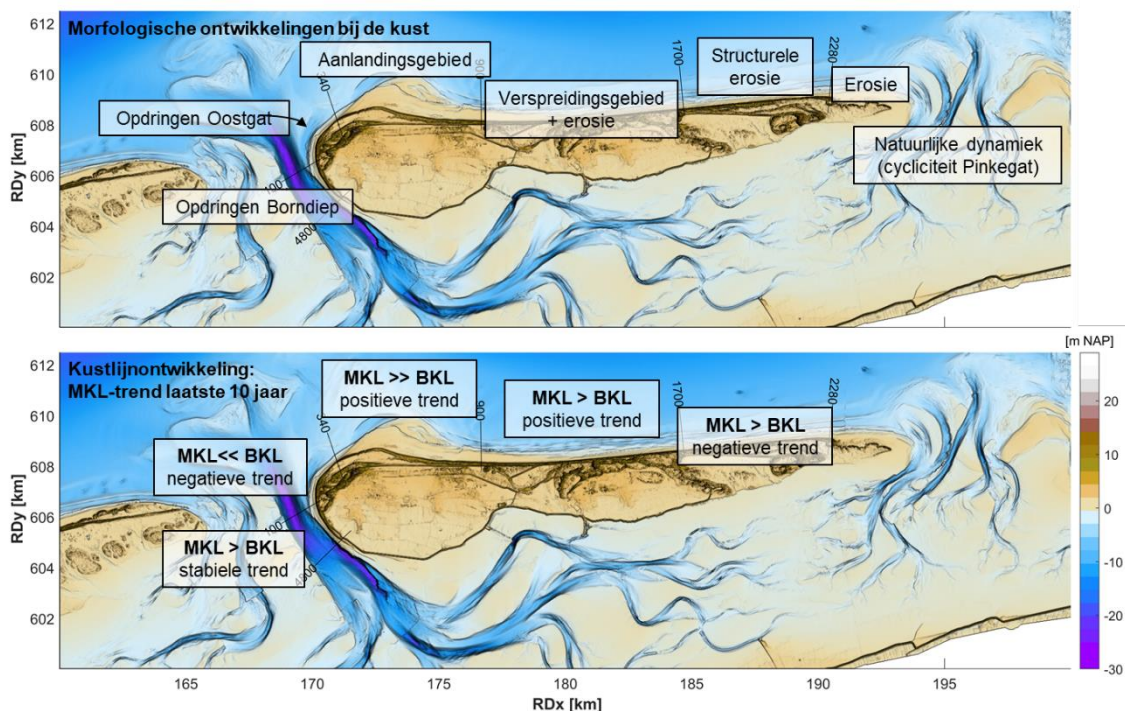
Uit onderzoek op Ameland naar de verschillen tussen een traditionele soft engineering en dynamisch duinbeheer blijkt dat dynamisch duinbeheer, waarbij natuurlijke processen zoveel mogelijk hun gang kunnen gaan, niet tot grote verschillen in positie en volume van de zeereep leidt, maar wel tot een hogere natuurkwaliteit (De Jong et al., 2014).

De twee onderzochte duinsecties (waar dynamisch duinbeheer op verschillende momenten werd geïntroduceerd) lieten geen verschillen zien in de positie van de duinvoet, de positie en hoogte van de duintop en het duinvolume, terwijl het uiterlijk en de kwaliteit van het voorduin duidelijk wel veranderden. Er werd een toename van plantensoorten karakteristiek voor dynamische omstandigheden waargenomen, zowel aan de zeewaartse kant van het voorduin als landwaartse kant. Dit bevestigt een toename van verstuing onder dynamisch duinbeheer.

# 7 Kustlijnontwikkeling

## 7.1 Hoofdpijnen

Op basis van de morfologische kenmerken uit Hoofdstuk 6 zijn enkele deelgebieden te onderscheiden, opgedeeld tussen JarKus raaien: 4800-100, 100-340, 340 – 900, 900-1700 en 1700-2280. Figuur 7-1 geeft de hoofdpijnen weer van de algemene kenmerken van de MKL-trends als gevolg van de morfologische ontwikkelingen.



Figuur 7-1: Samenvatting van de morfologische ontwikkelingen nabij de kust (uit Hoofdstuk 6) en de ontwikkelingen in kustlijnpositie zoals gepresenteerd in paragraaf 7.3.1.

## 7.2 Zandsuppleties

Er wordt sinds 1979 gesuppleerd op Ameland, waarvan vanaf 1990 frequent. Tabel 7-1 geeft een compleet overzicht van alle uitgevoerde suppleties met de gesuppleerde volumes. Vóór 1990 zijn strandsuppleties en duinverzwaringen incidenteel uitgevoerd als maatregel om de kust en de duinen tegen erosie te beschermen. Duinverzwaringen zijn aanvullingen van de zandvoorraad van de duinen. Duinverzwaringen zijn veelal uitgevoerd om de veiligheid te vergroten, daar waar de duinen het achterland beschermen tegen overstromingen. Vanaf 1990 zijn zandsuppleties de structurele beheermaatregel tegen verdere erosie van de kust, als onderdeel van het beleid sindsdien om de basiskustlijn dynamische hand te haven.

Tabel 7-2 vat de typerende suppleties langs de kust van Ameland samen, dit betreft suppleties bij Ameland-Zuidwest (raai 4800-100), Ameland-West (raai 1200-460), Ameland-Midden (raai 1300-2300) en in het Amelander Zeegat. Hieronder worden de suppleties in deze vier gebieden besproken.

**Ameland-Zuidwest** (ca. 2,7 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd tussen 1979-2023)



Uit de morfologische ontwikkeling (Hoofdstuk 6) volgt dat de geul Borndiep op de zuidwestpunt van Ameland vlak voor de kust ligt en richting het oosten verplaatst. Door deze geringe afstand tussen het Borndiep en de westelijke eilandkop van Ameland is er sprake van een smal strand en een smalle duinwaterkering. Tussen mei 2017 en januari 2018 heeft Rijkswaterstaat een geulwandsuppletie in de geul van het Borndiep uitgevoerd om verdere erosie tegen te gaan. Het gebied dat zodoende door de geulwandsuppletie beschermd wordt, krijgt in 2017 meerdere malen te maken met een strandval. Volgens Rijkswaterstaat is er geen directe relatie met de geulwandsuppletie. In het zuidwesten van Ameland komen van nature met enige regelmaat strandvallen voor doordat de geul Borndiep hier dicht bij de kust ligt. Vermaas et al. (2019) beschrijft de geologie, bestorting en strandvallen bij Ameland zuidwest. Van Onselen & Vermaas (2020) beschrijft de (morfologische) ontwikkeling van de geulwandsuppletie. Ze concluderen dat het sediment zich zeer snel heeft verspreid langs de kust. Ruim de helft van het suppletievolume lag eind 2019 langs de zuid- en zuidwestkust van Ameland, in het suppletievak en ten noorden daarvan. Iets minder dan de helft van het gesuppleerde volume is hoogstwaarschijnlijk richting de buitendelta verplaatst, het is niet duidelijk waar het precies terecht is gekomen. Met de vermoedelijke verplaatsing in noordelijke richting komt het zand in het kustfundament terecht, waar het bijdraagt aan het hoofddoel van de suppletie: “het laten meegroeien van het kustfundament”. Potentieel transport richting de Waddenzee – geen onderdeel van het kustfundament – draagt mogelijk indirect bij aan het kustfundament, doordat er minder sediment vanaf de buitendelta's richting de Waddenzee gaat.

#### **Ameland-West** (ca. 12 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd tussen 1979-2023)

De kust ter plaatse van de strandovergang van Hollum erodeert sterk. Het opdringen van de geul maakt instandhouding van de kustlijnpositie moeilijk en suppleties moeilijk uitvoerbaar. Voorheen vormde de opdringende geul een minder grote bedreiging voor de functies van de kust; inmiddels is dat wel het geval. Daarom zijn er de laatste jaren steeds grotere suppleties uitgevoerd. Zo is er in 2019 een grote strandsuppletie uitgevoerd. In de jaren daarna is de erosie doorgedaan, waarschijnlijk hebben de stormen in het voorjaar van 2022 hieraan bijgedragen. Om deze reden zal er in 2023 een nieuwe suppletie plaatsvinden die nog groter is dan de suppletie uit 2019. De suppletie in 2023 is ontworpen op de nog te herziene BKL in deze raaien en compensatie van diens overschrijdingen. Het ontwerp sluit daarmee beter aan bij de natuurlijke ligging en vorm van de kust (incl. duinen en functies).

#### **Ameland-Midden** (ca. 26 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd tussen 1979-2023)

Langs de centrale eilandkust worden veel vooroeversuppleties uitgevoerd. Hier vindt structurele erosie plaats door sterke langstransporten (zie Hoofdstuk 6.4).

In 1998 is er tussen raai 1300 en 2100 een vooroeversuppletie uitgevoerd. Dit was één van de eerste significante onderwatersuppleties uitgevoerd omwille van kustlijnhandhaving. Spanhoff et al. (2002) geeft een uitvoerige evaluatie van deze suppletie. Een belangrijke observatie in deze studie is het effect van de suppletie op het bankgedrag. Vrijwel direct na aanleg ontstaat er op het zeewaartse deel van het suppletieoppervlak een nieuwe bank die later naar buiten migreert. Opvallend is dat deze bank snel op dezelfde meest zeewaartse locatie komt te liggen die de banken in het verleden bereikten. Door de nieuwe bank zijn de banken landwaarts daarvan sterk gegroeid en landwaarts verschoven. De positieve ontwikkelingen van de MKL in de oostelijke helft van de suppletie zijn daarmee toe te schrijven aan de nieuwe bank en gewijzigde het bankgedrag.

In 2010 en 2011 zijn er tussen raai 1100 en 2000 zowel een vooroever als een strandsuppletie aangelegd. Beiden zijn gefaseerd aangelegd: de vooroeversuppletie is in 3 stappen aangelegd, de strandsuppletie in 2 stappen (zie ook Tabel 7-1). De suppletie was ook veel groter dan voorgaande suppleties: 6,53 miljoen m<sup>3</sup>. In Vermaas et al. (2013) is de ontwikkeling van deze suppletie onderzocht. De vooroeversuppletie toont op de meeste

punten een ontwikkeling vergelijkbaar met eerdere vooroeversuppleties die op deze locatie zijn uitgevoerd. Het toegevoegde sediment zorgt voor de vorming van een nieuwe bank in het hele suppletie vak en het stabiliseren van de buitenste bank. Ondanks de stormachtige winter van 2011/2012 toont de vooroever over de gehele periode geen grote erosie per jaar, maar is de erosie vergelijkbaar met die voor de aanleg. Het grotere suppletievolume zorgt daardoor dus voor een langere levensduur van de suppletie.

#### **Amelander Zeegat** (5 miljoen m<sup>3</sup> gesuppleerd tussen 2018 en 2019)

Tussen maart 2018 en februari 2019 heeft Rijkswaterstaat een pilotsuppletie van 5 miljoen m<sup>3</sup> sediment uitgevoerd op de buitendelta van het Amelander Zeegat. Deze pilot diende om kennis op te doen over de werking van zeegaten, omdat daar nog weinig over bekend is. Met metingen voor, tijdens en na de suppletie is inzicht gekregen in de (zand)stromen en het (bodem)leven in het zeegat. Zo kan worden gekeken of zeegaten geschikte locaties zijn om in de toekomst te suppleren. De morfologische en ecologische metingen zijn doorgezet tot en met 2022. Deze zijn geanalyseerd en uitgewerkt door Deltares en Wageningen Marine Research. Ook diverse afstudeerders en promovendi hebben hier een bijdrage aan geleverd. Eind 2022 is een afsluitend rapport gepubliceerd met de aanvullende leerervaringen van de pilot, waarbij ook een doorkijk is gegeven naar toepassingsmogelijkheden van dit type suppleties (Rijkswaterstaat, 2022).

Tabel 7-1: Suppletieoverzicht Ameland (op basis van gegevens van Rijkswaterstaat t/m juli 2023)

Locatie	Start	Einde	Beginraai	Eindraai	Lengte [m]	Type	Volume [x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]
Hollum	jun-1979	sep-1979	160	220	600	strandsuppletie	300
Ameland-midden	okt-1980	dec-1980	1000	1600	6000	duinverzwarend	2,200
Oegepad-Paardepad	aug-1990	sep-1990	1380	1520	1400	duinverzwarend	40
Westerpad-Jan Sietzepad	aug-1990	sep-1990	1240	1700	4600	duinverzwarend	930
Ameland-midden	jul-1992	sep-1992	1150	1280	1300	duinverzwarend	230
Ameland-midden	jul-1992	sep-1992	1150	1960	8100	strandsuppletie	1,442
Ameland-west	jul-1994	okt-1994	4860	4960	1000	strandsuppletie	190
Ballum	jun-1996	sep-1996	720	1120	4000	strandsuppletie	1,555
Hollum	mei-1997	jun-1997	120	300	1800	strandsuppletie	511
Ameland-midden	apr-1998	sep-1998	1300	2100	8000	vooroeversuppletie	2,031
Hollum	apr-2000	jun-2000	100	260	1600	strandsuppletie	401
Midden	jul-2003	nov-2003	940	1370	4300	vooroeversuppletie	1,432
Noord-west	mei-2004	jul-2004	200	320	1200	strandsuppletie	404
Midden	mei-2006	jun-2006	1100	1600	5000	strandsuppletie	1,001
Midden	mei-2006	aug-2006	1200	1700	5000	vooroeversuppletie	1,502
Westkop	jul-2007	dec-2007	195	302	1070	vooroeversuppletie	1,201
Westkop	jul-2007	aug-2007	200	320	1200	strandsuppletie	303
Midden	mei-2010	okt-2010	1100	1460	3600	vooroeversuppletie <sup>1</sup>	1,941
Midden	mei-2010	sep-2010	1480	1680	2000	vooroeversuppletie <sup>1</sup>	1,124

Locatie	Start	Einde	Beginraai	Eindraai	Lengte [m]	Type	Volume [x10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> ]
Midden	sep-2010	jan-2011	1140	1600	4600	strandsuppletie <sup>2</sup>	925
Midden	nov-2010	aug-2011	1700	2000	3000	vooroeversuppletie <sup>1</sup>	1,635
Midden	jul-2011	okt-2011	1620	2000	3800	strandsuppletie <sup>2</sup>	910
Midden	jan-2015	aug-2015	1240	1700	4600	vooroeversuppletie	2,000
West	apr-2015	jul-2015	140	402	2620	strandsuppletie	1,300
Midden	sep-2015	dec-2015	1240	1700	4600	strandsuppletie	1,000
Zuid-west	mei-2017	jan-2018	4620	4820	2000	geulwandsuppletie	2,500
Amelander zeegat	mrt-2018	apr-2019				buitendelta	5,000
Ameland midden	jan-2019	dec-2020	1300	2300	10000	vooroeversuppletie	4,460
Ameland west	apr-2019	jul-2019	120	420	3000	strandsuppletie	2,542
Ameland west	mei-2023	aug-2023	120	460	3400	strandsuppletie	~3,100

<sup>1,2</sup> gefaseerde strand- en vooroeversuppletie (zie ook Vermaas et al., 2013)

Tabel 7-2: Samenvatting van de typerende suppleties langs de kust van Ameland. De onderbouwing van het suppletie programma van RWS is te vinden via:

<https://iplo.nl/thema/water/waterveiligheid/kust/uitvoeringsprogramma-kustlijnzorg/>

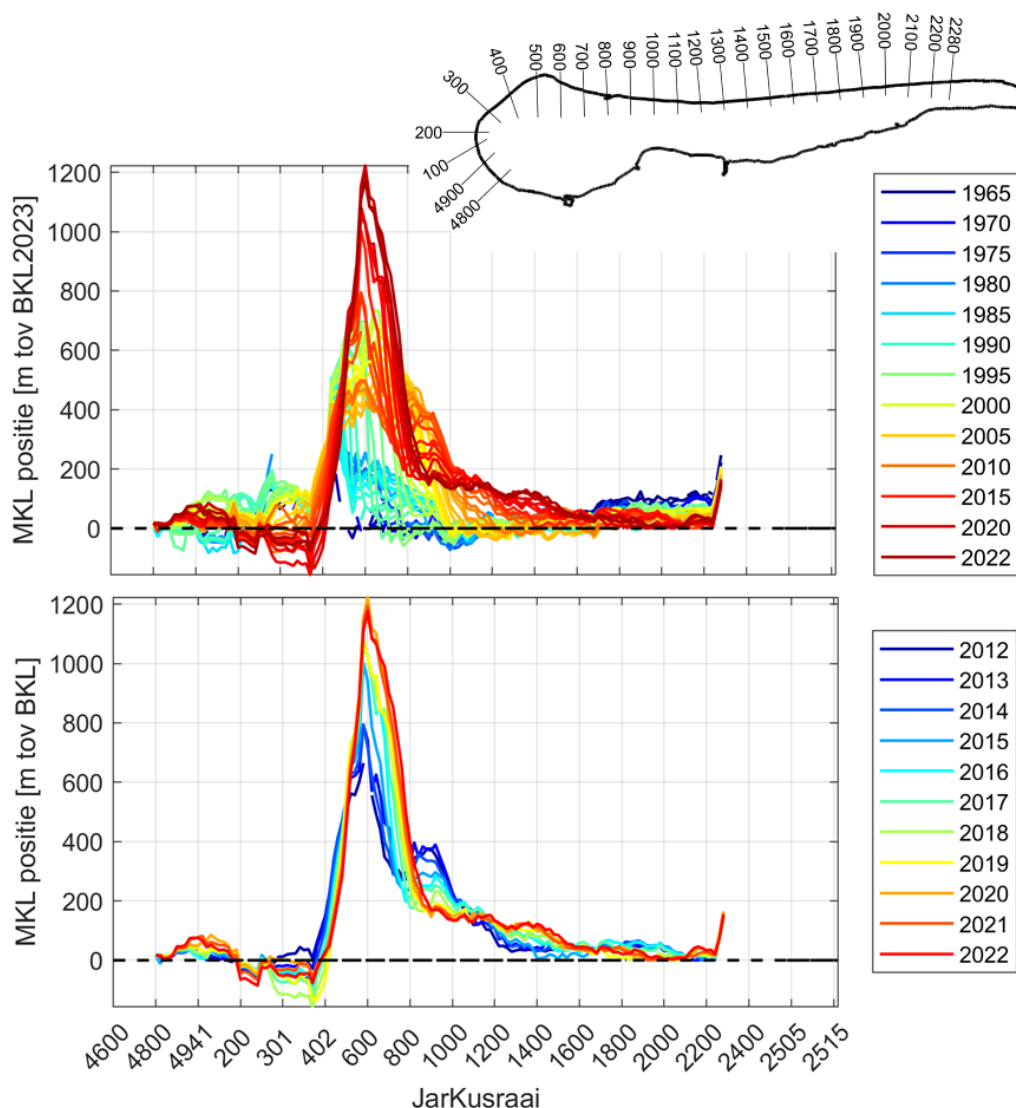
Locatie (raaien)	Typerende suppleties	Onderbouwing
<b>Ameland-Zuidwest</b> (4800-100)	Geulwandsuppletie	De geulwandsuppletie moet op de langetermijn voor kustveiligheid zorgen door het kustfundament te laten meegroeien. Een secundair doel was de bescherming van de onder water aanwezige bestorting (vanaf raai 4700) en het tegengaan van landwaartse migratie van de geul (tussen raai 4620 en 4700).
<b>Ameland-West</b> (raai 120-460)	Strandsuppleties	Sinds de aanlanding van de Bornrif strandhaak begin jaren 1990 wordt Ameland-west gekenmerkt door structurele erosie. De BKL is hier overschreden en herstel zal naar verwachting niet optreden. Strandsuppleties zijn in staat het kustprofiel tijdelijk aan te vullen.
<b>Ameland-Midden</b> (raai 1300-2300)	Vooroeversuppleties	Structurele erosie moet worden gecompenseerd. De verwachting is dat de vooroeversuppletie de erosie onder water compenseert en de achteruitgang van de ondiepe kustzone en het strand beperkt. Ervaring leert dat de levensduur van suppleties hier ca. 4 jaar is. Deze suppleties compenseren mogelijk ook de bodemdaling als gevolg van winning. Vanaf raai 1700 worden relatief weinig suppleties uitgevoerd. In recente jaren lijken er regelmatig BKL overschrijdingen plaats te vinden. Mogelijk zullen daar in de toekomst weer suppleties gepland worden.
<b>Amelander Zeegat</b>	Buitendeltasuppletie	Een pilot op de buitendelta waarmee wordt onderzocht hoe deze manier van kustonderhoud werkt en wat de effecten op de natuur zijn. Als blijkt dat een zandsuppletie in deze buitendelta effectief is en beter voor de natuur, kan dit later op grotere schaal ook in andere buitendelta's worden toegepast.

## 7.3 Ontwikkeling kustindicatoren

### 7.3.1 MKL – BKL

De MKL-positie (voor definitie, zie Hoofdstuk 3) representeert de jaarlijkse kustlijnligging en wordt vergeleken met de BKL. Figuur 7-2 geeft de MKL ontwikkeling voor 1965 tot 2022 (boven) en de laatste 10 jaar (onder) t.o.v. de BKL2023.

De positie van de MKL langs de zuidwestkust van Ameland is behoorlijk dynamisch (zie ook 7.1 en 7.2). Hier liggen de geulen Borndiep en Oostgat dicht bij de kust. Als gevolg ligt de MKL tussen raai 200 en 400 landwaarts van de BKL. Langs de noordwestkop, tussen raai 402 en 900, ligt de positie van de MKL ver zeewaarts. Dit is het aanlandingsgebied van aanlandingsbanken. Tussen raai 800 en 1000 is de verheling van de aanlandingsbank te zien: de MKL verplaatst weer meer landwaarts. De positie van de MKL langs de centrale eilandkust (tussen raai 900 en 1700) is redelijk stabiel, dit hangt samen met de vele suppleties die hier worden uitgevoerd. Er vindt hier namelijk een sterk langstransport plaats wat voor structurele erosie zorgt. Vanaf raai 1700 is te zien dat de MKL steeds meer landwaarts is komen te liggen.



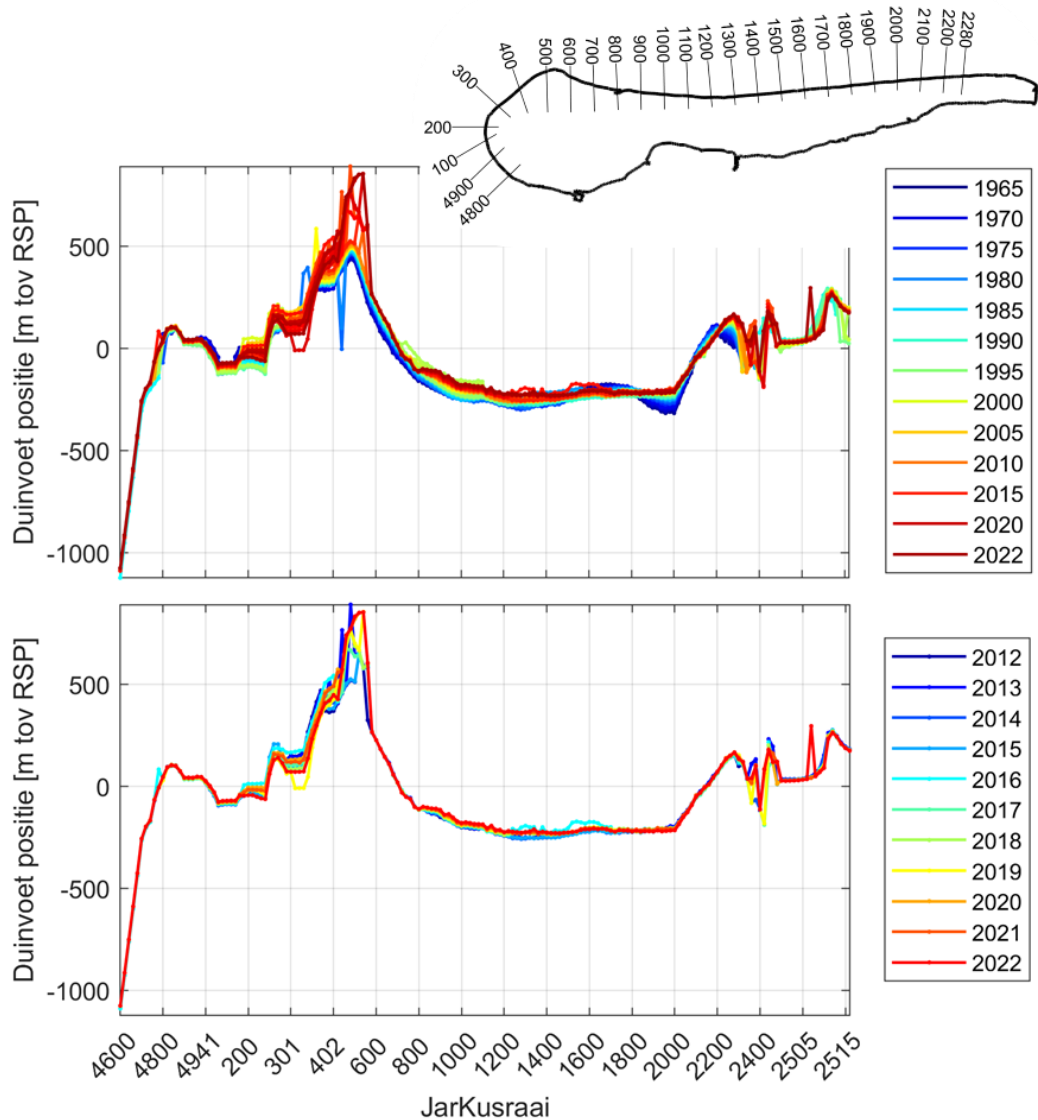
Figuur 7-2: Ontwikkeling MKL positie t.o.v. BKL2023 (zwarte stippellijn) over de periode 1965 tot 2022 (boven) en de laatste 10 jaar (onder).



### 7.3.2 Duinvoet

De duinvoet (DV) is de overgang van het droge strand naar de eerste duinenrij. Deze wordt bepaald als de positie van het snijpunt van het profiel met de +3 m NAP lijn, ten opzichte van RSP (zie Appendix A2 voor de berekenmethode). Dit snijpunt hoeft in de realiteit niet altijd overeen te komen met de daadwerkelijke overgang van strand naar duinen (m.a.w. knikpunt in het profiel).

In Figuur 7-3 wordt de ontwikkeling van de DV tussen 1965 en 2022 en de laatste 10 jaar weergegeven langs de kust van Ameland. De figuur laat zien dat de positie van de duinvoet met name op in het aanlandingsgebied de kop variabel is. Op deze locaties is het strand heel breed, waardoor er embryonale duinvorming kan plaatsvinden. Langs de centrale eilandkust (raai 900 – 2280) is de positie van de duinvoet heel stabiel.



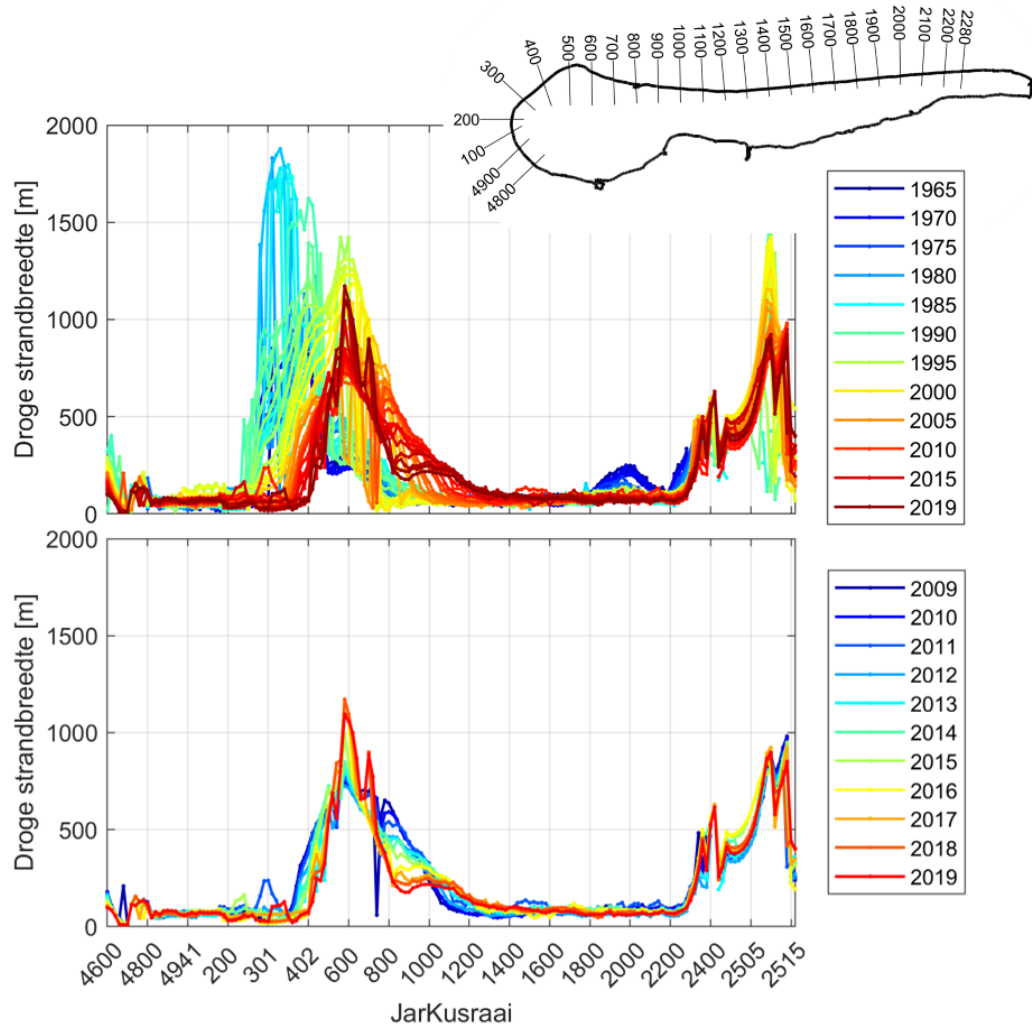
Figuur 7-3: Ontwikkeling duinvoet positie t.o.v. RSP over de periode 1965 tot 2022.

### 7.3.3 Strandbreedte

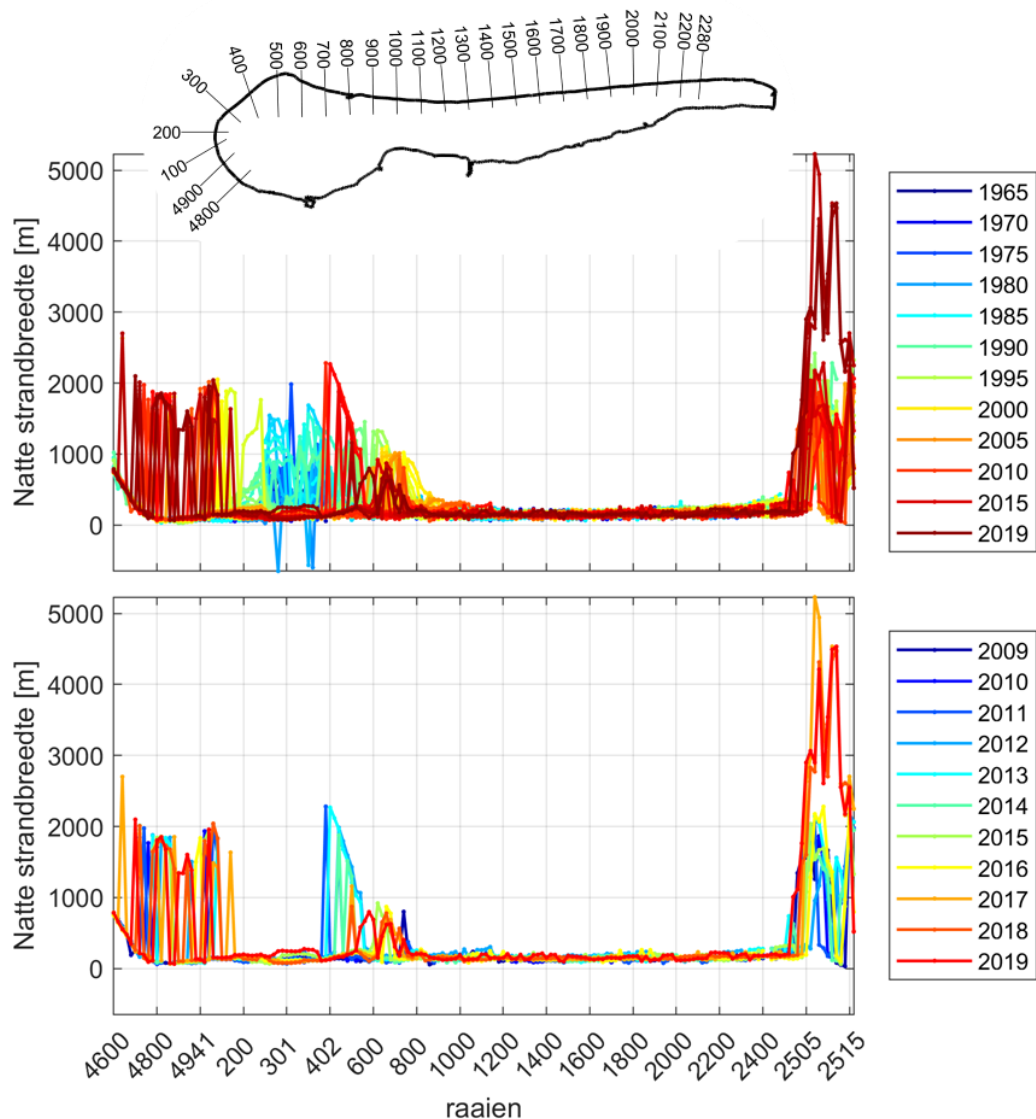
Het onderhouden van een strandbreedte is geen doelstelling van het beleid dat Rijkswaterstaat binnen Uitvoeringsprogramma Kustlijnzorg uitvoert voor het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, maar wel van belang voor recreatie. Er is onderscheid tussen het natte strand en het droge strand. De natte strandbreedte is de horizontale afstand tussen het snijpunt van het strandprofiel met de gemiddeld laag water (GLW) en gemiddeld hoog

water (GHW). De droge strandbreedte is de afstand tussen de snijpunten van het strandprofiel met de GHW en de DV (zie Appendix A3 voor de berekeningsmethode). In Figuur 7-4 en Figuur 7-5 staat de ontwikkeling van de droge en natte strandbreedte tussen 1965 en 2019 langs de kust van Ameland.

De figuren laten duidelijke variatie zien in de strandbreedte langs de kop en staart van het eiland. Langs de centrale eilandkust (raai 900-2280) is zowel de droge als natte strandbreedte vrij constant.



Figuur 7-4: Ontwikkeling droge strandbreedte voor de periode 1965 – 2019 (boven) en 2009-2019 (onder) voor alle raaien bij de kust van Ameland.



Figuur 7-5: Ontwikkeling natte strandbreedte voor de periode 1965 – 2019 (boven) en 2009-2019 (onder) voor alle raaien bij de kust van Ameland.

### 7.3.4 Faalkans eerste duinenrij/zeereep

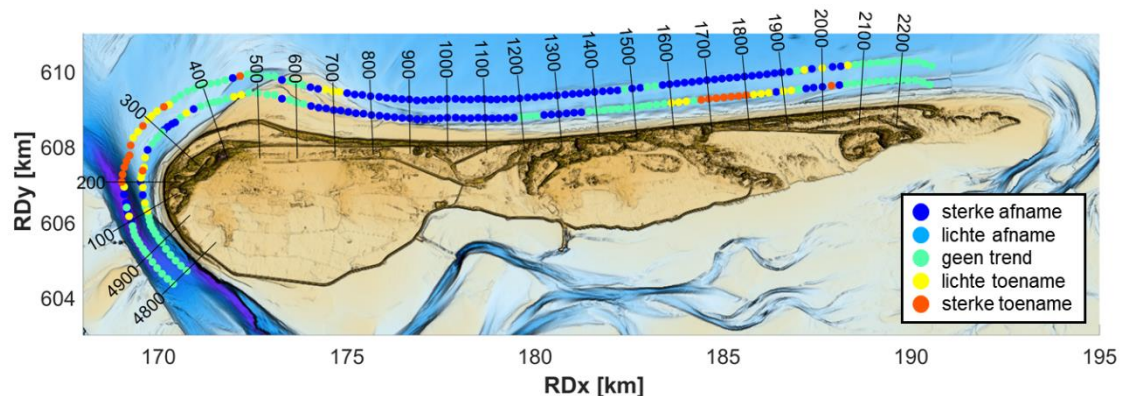
De wettelijke beoordeling van de duinen als primaire waterkering is gebaseerd op het bepalen van de hoeveelheid duinafslag onder maatgevende condities. Bij deze beoordeling komt geen informatie beschikbaar over het effect van suppleties op de ontwikkeling van de veiligheid. Om dit effect in beeld te kunnen brengen is in 2011 een database samengesteld met faalkansen van alle JarKus raaien langs de Nederlandse duinenkust, voor de jaren 1965-2010 (HKV, 2011; zie Appendix A4). Op basis van deze database zijn analyses uitgevoerd van de effecten van het suppletiebeleid door de jaren heen op de faalkansen van de duinen (HKV, 2012). In 2017 is deze database geactualiseerd voor de periode tot en met 2017 (HKV, 2017).

De hierbij berekende faalkansen hebben geen officiële betekenis voor de faalkansen van de duinwaterkering, omdat het ontwikkelde probabilistische duinafslagmodel geen officiële status binnen het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI) heeft.

Trends in de ontwikkeling van de faalkansen zijn bepaald voor twee perioden: 1965-1990 en 1990-2017. Figuur 7-6 toont de trend in de faalkansen van de eerste duinenrij van Ameland voor elke periode. Er is een onderverdeling aangebracht in vijf klassen:

- 1 De faalkansen zijn sterk afgenomen in deze periode: de trend is zodanig dat een afname van de faalkansen met een factor 10 minder dan 10 jaar heeft geduurd (donkerblauw).
- 2 De faalkansen zijn licht afgenomen in deze periode: de trend is zodanig dat een afname van de faalkansen met een factor 10 meer dan 10 jaar heeft geduurd (lichtblauw).
- 3 Er zijn slechts 4 of minder faalkansen berekend in de beschouwde periode (vanwege een gebrek aan JarKus data of bruikbare resultaten van PC-Ring), op basis waarvan geen trend wordt weergegeven (groen).
- 4 De faalkansen zijn licht toegenomen in deze periode: de trend is zodanig dat een toename van de faalkansen met een factor 10 meer dan 10 jaar heeft geduurd (geel).
- 5 De faalkansen zijn sterk toegenomen in deze periode: de trend is zodanig dat een toename van de faalkansen met een factor 10 minder dan 10 jaar heeft geduurd (oranje).

De figuur laat zien dat de berekende faalkansen na 1990 met name op de eilandkop (raai 200-340) sterk is toegenomen. Dit hangt samen met het opdringen van het Oostgat, wat voor erosie zorgt. De faalkansen voor het zuidwesten van de eilandkop (raai 4800-200) en het noordoosten van de eilandkop (raai 340-660) is vrijwel gelijk gebleven. Op veel plekken langs de centrale eilandkust (raai 900-2280) is de faalkans na 1990 afgenomen. Voor de eilandstaart (raai 2280-2516) is de faalkans ook vrijwel overal gelijk gebleven.



Figuur 7-6: Trend in de faalkansen van de eerste duinenrij van Ameland voor de perioden 1965-1990 (meest landwaarts) en 1990-2017 (meest zeewaarts).



# Referenties

Beckering Vinckers, J.A., 1943, Amelander Gat, Rijkswaterstaat studiedienst Hoorn, Nota D98.

Centraal Bureau voor de Statistiek, 2023. *Inwoners per gemeente* [Dataset]. Geraadpleegd van <https://www.cbs.nl/nl-nl/visualisaties/dashboard-bevolking/regionaal/inwoners> (12/07/23)

Cleveringa, J., C.G. Israel, en D.W. Dunsbergen, 2005, De Westkust van Ameland. Resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005. Rapport RIKZ/2005.029. Rijkswaterstaat RIKZ (Den Haag), 74 pp.

De Groen, F., Van Zelst, V., Van der Valk, L., Arens, B., 2019. Natuurlijk Veilig door Kust- en Zeereepbeheer. Deltares rapport: 11203683-002-ZKS-0014

De Jong, J., 1984. Age and vegetational history of the coastal dunes in the Frisian Islands, The Netherlands. *Geologie en Mijnbouw* 63, 269e275.

De Jong, B., Keijsers, J. G., Riksen, M. J., Krol, J., & Slim, P. A., 2014. 'Doing nothing' to maintain the dunes on Ameland does not affect coastal safety. Soft engineering vs. a dynamic approach in coastal dune management: A case study on the North Sea barrier island of Ameland, the Netherlands. *Journal of Coastal Research*, 30(4), 670-684.

De Vries, S., Gong, Y. & Hoonhooft, B. (2019). The role of sediment supply to the aeolian coastal dune system in contrasting areas. In *Coastal Sediments 2019: Proceedings of the 9th International Conference* (pp. 1240-1248).

Elias, E.P.L., 2021. Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie. Deltares rapport 11206794. 84 pp.

Elias, E.P.L., 2022. Aanlandingsbanken Schiermonnikoog. Rapport Deltares: 11209263-002-ZKS-0002, Delft, 45 pp.

Elias, E.P.L. & Bruens, A., 2013. Beheerbibliotheek Ameland. Feiten en cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004- ZKS-0015, 1 november 2013

Elias, E.P.L. & Oost, A., 2021. Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Deltares rapport 11205236. 130 pp.

Elias, E. P. L., Pearson, S. G., van der Spek, A. J., & Pluis, S., 2022a. Understanding meso-scale processes at a mixed-energy tidal inlet: Ameland Inlet, the Netherlands—Implications for coastal maintenance. *Ocean & Coastal Management*, 222, 106125.

Elias, E. P. L., Van der Spek, A. J., Pearson, S. G., & Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology*, 415, 105956.

Elias, E.P.L., Vermeer, N., Van der Vegt, H., 2022b. Morfologisch onderzoek Zeegat van Ameland. Deltares rapport: 11208035. 58 pp.

- Gedeputeerde Staten van de provincie Fryslân, 2021. Provinciaal Blad Nr. 99877. Uitgave 5 oktober 2021.
- Groen, F., van Zelst, V., Van der Valk, L., Arens, B., 2019. Natuurlijk Veilig door Kust- en Zeereepbeheer. Deltares rapport 11203683-002. 74 pp.
- Hijma, M.P., 2022. Bodemdalingsmonitor 2022 - Kustfundament en de getijdenbekkens - Overzicht onderzoek 2018-2021, Deltares report 11208035-003-ZKS-0003: 25.
- Hijma, M.P. en Kooi, H., 2018. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2) - Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden, Deltares report 11202190-001-ZKS-0001\_v1.0.
- HKV, 2011. Indicatoren voor kustlijnzorg. Analyse van indicatoren voor veiligheid en recreatie. HKV rapport pr2063.20. Wim van Balen, Vincent Vuik en Saskia van Vuren, 29 oktober 2011.
- HKV, 2012. Indicatoren voor kustlijnzorg. Analyse van stormen, suppleties en kustveiligheid. HKV rapport pr2063.30. Vincent Vuik, Wim van Balen en Andries Paarlberg, 29 oktober 2012.
- HKV, 2017. Faalkansendatabase duinen. Update voor de periode 1965-2017. HKV rapport PR2063.70. Vincent Vuik en Guy Dupuits, december 2017.
- Holzhauser, H., Vanagt, T., Lock, K., van Oeveren, C., De Backer, A., Hostens, K., van Dalfsen, J. & Reinders, J., 2014. Ecologische effecten suppletie Ameland 2009-2012.
- IJff, S., Smits, B., Van Zelst, V., Arens, B., 2019. Natuurlijk Veilig – Landschapsvormende processen. Invloed van suppleties en beheer op dynamiek in de zeereep. Deltares rapport: 11202190-001-ZKS-0012
- Lammerts, E.J., Ecoloog SBB, Meijer, J., Vriens, G., Krap, S., Molenaar, W., Valk, H. (2017). Document PAS-gebiedsanalyse voor Ameland.
- Löffler, M.A.M., C.C. de Leeuw, M.E. ten Haaf, S.K. Verbeek, S.K., A.P. Oost, A.P. Grootjans, A.P., E.J. Lammerts & R.M.K. Haring, 2008: Eilanden natuurlijk. Natuurlijke dynamiek en veerkracht op de Waddeneilanden. Het Tij Geleerd. ISBN/EAN 978-90-70322-30-4.
- Mastbergen, D., Nederhoff, K., Van der Valk, B., Maarse, M., 2017. Beheerbibliotheek Ameland. Deltares rapport 11200538-002. 152 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012. Basiskustlijn 2012. Herziening Basiskustlijn.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2018. Basiskustlijn 2017 Herziening van de ligging van de basiskustlijn. 29 pp.
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2023. Herziening van de ligging van de basiskustlijn. 81 pp.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1990. Kustverdediging na 1990; beleidskeuze voor de kustlijnzorg. (de 1e kustnota).
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1995. Nota Kustbalans 1995 – De Tweede Kustnota.

Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003. Basiskustlijn 2001 Evaluatie ligging Basiskustlijn. 92 pp.

Mulder, J. P. M., 2000. Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel: Advies voor dynamisch handhaven in de 21e eeuw. rapport RIKZ/2000.36.

Nichols, M.M., 1989. Sediment accumulation rates and relative sea-level rise in lagoons. *Marine Geology* 88: 201-219.

Nougues, L., 2022. Bodemdalingsmonitor 2022 Kustfundament en getijdenbekkens - Bodemdaling en GNSS-stations, Deltares report 11208035-003-ZKS-0004.

Oost, A.P., 1995. Dynamics and Sedimentary Development of the Dutch Wadden Sea with Emphasis on the Frisian Inlet. A Study of Barrier Islands, Ebb-Tidal Deltas, Inlets and Drainage Basins. *Geologica Ultraiectina, Mededelingen van de Faculteit Aardwetenschappen* 126, Utrecht University (Utrecht): 454 pp.

Oost, A.P. & De Haas, H., 1992. Het Friesche Zeegat, morfologisch-sedimentologische veranderingen in de periode 1970-1987, een getijde inlet systeem uit evenwicht. Deel 1 and 2, rapport Kustgenese, 68 pp.

Oost, A. & Cleveringa, J., 2017. Morfologie Kombergingsgebied Borndiep. Deltares rapport 11200521-000. 128 pp.

Oost, A., Cleveringa, J. & Taal, M., 2020. Kombergingsrapport Friesche Zeegat. Deltares rapport: 11205229-001. 131 pp.

Oost, A.P., R. van Buren & Kieftenburg, A., 2017. Trilateral desktop study on the hydromorphology of ebb-tidal deltas of the Wadden Sea in the light of climate change and human interests. Deltares 11200926-000, 334 pp.

Peters, S., 2013. Drinkwater op een eiland: van vér halen of zelf maken? H<sub>2</sub>O waternetwerk, nr 11. November 2013. 34-37 pp.

Postma, J.T., 1982. Ontwikkeling van het Pinkegat voor zover van belang voor de kustontwikkeling van Ameland. Rijkswaterstaat, Meet- en Adviesdienst, nota 82-30, 16 pp.

Quataert, E., de Goede, R., 2023. Factsheets herziening BKL. Deltares rapport: 11208038-002-ZKS-0001. 185 pp.

Rijkswaterstaat, 2022. Eindrapportage Pilotsuppletie buitendelta Ameland Zeegat.

Rus, J.S. en H. Bakker (2012). Hydrologische systeemanalyse Waddeneilanden; Ameland, Vitens, Royal Haskoning, Groningen.

Spanhoff, R., Biegel, E.J., Walburg, A.M., 2002. Evaluatie onderwatersuppletie Ameland. Werkdocument RIKZ/OS/2002. 105x, Rijkswaterstaat RIKZ (Den Haag).

Speelman, H., Oost, A., Verweij, H., & Wang, Z. B., 2009. De ontwikkeling van het Waddengebied in tijd en ruimte. Position paper geosciences. Leeuwarden: Waddenacademie.

Steetzel, H., Van Santen, R., Coumou, L., McCall, R., De Goede, R., De Bakker, A., 2023. Achtergrond Sterktemodel Duinafslaginstrumentarium. BOI Zandige Waterkeringen.

Stolte, W., Baart, F., Muis, S., Hijma, M.P., Taal, M., Le Bars, D., Drijfhout, S. (2023). Zeespiegelmonitor 2022, Deltares report 11209266-000-ZKS-0001. 151 pp.

Tweede Kamer der Staten-Generaal, 2021. Waterbeleid. Vergaderjaar 2021–2022, nota 27 625, nr. 557, 16 november 2021

Van der Spek, A. J. F., 1994. Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Faculteit Aardwetenschappen: Universiteit Utrecht.

Van Heteren, S., Van der Spek, A.J.F., 2003. Long-term Evolution of a Small Estuary: the Lauwerszee (Northern Netherlands). TNO Report NITG 03-108-A. Netherlands Institute of Applied Geosciences TNO - National Geological Survey, Utrecht.

Van Onselen & Vermaas, 2020. Analyse Geulwandsuppletie Ameland Zuidwest. Deltares rapport: 1205236-002-ZKS-0003. 38 pp.

Van Oosten, M. F., Steur, G. G. L., Heijink, W., de Bakker, H., Boersma, O. H., & Hamming, C. (1986). Bodemkaart van Nederland schaal 1 : 50.000 : toelichting bij de kaarten van de Waddeneilanden Vlieland, Terschelling, Ameland, Schiermonnikoog. STIBOKA. <https://edepot.wur.nl/117837>.

Van Staalduinen, C. J. (Ed.), 1977. Geologisch onderzoek van het Nederlandse Waddengebied (Vol. 1). De Dienst.

Vermaas, T., Elias, E., Vonhögen-Peeters, L., 2013. Ontwikkeling gefaseerde suppletie Ameland 2010-2011. Deltares rapport 1207724-002. 61 pp.

Vermaas, T., Mastbergen, D., Schrijvershof, R., Mesdag, C., Gaida, T., 2019. Geologie, bestorting en strandvallen bij Ameland zuidwest, eindrapportage 2019. Deltares, Rapport 11203683- 002

Vos, P. C., & De Vries, S., 2013. 2e generatie palaeogeografische kaarten van Nederland (versie 2.0). Deltares.

Vos, P. C., & Knol, E., 2015. Holocene landscape reconstruction of the Wadden Sea area between Marsdiep and Weser: explanation of the coastal evolution and visualisation of the landscape development of the northern Netherlands and Niedersachsen in five palaeogeographical maps from 500 BC to present. Netherlands Journal of Geosciences, 94(2), 157-183.

Westhoff, V., Van Oosten, M. F. & Van Bohemen, H. D., 1991. De plantengroei van de Waddeneilanden (Ser. Natuurhistorische bibliotheek van de knnv, nr. 53). Stichting Uitgeverij Koninklijke Nederlandse Natuurhistorische Vereniging.

Wijnberg, K.M., 1995. Morphologic Behavior of a Barred Coast over a Period of Decades. Ph.D. thesis, University Utrecht, Faculty of Geographical Sciences (Utrecht), 245 p

Witteveen en Bos/ Wetterskip Fryslân, 2013. Projectplan dijkverbetering Waddenzeedijk Ameland, referentie AME5-1/holj2/189, 26 juni 2013



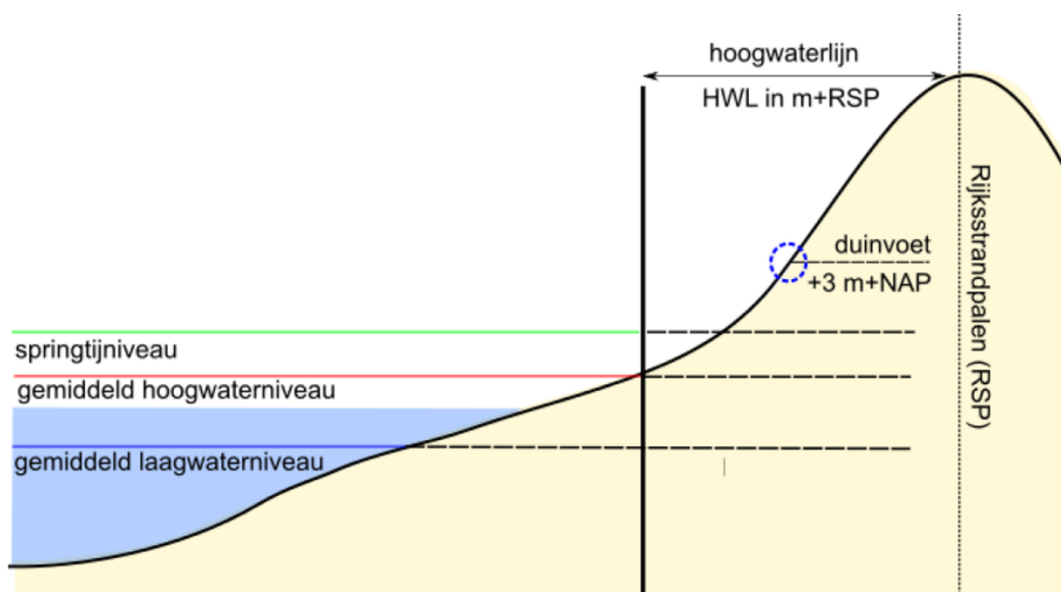
# A Kustindicatoren: berekenmethode

## A.1 Gemiddeld hoog- en laagwater

Het gemiddeld hoogwater niveau (GHW) is het verticale niveau ten opzichte van NAP (rode lijn in Figuur A 1). De doorkruising van GHW met het JarKus-profiel geeft dan de horizontale positie ten opzichte van RSP, de hoogwaterlijn (HWL). Dezelfde methode wordt gebruikt voor het gemiddeld laagwater niveau (GLW, blauwe lijn in Figuur A 1) en de laagwaterlijn (LWL).

Het gemiddeld hoog- en laagwater niveau (GHW en GLW) zijn berekend op basis van het astronomisch getij van het jaar 2018, en is gebaseerd op de harmonische componenten vanuit TPXO 8.0 (Egbert en Erofeeva, 2002<sup>3</sup>). TPXO is een wereldwijd model van de getijbewegingen gebaseerd op de TOPEX/Poseidon en JOSEN satelliet data en bevat de 13 harmonische componenten: M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1, Q1, MF, MM, M4, MS4, MN4.

Van het getij-sigitaal wordt het gemiddelde van alle maxima (alle hoogwater-niveaus) en minima (alle laagwater-niveaus) bepaald, dit geeft dan het GHW en GLW. De GHW en GLW is dus bepaald inclusief het springtij. Het GHW en GLW dat nu op de server staat, wordt momenteel niet jaarlijks geüpdatet. Dit is voornamelijk omdat het GHW en GLW op jaarlijkse basis nauwelijks zullen variëren. Ook is het voor de bepaling van de overige kustindicatoren vaak beter om een vast referentiepunt te hebben, zodat het effect van veranderingen in het JarKus-profiel op de indicatoren niet wordt beïnvloed door variaties in GHW en GLW.

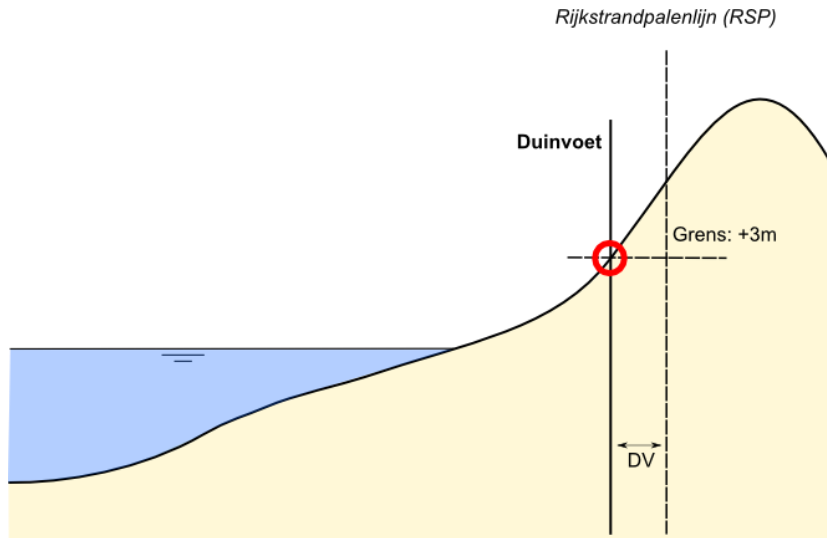


Figuur A 1: Rekenmethodiek voor de bepaling van gemiddeld hoogwater niveau (GHW), gemiddeld laagwater niveau (GLW), hoogwaterlijn (HWL) en laagwaterlijn (LWL).

<sup>3</sup> Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183–204. [http://doi.org/10.1175/1520-0426\(2002\)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0426(2002)019<0183:EIMOBO>2.0.CO;2)

## A.2 Duinvoet

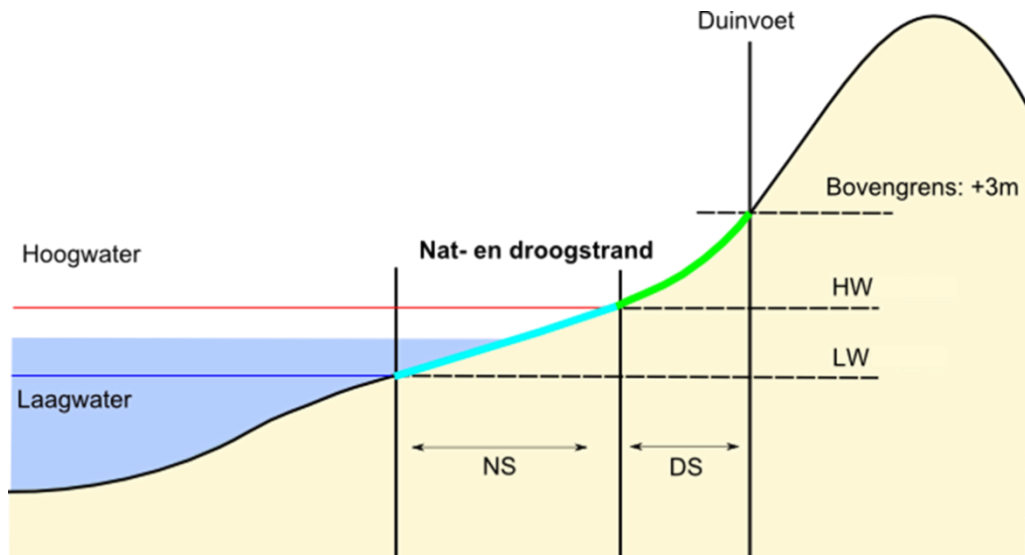
De duinvoet (DV in Figuur A 2) is de overgang van het droge strand naar de eerste duinenrij. Deze wordt bepaald als de positie van het snijpunt van het profiel met de +3 m NAP lijn, ten opzichte van RSP. Dit snijpunt hoeft in de realiteit niet altijd overeen te komen met de daadwerkelijke overgang van strand naar duinen (i.e. knikpunt in het profiel).



Figuur A 2: Rekenmethodiek voor de bepaling van de duinvoet.

## A.3 Strandbreedte

De strandbreedte is geen indicator in het beleid van Rijkswaterstaat, maar wel van belang voor bijvoorbeeld recreatie. Er wordt onderscheid gemaakt tussen het natte strand en het droge strand. Het natte strand is de horizontale afstand tussen het snijpunt van het strandprofiel met de laagwaterlijn (LW) en hoogwaterlijn (HW). Het droog strand is de afstand tussen de snijpunten van het strandprofiel met de hoogwaterlijn (HW) en de duinvoet (+3m). Deze definities zijn weergegeven in Figuur A 3.



Figuur A 3: Rekenmethodiek voor de bepaling van de strandbreedte, natte strandbreedte (NS) in blauw en droge strandbreedte (DS) in groen.

## A.4 Faalkans van de eerste duinenrij

De officiële wettelijke toetsing van de duinen als primaire waterkering, Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI), is gebaseerd op het bepalen van de hoeveelheid duinafslag onder maatgevende belastingcondities. De belasting bestaat uit een combinatie van een extreem hoge waterstand en bijbehorende golfcondities. Elk jaar wordt voor enkele duizenden locaties langs de Nederlandse kust een dwarsprofiel gemeten. Deze jaarlijkse kustmetingen (JarKus metingen) bestrijken zowel het droge deel (strand en duin) als het natte deel (vooroever) van het profiel. Het programma DUROS+ wordt gebruikt om bij de maatgevende belastingcondities en een gegeven dwarsprofiel een maatgevende afslaglengte te berekenen. Als de berekende afslag de wettelijke grenzen niet overschrijdt, wordt de betreffende locatie goedgekeurd.

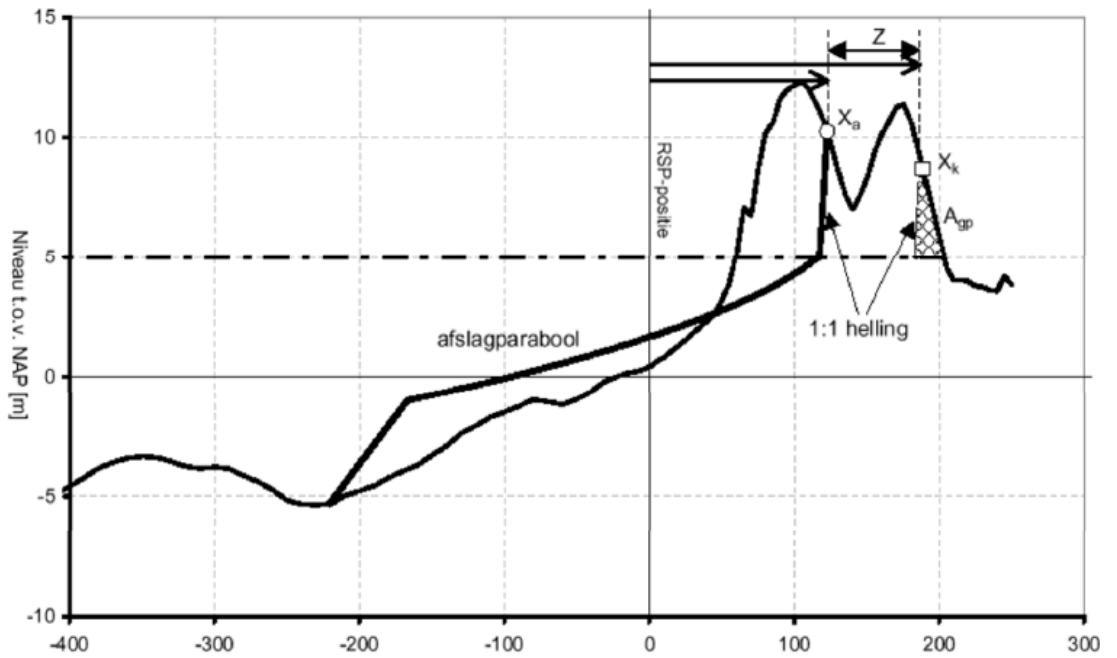
De toetsing geeft dus antwoord op de vraag of de duinen op een bepaalde locatie wel of niet aan de gestelde norm voldoen. Bij deze toetsing komt geen informatie beschikbaar over de ontwikkeling (trend) in (on)veiligheid en het effect van suppleties op deze trend. Om dit effect in beeld te kunnen brengen zijn faalkansen van de duinen berekend (HKV, 2011), per raai per jaar voor de periode 1965-2010. Deze getallen geven de kans op een duindoorbraak per jaar. De doorbraakkans kan bijvoorbeeld 1/10.000 per jaar zijn, wat inhoudt dat op die locatie gemiddeld eens per 10.000 jaar een doorbraak van de duinen te verwachten is. Op basis van deze faalkansen zijn analyses uitgevoerd van de effecten van veranderingen in suppletiebeleid door de jaren heen op de faalkansen van de duinen (HKV, 2012). Deze database is geactualiseerd voor de periode tot en met 2017 (HKV, 2017).

De berekende faalkansen hebben in absolute zin geen betekenis voor de officiële faalkansen van de duinwaterkering. Het ontwikkelde probabilistische duinafslagmodel heeft daarnaast geen officiële status binnen het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI).

Voor het bepalen van de faalkansen is een probabilistische duinafslagmodel in Matlab ontwikkeld. Hierbij wordt DUROS+ gebruikt om bij een gegeven belasting en dwarsprofiel een afslaglengte te bepalen. Er is sprake van falen zodra het berekende afslagpunt ( $X_a$  of  $X_k$  in Figuur A 4) een kritiek afslagpunt overschrijdt.

Falen kan optreden bij een zeer hoge waterstand, met een kleine kans van voorkomen. Een andere mogelijkheid is een combinatie van een iets minder hoge waterstand, met een grote waarde voor de modelfactor. Of een combinatie met een kleine waarde voor de korreldiameter.

Elke combinatie die tot falen leidt, heeft een kans van voorkomen. De First Order Reliability Method, kortweg aangeduid als FORM, is een methode die bepaalt welke combinatie die tot falen leidt de grootste kans van voorkomen heeft. Deze kans van voorkomen is de faalkans. De geselecteerde combinatie staat bekend als het ontwerppunt (Engels: design point). Voor duinen is in vrijwel alle gevallen de waterstand de maatgevende parameter. Zonder hoge waterstand treedt er geen sterke golfaanval op bij het duinfront, en is de kans op duinafslag nihil. In het ontwerppunt is daarom een hoge waterstand aanwezig, in combinatie met een enigszins (maar niet extreem) conservatief gekozen waarde voor de andere parameters.



Figuur A 4: Afslagpunt ( $X_a$ ) en kritiek afslagpunt ( $X_k$ ), waarbij het kritieke afslagpunt is bepaald op basis van een kritiek afslagvolume ( $A_{gp}$ ). De horizontale afstand  $Z$  is gedefinieerd als  $X_k - X_a$ , waarbij  $Z < 0$  betekent dat er sprake is van falen. Uit HKV (2017).



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)