

Beheerbibliotheek Terschelling

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



Beheerbibliotheek Terschelling

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

Auteur(s)

Ellen Quataert

Albert Oost

Marc Hijma

Edwin Elias

Beheerbibliotheek Terschelling

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

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Stefan Pluis
Referenties	
Trefwoorden	Kustvak, Terschelling, Noordsvaarder, Boschplaat, morfologische ontwikkeling, beheer en onderhoud kust, supplementies, kustindicatoren, natuurbeleid, bodemdaling, duinen, strand, vooroever, buitendelta

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	30-10-2020
Projectnummer	11205236-001
Document ID	11205236-001-ZKS-0002
Pagina's	75
Status	definitief

Auteurs(s)

	Ellen Quataert Albert Oost Marc Hijma Edwin Elias	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Ellen Quataert Albert Oost Marc Hijma Edwin Elias	Marcel Taal	Toon Segeren	

Samenvatting

Om de kennis over het kuststelsel uit te breiden en te verspreiden voert Deltares in opdracht van Rijkswaterstaat kustonderzoek uit binnen het project KPP-B&O Kust (Kennis Primaire Processen Beheer en Onderhoud Kust) in nauwe samenwerking met andere onderzoeksinstituten en met Rijkswaterstaat. Nieuwe inzichten die uit het onderzoek voortkomen worden gebruikt om het kustbeleid maar ook het beheer en onderhoud van de kust verder te ontwikkelen. Dit kan er toe leiden dat suppletiepraktijken worden aangepast. In deze beheerbibliotheek van de kust van Terschelling wordt de meest recente kennis vanuit onderzoek en beheer samengebracht en inzichtelijk gemaakt. De beheerbibliotheek biedt de basis voor het opstellen van het suppletieprogramma, kustadvies en onderzoek. Dit rapport omvat een beschrijving van het kustlijnbeleid en -beheer, morfologische systeemwerking, kustverdediging/primaire waterkering en gebruiksfuncties van de kust. De kennis in de beheerbibliotheek is ontwikkeld in KPP-B&O Kust, maar ook in andere kustprojecten en wetenschappelijk onderzoek, zoals bijvoorbeeld Kustgenese 2.0.

Over Deltares

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme innovaties, oplossingen en toepassingen voor mens, milieu en maatschappij. We richten ons voornamelijk op delta's, kustregio's en riviergebieden. Omdat het beheer van deze dichtbevolkte en kwetsbare gebieden complex is, werken we nauw samen met overheden, ondernemingen, kennisinstellingen en universiteiten in binnen- en buitenland. Ons motto is 'Enabling Delta Life'.

Als toegepast kennisinstituut zijn we succesvol wanneer onze kennis wordt verzilverd in en voor de samenleving. We stellen hoge eisen aan de kwaliteit van onze kennis en adviezen, rekening houdend met nieuwe wetenschappelijke inzichten, maar ook met de gevolgen die onze adviezen hebben voor milieu en samenleving.

Al onze opdrachten en projecten leveren een bijdrage aan het verstevigen van de kennisbasis. We kijken vanuit een lange termijn perspectief, naar bijdragen voor de oplossingen voor nu. Wij hechten zeer aan openheid en transparantie. Die houding is onder meer terug te zien in het vrij toegankelijk maken van de door Deltares ontwikkelde software en modellen. Open source werkt, is onze vaste overtuiging. Deltares heeft ruim 800 medewerkers en is gevestigd in Delft en Utrecht.

www.deltares.nl

Inhoud

	Samenvatting	4
1	KPP B&O Kust en Beheerbibliotheken	8
1.1	Kustonderhoud en -onderzoek	8
1.2	Waarom een beheerbibliotheek?	8
1.3	Wat staat er in een beheerbibliotheek?	8
1.4	Kustviewer	8
1.5	Kustlijnkaartenboek	9
1.6	Leeswijzer	9
2	Algemene gebiedsbeschrijving	10
3	Beleid t.a.v. kustbeheer en waterveiligheid	12
3.1	Achtergrond kustbeleid dynamisch handhaven	12
3.2	Basiskustlijn voor Terschelling	14
3.3	Waterveiligheidsbeleid	16
4	Gebruiksfuncties kust	18
4.1	Inleiding	18
4.2	Waterveiligheid	18
4.2.1	Historie kustverdedigingswerken	18
4.2.2	Primaire waterkering	19
4.2.3	Beoordeling van de primaire waterkering	20
4.3	Strandrecreatie	21
4.4	Natuur	22
4.5	Drinkwaterwinning	25
5	Lange termijn ontwikkelingen	27
5.1	Inleiding	27
5.2	Paleografische ontwikkeling	27
5.3	Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens	31
6	Beschrijving van het morfologisch systeem	35
6.1	Samenvatting morfologisch gedrag en kenmerken	35
6.2	Zeegat van het Vlie	36
6.2.1	Algemene kenmerken	36
6.2.2	Grootschalige morfologische ontwikkeling	37
6.2.3	Morfologische ontwikkeling bij de Noordsvaarder	40
6.2.4	Morfologische ontwikkeling bij de overgang tussen Noordsvaarder en centrale eilandkust	45
6.3	Centrale Noordzeekust van Terschelling	47
6.3.1	Algemene kenmerken	47
6.3.2	Morfologische ontwikkeling bij de centrale eilandkust	48
6.4	Amelander Zeegat	51
6.4.1	Algemene kenmerken	51
6.4.2	Grootschalige morfologische ontwikkeling	52
6.4.3	De ontwikkeling van de buitendeltasuppletie	55
6.4.4	Morfologische ontwikkeling bij de Boschplaat	56
6.5	Duinen	59
6.5.1	Beheer en ontwikkeling duinen voor 1990	59

6.5.2	Beheer en ontwikkeling duinen na 1990	60
7	Kustlijnontwikkeling	63
7.1	Samenvatting	63
7.2	Zandsuppleties	64
7.3	Ontwikkeling kustindicatoren	64
7.3.1	Ontwikkeling van MKL – BKL	64
7.3.2	Ontwikkeling van de duinvoet	66
7.3.3	Ontwikkeling van strandbreedte	66
7.3.4	Faalkans van de eerste duinenrij / zeereep	67
	Referenties	69
A	Kustindicatoren: berekenmethode	73
A.1	Gemiddeld hoog- en laagwater	73
A.2	Duinvoet	74
A.3	Strandbreedte	74

1 KPP B&O Kust en Beheerbibliotheken

1.1 Kustonderhoud en -onderzoek

Rijkswaterstaat is verantwoordelijk voor het onderhoud van de Nederlandse kust. Hiervoor suppleert Rijkswaterstaat momenteel jaarlijks gemiddeld 12 miljoen m³ zand. Het ontwerp, volume en de uitvoerdatum van de suppletie worden hierbij ook gebaseerd op de kennis van het zandige kuststelsel.

In de loop der jaren zijn er vele studies afgerond en is er 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 project KPP-B&O Kust (Kennis Primaire Processen 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 vanuit onderzoek en beheer & onderhoud per kustvak. Gebruikers zijn Rijkswaterstaat, Deltares en andere (kennis)partijen en regionale beheerders. De beheerbibliotheek biedt onder andere een basis voor het opstellen van het suppletieprogramma, kustadvies en onderzoek.

1.3 Wat staat er in een beheerbibliotheek?

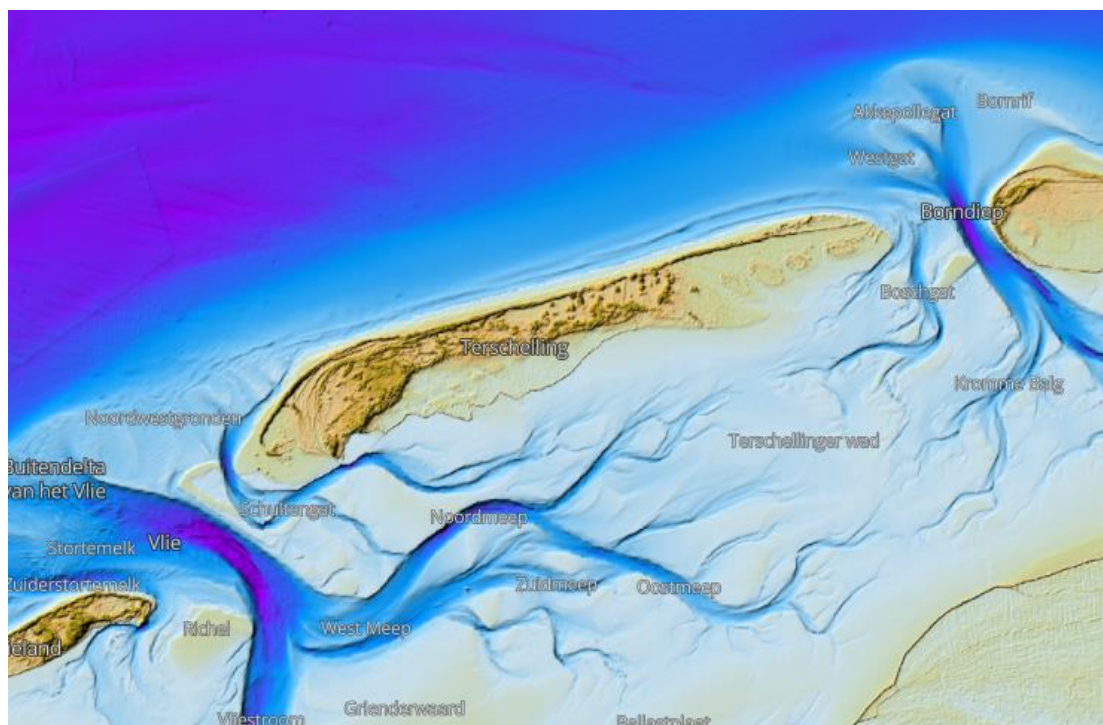
De beheerbibliotheek beschrijft de toestand van het betreffende kustvak en omvat een beschrijving van de morfologische systeemwerking, de kustverdediging en de primaire waterkeringen. Verder bevat de beheerbibliotheek een overzicht van het uitgevoerde kustbeheer, met nadruk op de eerder uitgevoerde suppleties, evenals van 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 project KPP-B&O Kust, maar ook uit eerder uitgevoerde andere kustprojecten en uit wetenschappelijk onderzoek. Tevens wordt opgedane ervaring en kennis uit de uitvoering meegenomen in de beheerbibliotheek.

De voorliggende beheerbibliotheek van het kustvak Terschelling betreft een update van de eerste versie door Elias, Vergouwen en van Oeveren (2016). Belangrijke delen van de tekst zijn uit dit document behouden, daarnaast zijn de resultaten van nieuwe studies opgenomen en tekst, figuren en tabellen aangevuld en geactualiseerd.

1.4 Kustviewer

Aanvullend op de beheerbibliotheek heeft Deltares samen met Rijkswaterstaat een Kustviewer ontwikkeld met een achterliggende database van kustdata. Deze biedt op eenvoudige manier inzicht in de ontwikkeling van de kust. In aanvulling op de figuren in de beheerbibliotheek kan de lezer de ontwikkeling van de Nederlandse Noordzeekust online bekijken via:

<https://www.openearth.nl/coastviewer-static/>



Figuur 1.1 – Een voorbeeld van de Kustviewer. Terschelling is weergegeven met de vaklodging data en benaming van morfologische gebieden. Bron: <https://www.openearth.nl/coastviewer-static/>

1.5 Kustlijkaartenboek

Jaarlijks wordt door Rijkswaterstaat gemeten en berekend hoe de ligging van de kustlijn zich verhoudt tot de basiskustlijn (BKL). Het doel van de BKL is om structurele achteruitgang van de Nederlandse kust te signaleren. Op basis van dit signaal wordt bepaald of er een ingreep, vaak een zandsuppletie, nodig is. Het kustlijkaartenboek wordt jaarlijks opgesteld door Rijkswaterstaat en geeft informatie over de huidige en de verwachte kustlijnligging ten opzichte van de BKL. Ook de trend van de kustlijnontwikkeling wordt weergegeven. De digitale versie van het kustlijkaartenboek is te vinden op:

www.rijkswaterstaat.nl/kustonderhoud

1.6 Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk (Hoofdstuk 2) wordt een algemene gebiedsbeschrijving gegeven van Terschelling, waarin een korte samenvatting wordt gegeven over de inhoud van de daaropvolgende (technisch inhoudelijke) hoofdstukken. In Hoofdstuk 3 wordt de achtergrond van het kustbeleid uitgelegd. Hierin staat een beschrijving van de totstandkoming van de Basiskustlijn, landelijke herzieningen die hebben plaatsgevonden en welke regionale afspraken er vervolgens zijn gemaakt. Ook het beleid met betrekking tot de waterveiligheid met het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium voor de primaire waterkeringen is hierin opgenomen. Hoofdstuk 4 een kort overzicht gegeven van gebruiksfuncties van de kust, namelijk waterveiligheid, strandrecreatie natuur en drinkwatervoorziening. Hoofdstuk 5 start met de lange termijn ontwikkelingen bij Terschelling, waaronder de paleografische ontwikkeling en het onderzoek m.b.t. bodemdaling. Hoofdstuk 6 gaat in op de het morfologisch systeem van Terschelling, waarbij er telkens van grote schaal (Zeegat niveau) naar kleinere schaal (kust niveau) wordt gewerkt. Dit morfologisch gedrag wordt vervolgens gebruikt in Hoofdstuk 7 om de ontwikkeling van de kustindicatoren voor kustlijnbeheer te verklaren, inclusief een overzicht van het uitgevoerde beheer bij Terschelling.

2 Algemene gebiedsbeschrijving

Terschelling is onderdeel van de provincie Friesland en is, vanuit het westen gerekend, het derde Waddeneiland in de rij van Nederlandse Waddeneilanden. Aan de noordkant wordt het eiland ingesloten door de Noordzee, aan de zuidkant door de Waddenzee. De Waddenzee is UNESCO Werelderfgoed. Ten (zuid)westen van Terschelling vinden we het eiland Vlieland en ten oosten Ameland (Figuur 2.1). Terschelling is ingesloten aan de westkant door het zeegat van het Vlie, met de geul Vliestroom, en aan de oostkant door het Amelander Zeegat, met de hoofdgeul Borndiep. Terschelling heeft een oppervlakte van zo'n 90 km². Het eiland is 28 km lang met een maximale breedte van 4 km. De totale kustlengte bedraagt 74 km. Het merendeel van het eiland is natuurgebied. Terschelling bestaat voor bijna 80% uit natuurlijk duinlandschap en kwelders. Landbouw beslaat een 20% van het landgebruik. Stedelijk gebied vormt 3% van het oppervlak. De 4700 inwoners leven voornamelijk in twaalf officiële woonplaatsen waarvan de dorpen West-Terschelling, Midsland en Hoorn de grootste zijn. Toerisme vormt een belangrijke inkomstenbron. In het hoogseizoen herbergt het eiland meer dan driemaal de hoeveelheid mensen.

De hydrodynamica wordt gedomineerd door zowel golf- en getij gedreven forcering. De gemiddelde golfhoogte is 1,5m met een gemiddelde periode van 8s. De hoogste golven komen uit de sector west tot noordoost. Tijdens stormen kunnen golf hoogtes optreden van 5-6m met een periode van 10-15s. Het getij is dubbeldaags met een doortij getijslag van 1,2m en een springtijd getijslag van 2,8 m. De netto langstransporten zijn oostwaarts gericht en worden door Tanczos et al. (2001) geschat tussen de 0,5 tot 0,6 miljoen m³/jaar. Spanhoff et al. (1997) geven een schatting van 1.0 miljoen m³/jaar.

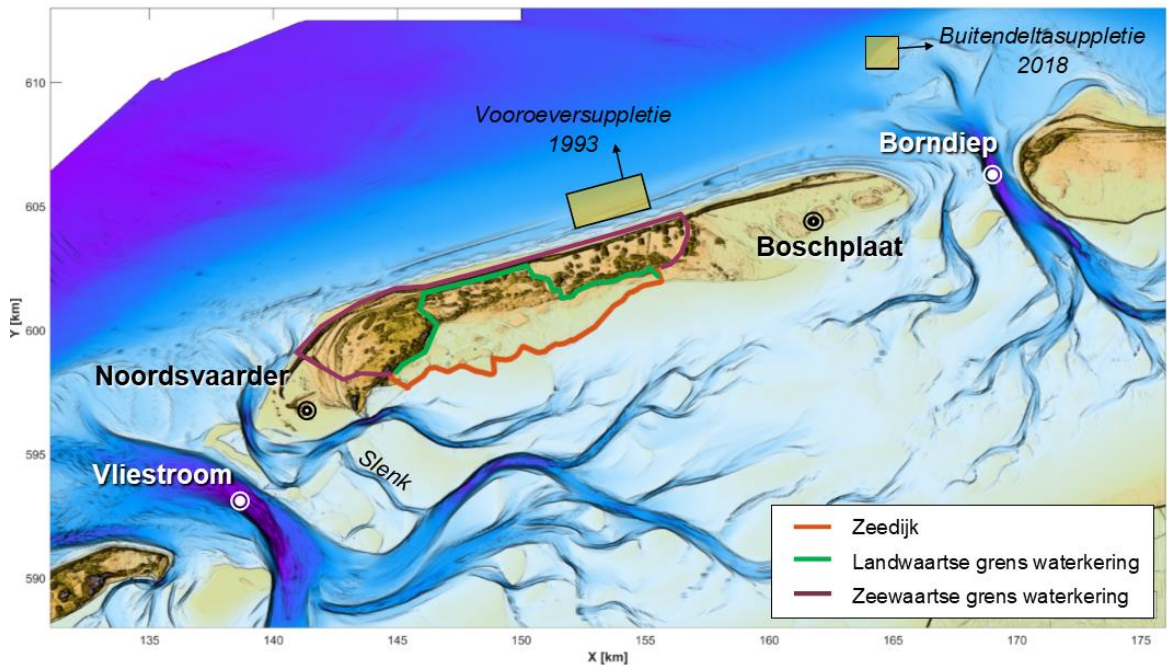
De morfologische ontwikkelingen van de zeegaten bepalen in grote mate de ontwikkeling van het eilandkust en met name de veranderingen bij de eilandkop en – staart (zie Hoofdstuk 6). De kop van het eiland in het westen (Noordsvaarder) is een dynamisch gebied met zowel een erosieve kustlijn door het opdringen van de geul, als een uitbouwende kustlijn door het aanlanden van de buitendelta banken (zie Hoofdstuk 6 en 7). Bij de staart van het eiland is er de laatste tijd sprake van structurele erosie van de Boschplaat, veroorzaakt door ontwikkelingen in het Zeegat van Ameland. De centrale eilandkust wordt gekenmerkt door een 2 tot 3 banken systeem. De gemiddelde korreldiameter (D_{50}) is 220-260 μm in de ondiepe vooroever (nat strand) en neemt af tot 150-160 μm in de buitenste bank. Beheermaatregelen langs de kust van Terschelling zijn beperkt. Alleen in 1993 is er een vooroeversuppletie uitgevoerd in het kader van het Nourtec onderzoeksproject van 1993-1997, (voor locatie: Figuur 2.1). In 2018 is er ook een pilotsuppletie uitgevoerd op de buitendelta van het Zeegat van Ameland binnen Kustgenese 2.0. Het doel van de pilot is te onderzoeken hoe natuurlijke processen in een buitendelta te gebruiken zijn om het kustsysteem effectief van sediment te voorzien.

De Boschplaat is een Europees erkend natuurgebied, en is de grootste eilandkwelder van het Waddengebied. In de bossen ten noorden van West Terschelling liggen de puttenvelden, waar grondwater opgepompt wordt voor drinkwatervoorziening. Het invloedsgebied van de drinkwaterwinning heeft een oppervlakte van circa 5,2 km².

Aan zowel de oostzijde (Boschplaat) als de westzijde (Noordsvaarder) is het beleid de natuurlijke dynamiek ongestoord plaats te laten vinden. Hier is niet overal een Basiskustlijn gedefinieerd (zie Hoofdstuk 3) en beide gebieden liggen grotendeels buiten de primaire waterkeringszone (groene en paarse lijn Figuur 2.1). Harde verdedigingswerken zijn hier niet aanwezig (zie Hoofdstuk 4.2). Alleen aan de Waddenzeezijde van Terschelling ligt een 13,8 km lange zeedijk (rode lijn Figuur 2.1). Er is een stuifdijk aangelegd tussen 1920 en 1922 aan de noordwestkant van het eiland waarmee de Kroonpolders tot stand kwamen. In de periode 1931-1937 werd de Boschplaat met

een stuifdijk (de Derk Hoekstra stuifdijk) op de rest van het eiland aangesloten. De haven van Terschelling is gelegen in West-Terschelling (Figuur 2.1). Hier wordt ook de veerdienst richting Harlingen en Vlieland onderhouden. De vaarroute richting de haven lag voor 1996 door het Schuitengat, maar verloopt sindsdien door de langere route via de Slenk.

Er zijn drie overheidsorganisaties actief in het beheer op de terreinen van Terschelling langs de kust. Rijkswaterstaat heeft tot taak om te zorgen voor de 1) veiligheid tegen overstroming (beheer duinwaterkering) en 2) het kustbeheer. Staatsbosbeheer richt zich vooral op de natuur- en landschapswaarden en op het recreatieve medegebruik. De primaire waterkering langs de Waddenzee is in beheer bij Wetterskip Fryslân. In het duingebied raken de taken van waterveiligheid, kust- en natuurbeheer elkaar. Rijkswaterstaat en Staatsbosbeheer werken daarom nauw samen.



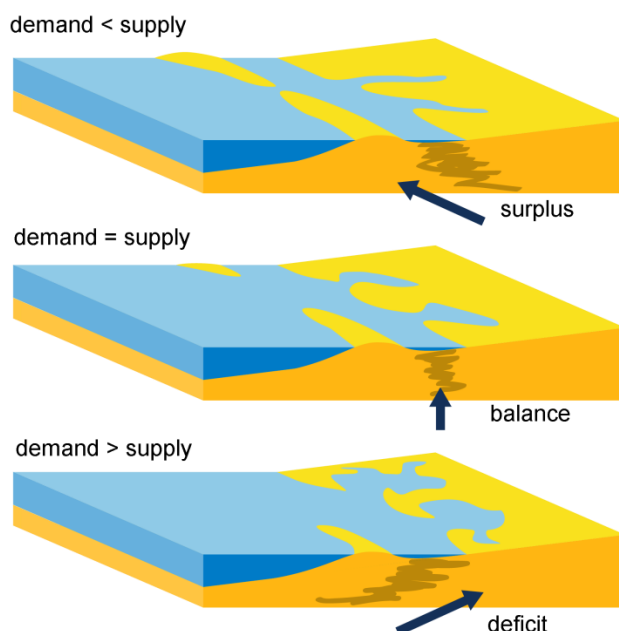
Figuur 2.1 – Overzicht van de belangrijkste karakteristieken van Terschelling (bovenste figuur). De bodem is representatief voor 2016 (zeegat van het Vlie) en 2019 (Amelander zeegat) vaklodingen en aangevuld met het AHN hoogte bestand op het eiland. Satellietfoto van dec. 2016 (onderste figuur) geeft de ligging van de belangrijkste woonkernen op Terschelling weer (bron: Google Earth).

3 Beleid t.a.v. kustbeheer en waterveiligheid

Sinds 1990 wordt de Nederlandse kust dynamisch gehandhaafd middels zandsuppleties. In paragraaf 3.1 wordt een toelichting gegeven over de achtergrond van dit kustbeleid. In paragraaf 3.2 wordt de ligging en beheerpraktijk toegelicht van de Basiskustlijn voor het kustvak Terschelling. In paragraaf 2.3 wordt het beleid met betrekking tot waterveiligheid en boordeling van de primaire waterkering beschreven.

3.1 Achtergrond kustbeleid dynamisch handhaven

Kusterosie - Hoewel er op kleine tijd- en ruimteschaal sprake is van afwisseling tussen kustopbouw en kustafbraak, vertoont de Nederlandse kust gemiddeld genomen al duizenden jaren een eroderende trend. Dit wordt veroorzaakt doordat er sprake is van 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 Noordzee bodem vrijwel tot nul is gereduceerd 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).

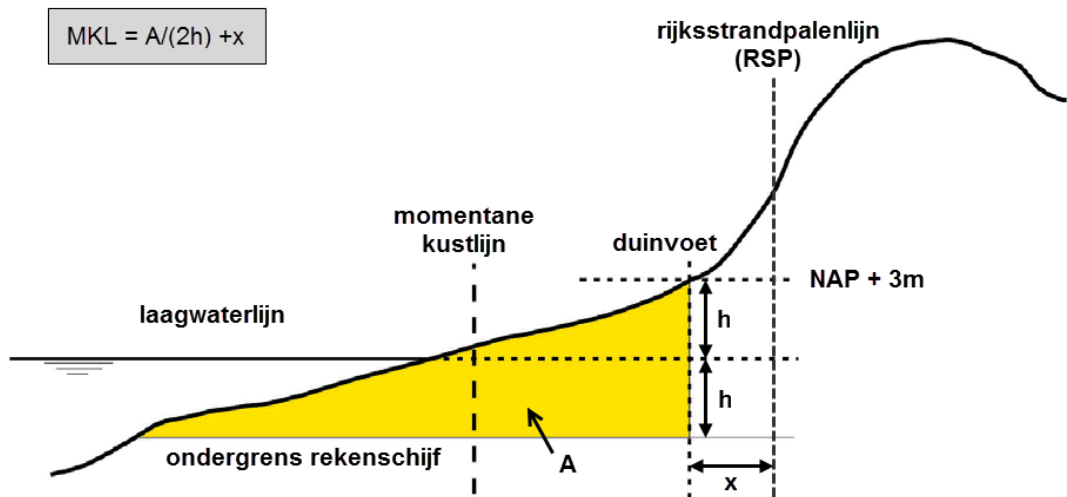
Dynamische kusthandhaving - In 1990 besloot de regering dat de positie van de kustlijn gehandhaafd moest worden, zodat de veiligheid van het achterland en de aanwezige functies langs de kust (natuur, recreatie, drinkwaterwinning) duurzaam behouden blijven (Ministerie van Verkeer en Waterstaat 1990). Sindsdien wordt het structurele zandverlies aangevuld met suppleties. 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. Het doel van de BKL is het signaleren van structurele erosie. 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 Rijkstrandpalenlijn (RSP). De BKL-positie in 1990 is gebaseerd op basis van de trend in de kustlijnliggingen tussen 1980 en 1989. Elk jaar wordt beoordeeld waar de kustlijn zich ten opzichte van deze Basiskustlijn bevindt. Als de Basiskustlijn structureel overschreden dreigt te worden, wordt het zandverlies met suppleties aangevuld. Het benodigde jaarlijkse suppletievolume om de Basiskustlijn te handhaven werd in 1990 vastgesteld op 6 miljoen kubieke meter zand.

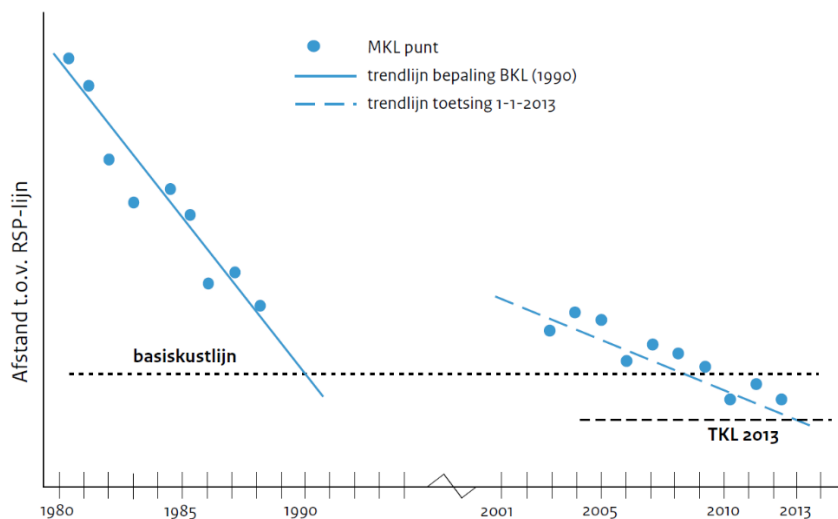
Kustfundament - In de jaren na 1990 groeide het inzicht dat er niet alleen structurele erosie optrad in de ondiepe kustzone rondom de Basiskustlijn, maar ook in dieper water (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1995; Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000; Mulder, 2000). Het structurele zandverlies 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 loopt van de binnenduinrand tot aan de doorgaande -20m NAP-dieptelijn; het actieve zandvolume in dit hele kustfundament moet meegroeiën met de zeespiegel. Het landelijke suppletievolume is daartoe verhoogd van 6 tot 12 miljoen kubieke meter zand per jaar. Bij de verdeling van dit suppletievolume staat het handhaven van de Basiskustlijn nog steeds voorop.

Herziening Basiskustlijn - Om ervoor te zorgen dat de Basiskustlijn overeen blijft komen met de, vanuit de verschillende functies gezien, gewenste kustlijn, is de Basiskustlijn sinds 1990 herzien in 2001, 2012 en 2017 (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003), (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012), (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2018). In de nieuwe Waterwet en het Nationaal Waterplan is, net als in de voorgaande Wet op de Waterkering, de noodzaak voor een terugkerende herziening van de Basiskustlijn vastgelegd.

Momentane Kustlijn (MKL) en Toekomstige Kustlijn (TKL) - Sinds 1965 wordt de kustlijn jaarlijks gemeten (i.e. JARKUS: JAarlijkse KUSmeting). 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 de trend in MKL-positie over de laatste jaren wordt de lineaire trend in de kustlijnligging bepaald. Uit deze trend 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). Eerst wordt het zandvolume (oppervlak A) bepaald in de zogenaamde rekenschijf tussen duinvoet (doorgaans NAP + 3m NAP) en een ondergrens (even ver beneden gemiddeld laagwater als de duinvoet boven gemiddeld laagwater (h)). Vervolgens wordt de Momentane Kustlijn bepaald door het oppervlak te delen door de hoogte van de rekenschijf (2h). Om de Momentane Kustlijn uit te drukken in meters ten opzichte van Rijksstrandpalenlijn (RSP), moet hier de horizontale afstand van de duinvoet tot RSP (x) nog bij worden opgeteld (Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012).



Figuur 3.3 - De Basiskustlijn (BKL) en de jaarlijkse Toekomstige KustLijn (TKL) worden afgeleid uit de trend in de Momentane Kustlijn (MKL) uit de voorgaande jaren (Rijkswaterstaat, 2012).

3.2 Basiskustlijn voor Terschelling

De ligging van de huidige Basiskustlijn voor Terschelling is weergegeven in Figuur 3.4, samen met de positie van enkele JARKUS raaien. De positie van de BKL is ook te zien in de Kustviewer (<https://www.openearth.nl/coastviewer-static/>). De BKL voor Terschelling is in 1993 vastgesteld (Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1993). Na de vaststelling van de BKL in 1990 is deze voor heel Nederland herzien in 2001 (Ministerie van Verkeer en Waterstaat 2003), 2012 (Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2012; Bruens et al., 2012) en 2017 (Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2018). Voor het kustvak Terschelling zijn er geen aanpassingen geweest aan de ligging van de BKL sinds de eerste vaststelling in 1993.

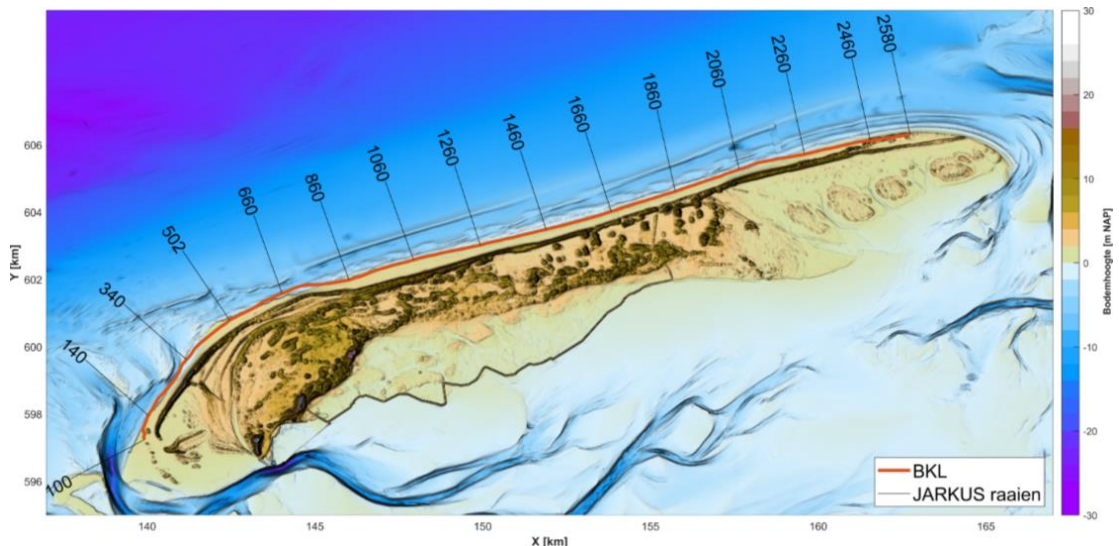
Door het Provinciaal Overlegorgaan Kust (POK) zijn er adviezen gegeven voor het handhaven van de BKL, waarbij rekening is gehouden met alle belangen in de kustzone, zoals deltaveiligheid, sociale en economische belangen en natuurbelangen. Deze adviezen zijn gegeven voor zowel westelijk Terschelling (POK, 1997) als midden en oostelijk Terschelling (POK, 1998), en ook opgenomen in het Beheerplan Rijksgronden Terschelling (2003). Hieronder wordt de huidige beheerpraktijk met betrekking tot de handhaving van de basiskustlijn per deelgebied kort toegelicht.

Bron: POK (1997) Dynamisch Kustbeheer kustzone Terschelling West:

- Zuidelijk van raai 100 (gedeelte Noordsvaarder) wordt de BKL losgelaten
- Raai 100 - 200: De kuststrook bestaat uit een stuifdijk met daarachter een vrijwel onbegroeide zandplaat. Dit gebied leent zich voor (nagenoeg) natuurlijke dynamiek, dus het loslaten van het kustlijnbeheer.
- Raai 200 - 800: Hier is overschrijding van de BKL in bepaalde mate acceptabel. Met een ingreep kan worden gewacht omdat het aanwezige belang (de natuur) in ieder geval op kortere termijn (15 jaar) niet in het geding komt. Als kusterosie leidt tot een lokale doorbraak van de zeereep, kan de natuur baat hebben bij meer dynamiek door incidentele zee-inval in de Kroonpolders. Dit onder voorwaarde dat de veiligheid van de dijkkring niet in het gedrang komt.

Bron: POK (1998) Dynamisch Kustbeheer kustzone Terschelling Midden en Oost:

- Raai 800 – 2000: wordt gekeken naar de zandbalans en duinvoetligging van het totale kustvak. Erosie op de ene plaats kan worden gecompenseerd door aanwas op de andere plaats, ten minste wanneer de belangen in de kuststrook (badstrand, bebouwing, natuur) zich daar niet tegen verzetten.
- Raai 2000 – 2600 (langs de Boschplaat) heeft het kustbeheer als doel het tegengaan van erosie – vanaf de Noordzee-zijde – van het areaal natuurgebied (vnl. kwelders). Er is voorgesteld de BKL flexibel te handhaven, door bij eventuele overschrijding (op lange termijn) van de BKL niet meteen te suppleren. Eerst dienen de positieve en negatieve consequenties voor het natuurgebied (zeereep met uitgestrekt kweldergebied) te worden beschouwd. Wanneer een verkleining van het natuurgebied achter dit kustvak zou dreigen, kan een zandsuppletie worden uitgevoerd.
- Raai 2580 en oostwaarts wordt de basiskustlijn losgelaten.



Figuur 3.4 - De positie van de basiskustlijn (BKL, rode lijn) voor Terschelling en enkele JARKUS raaien (zwarte lijnen en raainummers). De bodem is representatief voor 2016 (zeegat van het Vlie en centrale eilandkust) en 2019 (Amelander zeegat) vaklodningen en aangevuld met het AHN hoogte bestand op het eiland.

3.3 Waterveiligheidsbeleid

Beheerders van primaire waterkeringen moeten minimaal eens in de twaalf jaar beoordelen of hun keringen voldoen aan de wettelijke veiligheidseisen. Dat schrijft de Waterwet¹ voor. Sinds 2017 is het Wettelijk Beoordelings Instrumentarium voor de primaire waterkeringen van kracht, het WBI², voorheen de VTV (Voorschrift Toetsen op Veiligheid). De huidige beoordelingsronde is begin 2017 gestart en duurt tot 1 januari 2023. Deze beoordelingsronde is de eerste ronde op basis van de overstromingskansbenadering en is sinds 2017 vigerend. Deze eerste ronde wordt gebruikt om een eerste veiligheidsbeeld van de keringen te schetsen, ervaring op te doen met de nieuwe systematiek en te leren voor de toekomst. De keringen moeten in 2050 aan de normen in de Waterwet voldoen.

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.

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 kademuuren) en
- niet waterkerende objecten (NWO's, zoals kabels en leidingen).

Voor al deze categorieën zijn beoordelingsinstrumenten beschreven in het WBI.

De primaire waterkeringen zijn voor ongeveer 90% bij de waterschappen en voor ongeveer 10% bij Rijkswaterstaat in beheer. 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.

¹ <https://wetten.overheid.nl/BWBR0025458/>

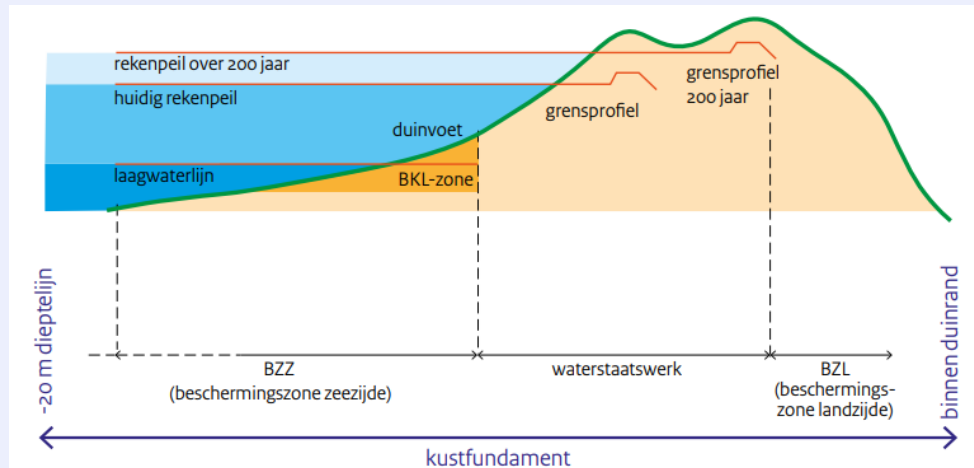
² <https://www.helpdeskwater.nl/onderwerpen/waterveiligheid/primaire/beoordelen/>

Aansluitingsconstructie

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

Grensprofiel

Het grensprofiel is het minimale profiel (zandvolume) dat na een maatgevende belasting bij stormvloed aanwezig moet blijven om de wettelijke veiligheid van het binnendijs gelegen gebied te waarborgen. De dimensies van het benodigde grensprofiel zijn afhankelijk van de Hydraulische Randvoorwaarden. Afhankelijk van de eigenschappen van het duingebied (breed of smal) en andere functies kan de plaats van het grensprofiel binnen het gebied door de beheerder in de legger worden vastgelegd.



Bron: Unierichtlijn Legger Waterkering (2013)

Hybride kering

Een kering die bestaat uit een combinatie van twee type waterkeringen, 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. Bij duinwaterkeringen wordt in de legger het grensprofiel geregistreerd.

Signaleringswaarde

De signaleringswaarde voor een dijktraject is, samen met de ondergrens, als norm in de wet opgenomen. De waarde betreft een overstromingskans. Alle primaire waterkeringen in Nederland hebben een signaleringsnorm gekregen tussen de 1:300 en de 1:1.000.000.

Ondergrens

De ondergrens geeft de maximaal toelaatbare faalkans voor een waterkering weer, die hoort bij de betreffende signaleringswaarde van de kering. Voor de meeste keringen geldt dat de kans van de ondergrens drie maal groter is dan de kans van de signaleringswaarde.

Voorland

Het gebied dat aan de zeezijde van een waterkering gelegen is.

Zeereep

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

4 Gebruiksfuncties kust

4.1 Inleiding

Naast veiligheid is ook ruimte voor andere gebruiksfuncties langs de kust die relevant kunnen zijn voor kustbeheer en – onderhoud. Ook gebruiksfuncties als natuur, recreatie en drinkwaterwinning kunnen invloed hebben op het vaststellen van het suppletieprogramma. In dit hoofdstuk wordt een overzicht en korte beschrijving gegeven van de gebruiksfuncties waterveiligheid (paragraaf 4.2), strandrecreatie (paragraaf 4.3), natuur (paragraaf 4.4) en drinkwater (paragraaf 4.5) voor de kust van Terschelling.

4.2 Waterveiligheid

4.2.1 Historie kustverdedigingswerken

Vanaf 1850 kwam op de Waddeneilanden een groot aantal stuifdijken tot stand (Doedens & Houter, 2015). Rijkswaterstaat en Staatsbosbeheer begonnen toen de verstuiving van de duinen op de eilanden te bestrijden. De belangrijkste maatregelen waren de aanplant van helm en de aanleg van grote stuifdijken, later kwam de grootschalige aanplant van naaldbos daar nog bij. De stuifdijken waren bedoeld om lineaire duinvorming op gang te brengen. Men was bang dat de eilanden anders door afslag in afzonderlijke delen uiteen zouden vallen. Ook het idee om het land achter de stuifdijken geschikter te maken voor landbouw speelde mee. De stuifdijken hielden het zoute water buiten en maakten ontginning en verzoeting mogelijk (weiland in plaats van zoutplanten) (Kooiman, 2015).

Op Terschelling legde Rijkswaterstaat tussen 1920 en 1922 aan de noordwestkant van het eiland de stuifdijken aan waarmee de Kroonpolders tot stand kwamen. In de periode 1931-1937 werd de Boschplaat met een stuifdijk (de Derk Hoekstra stuifdijk) op de rest van het eiland aangesloten (Figuur 4.1). Tussen 1910 en 1940 zijn er bij West, Formerum en Hoorn enorme dennenplantages aangelegd door Staatsbosbeheer; deels voor de houtproductie.

De eerste bedijking om de Terschellinger polder dateert al van ca. 1000 jaar na Christus. De dijk werd in de 19e eeuw verbeterde en na de stormvloedramp van 1953 in drie fasen tussen 1962 en 1968 op Deltahoogte gebracht.



Figuur 4.1 - Stuifdijk bij de Boschplaat in 1962 (bron: <http://terschellingfoto.jalbum.net/>).

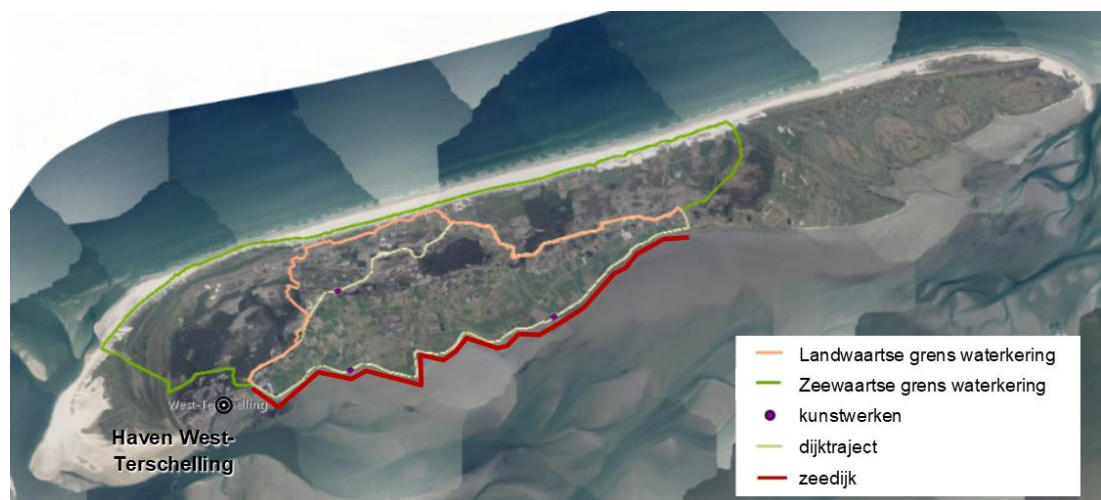
4.2.2 Primaire waterkering

Langs de Noordzeekant van Terschelling ligt circa 17 km duinwaterkering, deze zandige kering wordt beheerd door Rijkswaterstaat Noord-Nederland. De Waddenzeezijde heeft een zeedijk van 13,8 km lang en is in beheer bij Wetterskip Fryslân.

De landwaartse en zeewaartse grens van de primaire waterkering is weergegeven in Figuur 4.2. De primaire waterkering bestaat uit een smalle waterkering in de zeereep in het noorden en een brede waterkering in het oosten en westen die aansluit op de (harde) bestaande dijk. Het dorp West-Terschelling ligt volledig buiten de dijktraject. Vanwege de hoogteligging kan een groot deel van dit gebied beschouwd worden als hoogwatervrij terrein.

Bij de brede kering wordt voor de ligging van het waterkerende duin dat de binnendijkse veiligheid moet garanderen gebruik gemaakt van de aanwezige hoogtes in het duingebied (Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2017). Hoe verder landwaarts het waterkerend duin is gelegen des te meer ruimte bestaat er voor dynamisch beheer van het gebied. Daarom is er op Terschelling, waar mogelijk, voor gekozen om het waterkerende duin te situeren ter plaatse van de meest landwaartse duinregel. Tussen RSP 8 en 12 kon vanwege de aanwezige bebouwing niet voor een meer landwaartse begrenzing van de waterkering worden gekozen.

Met het definiëren van een brede keringszone maakt het gehele duinmassief onderdeel uit van de waterkering. Daarmee kan het beheer van de kering en duinen in samenhang worden uitgevoerd, opdat optimaal kan worden ingespeeld op de dynamische kustprocessen om tot een veilige en duurzame kust te komen, rekening houdend met de gestelde natuurdoelen en maatschappelijk functies. Dit houdt ook in dat profielveranderingen van de zeereep (eerste duinregel), en het tussengebied bijvoorbeeld door het ontstaan van stuifgaten en verstuuving van zand naar het achterliggende duingebied, tot een bepaalde omvang kunnen worden toegelaten zonder dat met actief beheer moet worden ingegrepen. In paragraaf 6.5 wordt er verder ingegaan op dergelijke dynamiek van de zeereep.

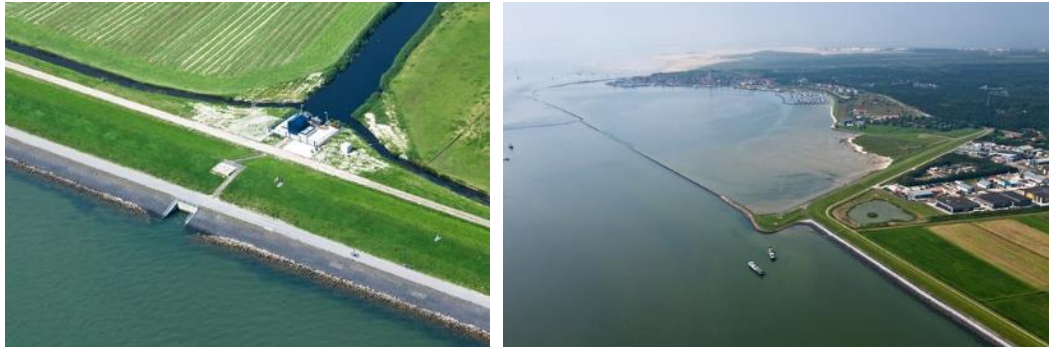


Figuur 4.2 – Overzicht van het dijktraject, zeedijk, landwaartse en zeewaartse grenzen van de primaire waterkering bij Terschelling. Bron:

https://geoservices.rijkswaterstaat.nl/ext/geoweb51/index.html?viewer=Primaire_Keringen.Webviewer

In de waterkering bevinden zich 3 kunstwerken: 1 waterkerende duiker in de zandige kering en 2 uitwateringsduikers (Figuur 4.3) in de dijk. Daarnaast bevindt zich tussen de zeedijk en de duinen aan beide zijden een aansluitingsconstructie (overgang van dijk naar duin): aan de westkant (ten oosten van West-Terschelling) sluit de dijk aan op het duin Bornholm, aan de oostkant van het dijktraject gaat de Dwarsdijk over in het hoge Schipsduin. De haven van Terschelling is gelegen in

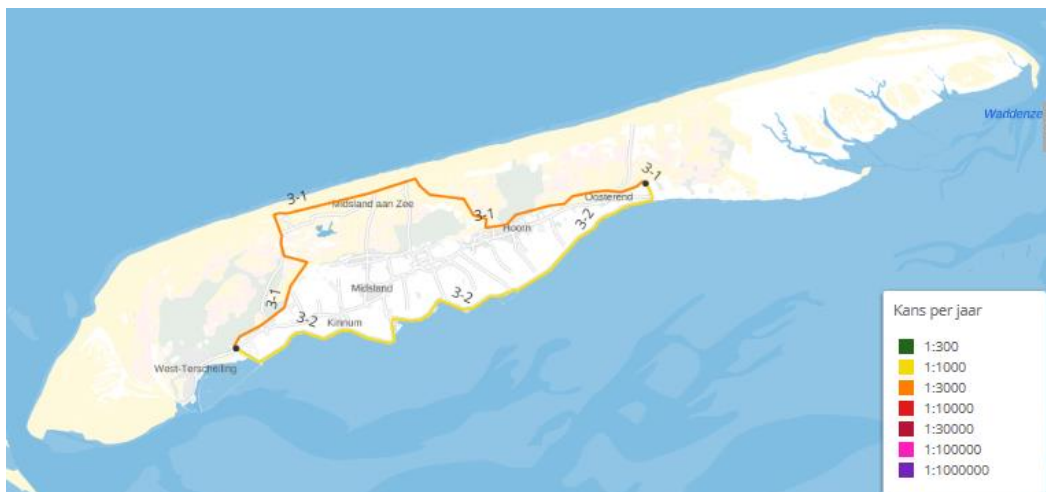
West-Terschelling (Figuur 4.3). Hier wordt ook de veerdienst richting Harlingen en Vlieland onderhouden.



Figuur 4.3 – Luchtfoto van een uitwateringsduiker bij de zeedijk aan de zuidzijde van Terschelling (links) en de haven bij West-Terschelling (rechts). Bron: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat/Joop van Houdt

4.2.3 Beoordeling van de primaire waterkering

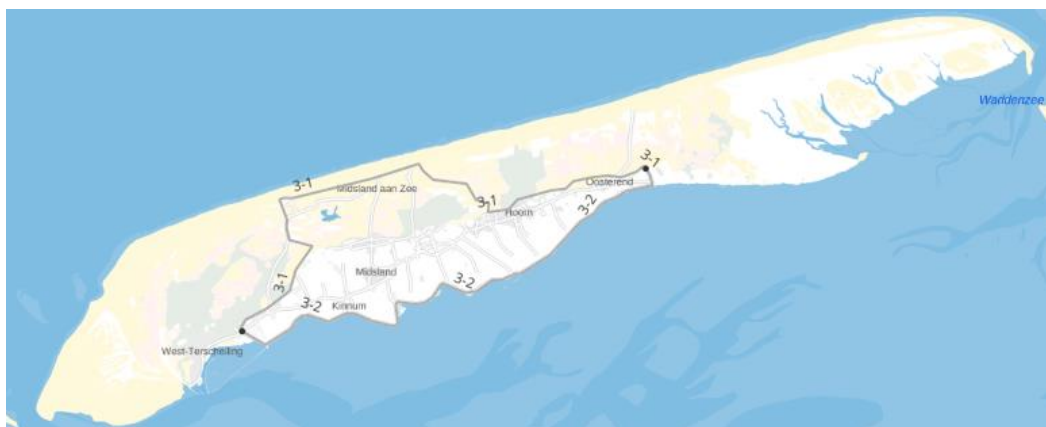
Terschelling maakt deel uit van het dijktraject 3, wat aan noordzijde wordt begrensd door de Noordzee (dijktraject 3-1) en aan de zuidzijde door de Waddenzee (dijktraject 3-2) (Figuur 4.2). De signaleringswaarde voor een dijktraject is, samen met de ondergrens, als norm in de wet opgenomen en betreft een overstromingskans. De signaleringswaarde voor de dijktrajecten van Terschelling zijn aangegeven in Figuur 4.4. De positie van dijktraject 3-1 weergegeven in Figuur 4.4 is nog een concept en dus niet correct, in Figuur 4.2 is de juiste positie van het dijktraject weergegeven.



Figuur 4.4 - Dijktrajecten Terschelling met de daaraan gekoppelde signaleringswaarde. Bron: <https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/assessment>,

De Eerste beoordeling primaire waterkeringen overstromingskans (eerste beoordelingsronde) is gestart op 1 januari 2017. Het doel van de eerste beoordelingsronde is het beoordelen van alle primaire waterkeringen. De beoordeling geeft inzicht in de actuele faalkans van de waterkeringen en hoe deze is gerelateerd aan de normering. Het veiligheidsoordeel van het normtraject is uit te drukken in vijf categorieën (Figuur 4.5). Deze zijn gerelateerd aan de afstand van de berekende overstromingskans tot de wettelijke norm.

Voor de normtrajecten van Terschelling is er op dit moment (juli 2020) nog geen beoordeling uitgevoerd. De zandige waterkering (3-1) heeft nog geen officiële beoordeling, maar het nieuwe ontwerp is zodanig vastgesteld dat deze toekomstbestendig is (Ministerie van Infrastructuur en Milieu 2017).



- A+. Dijktraject voldoet ruim aan de signaleringswaarde.
- A. Dijktraject voldoet aan de signaleringswaarde.
- B. Dijktraject voldoet aan de ondergrens, maar niet aan de signaleringswaarde.
- C. Dijktraject voldoet niet aan de signaleringswaarde en ook niet aan de ondergrens.
- D. Dijktraject voldoet ruim niet aan de signaleringswaarde en aan de ondergrens.
- **Beoordeling niet vrijgegeven.** Dijktraject waarvoor het veiligheidsoordeel nog niet vrijgegeven is door keringbeheerder.
- **Geen.** Dijktraject zonder veiligheidsoordeel.

Figuur 4.5 - Het veiligheidsoordeel van de kering op trajectniveau voor Terschelling. Bron:

<https://waterveiligheidsportaal.nl/#/nss/nss/assessment> , bezocht op 31 juli 2020

4.3 Strandrecreatie

Op Terschelling vinden tal van recreatieve activiteiten plaats in de duinen, de bossen en op het strand. De stranden van het eiland worden intensief gebruikt door eilanders en toeristen, wandelaars en om diverse sporten te beoefenen. Terschelling kent een aantal stranden en verschillende locaties op de Noordzeestranden van Terschelling hebben economische activiteit:

- West aan zee (strandtent en camping)
- Midsland aan zee (strandtent en camping)
- Formerum (strandtent)
- Oosterend (strandtent)
- Hoorn heeft een paviljoen direct achter het duin
- Het Groene strand (buiten de BKL) heeft een paviljoen aan (niet op) het strand, dat ook bij het Oerol-festival wordt gebruikt. Het strand zelf is een relatief rustig strand.

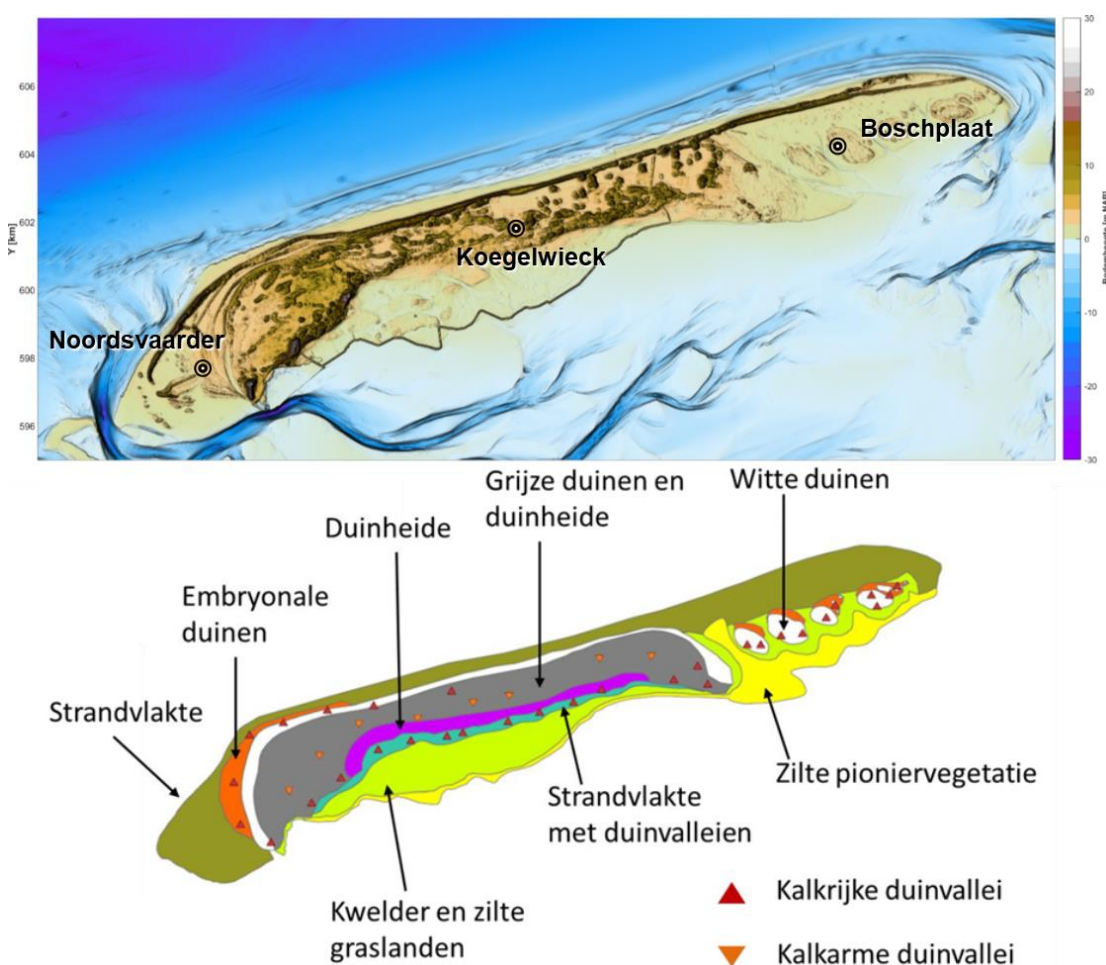


Figuur 4.6 – Locaties van stranden met economische activiteit op Terschelling.

4.4 Natuur

Terschelling heeft veel natuurgebieden zoals strand, duinen, kwelders en bossen. De Boschplaat, de Noordsvaarder en de Koegelwiek (allen aangegeven in Figuur 4.7) zijn bekende natuurgebieden in Terschelling en betreffen ongeveer 11.000 hectare, grotendeels in beheer door Staatsbosbeheer. Op Terschelling zijn drie Natura-2000 gebieden aan de orde: Noordzeekustzone, Waddenzee en Duinen Terschelling. In de Natura-2000 beheerplannen wordt een uitgebreide beschrijving van deze gebieden gegeven, inclusief te verwachten toekomstige ontwikkelingen³. Onderstaande beschrijving is, tenzij anders aangegeven, afkomstig uit het Natura-2000 beheerplan (Meijer et al., 2016).

Terschelling bestaat uit verschillende habitattypen, zoals schematisch weergegeven in Figuur 4.7. De aanvoer van zand zorgt voor het ontstaan van embryonale duinen, met daarachter witte en grijze duinen. Het relatief kalkrijke zand van de Noordsvaarder zorgt voor kalkrijke duinvalleien. Kustvegetatie staat onder invloed van de natuurlijke dynamiek van de kust, zoals erosie en het instuiven van zand. Beheermaatregelen zoals plaggen en het aanbrengen van kerven in de zeereep kunnen de natuurlijke dynamiek versterken en een deel van de vegetatie herstellen, zie ook paragraaf 6.5.

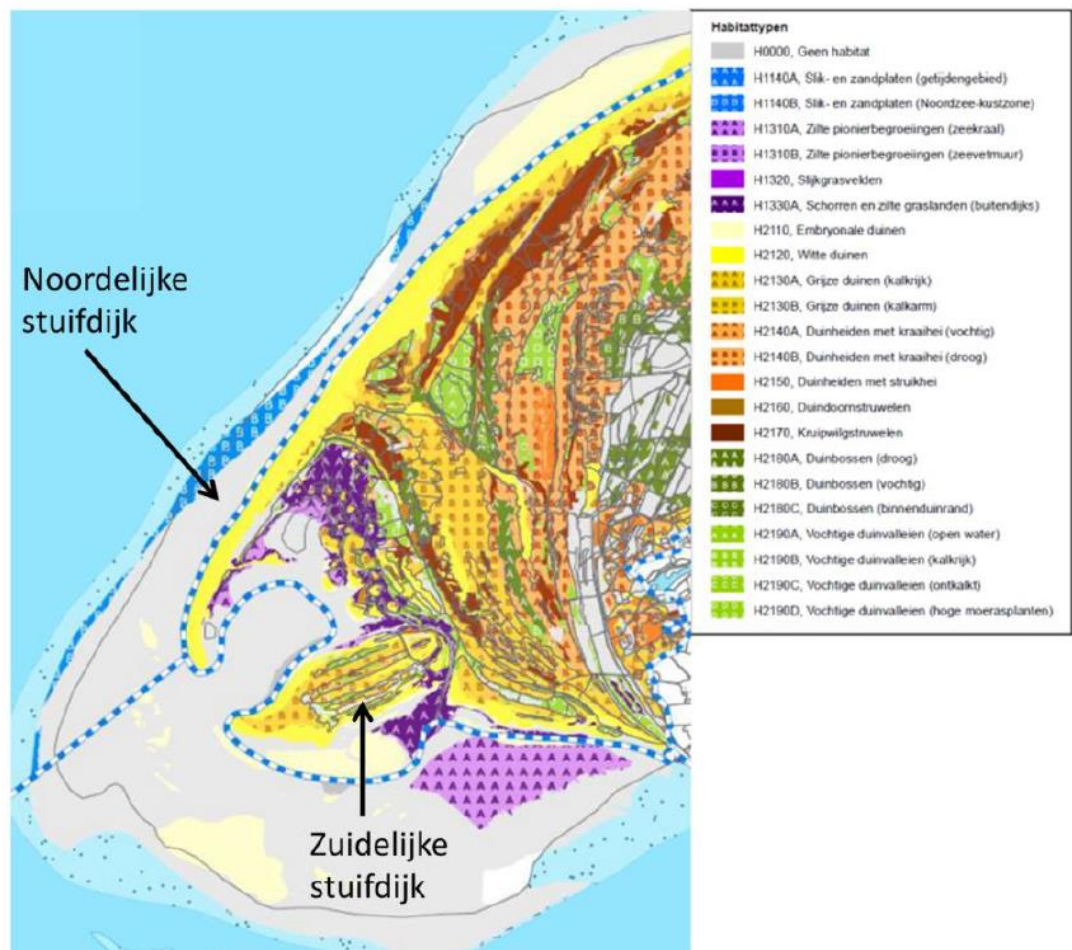


Figuur 4.7 – De bekende natuurgebieden van Terschelling (boven). Natuurlijke positie van habitattypen op Terschelling, die aangeeft waar habitattypen de komende 50-100 jaar van nature optimaal (kunnen) voorkomen (onder). Bron: Ijf et al. (2019a) en Meijer et al. (2016)

³ De Natura-2000 beheerplannen relevant voor Terschelling kunnen worden gevonden op de website van Wetterskip Fryslân: https://www.fryslan.frl/beleidsthemas/natura-2000_3544/

De eilandkop (Noordsvaarder) herbergt vrijwel alle habitattypen die langs een natuurlijke gradiënt van buiten naar binnen als volgt terug te vinden. Op zeer kleine afstand zijn allerlei overgangen aan te treffen, in samenhang met hoogteverschillen van slechts enkele centimeters. Vooral in de randzone van de Noordsvaarder komt het habitatype Vochtige Duinvalleien (H2190) voor met begroeiingen van het Caricion davallianae (Galigaanmoerassen), waarbij zowel het Parnassio-Juncetum atricapilli als het Junco baltici-Schoenetum nigricantis goed zijn vertegenwoordigd (Alterra, n.d.). Hier vinden we grote aantallen Groenknolorchis, Parnassia (Parnassia palustris) en - iets meer landinwaarts - Vleeskleurige orchis (Dactylorhiza incarnata). Noordoost van de Noordsvaarder bevinden zich de Kroonpolders. De ooit soortenrijke vochtige duinvalleien (H2190B) in het ingedijkte gebied zijn nu begroeid met struwelen van kruipwilg (H2170), duindoorn en vochtige heide (H2140A). In Ijf et al. (2019a) kan ook een korte analyse van de natuur en voorkomende habitattypen in de Noordsvaarder gevonden worden.

De centrale eilandkust bestaat uit oude en ontcalcite duinen die kunnen worden gezien als een zeer groot, secundair verstoven duinboogcomplex. In het duingebied zijn natte duinvalleien, die met slenken en sloten met elkaar in verbinding staan. Ter hoogte van de reddingsbrigade (paal 8) liggen doorstroomvalleien die permanent water bevatten. Ten oosten hiervan liggen hogere (en dus drogere) valleien (Figuur 4.9).



Figuur 4.8 - Overzicht habitattypen op de eilandkop (Meijer, et al., 2016)

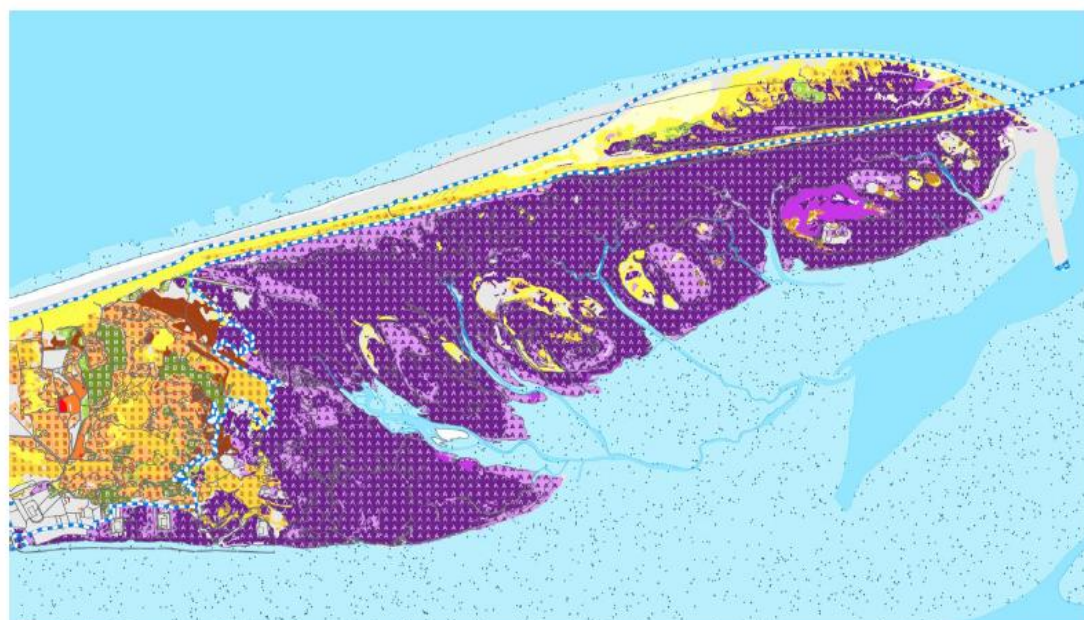


Figuur 4.9 - duinen tussen paal 16 en 20 in oostelijke richting (Meijer, et al., 2016)

De Boschplaat ten zuiden van de stuifdijk wordt momenteel gekenmerkt door overgangen van habitattype Schorren en zilte graslanden H1330A (hoge kwelder) naar habitattype Zilte pionierbegroeiingen H1310 (lage kwelder) vanaf de stuifdijk in zuidelijke richting en van oudere naar jongere kweldersystemen van west naar oost (Figuur 4.10). Aan de zuidkant hiervan liggen grote oppervlakten met onbegroeide slikplaten van habitattype H1140A, die tijdens laag tij een zeer belangrijke foerageerfunctie vervullen voor zeer grote aantallen van vele vogelsoorten. De stuifdijk blijft (tot aan het afgeslagen uiteinde) een strakke, gestabiliseerde zeereep, met op de hellingen aan de buitenzijde én de binnenzijde nog vitale helmbegroeiingen die tot de Witte duinen H2120 gerekend kunnen worden. Op de brede kruin van de stuifdijk heeft de begroeiing het karakter van een zeer soortenarme representant van de kalkhoudende Grijs duinen H2130A.

De Boschplaat kampt met drie problemen: de erosie, stijging van de zeespiegel en teruglopende variatie aan planten en dieren. In opdracht van de Provincie Fryslân heeft Staatsbosbeheer daarom een visie opgesteld voor de toekomst van de Boschplaat⁴. Deze visie heeft invloed op het huidige Natura 2000-beleid van de provincie Fryslân en het kustlijnbeheer van Rijkswaterstaat. In de nieuwe visie voor de Boschplaat wordt aanbevolen om het huidige Natura 2000-beleid aan te passen aan de natuurlijke gebiedskenmerken van de Boschplaat, waarin dynamiek de sturende factor is en niet een strikt areaalbehoud van habitatten op de huidige plaatsen.

⁴ <https://www.boswachtersblog.nl/terschelling/2017/07/26/tijdlijn-boschplaat-visie-online/>



Habitattypen

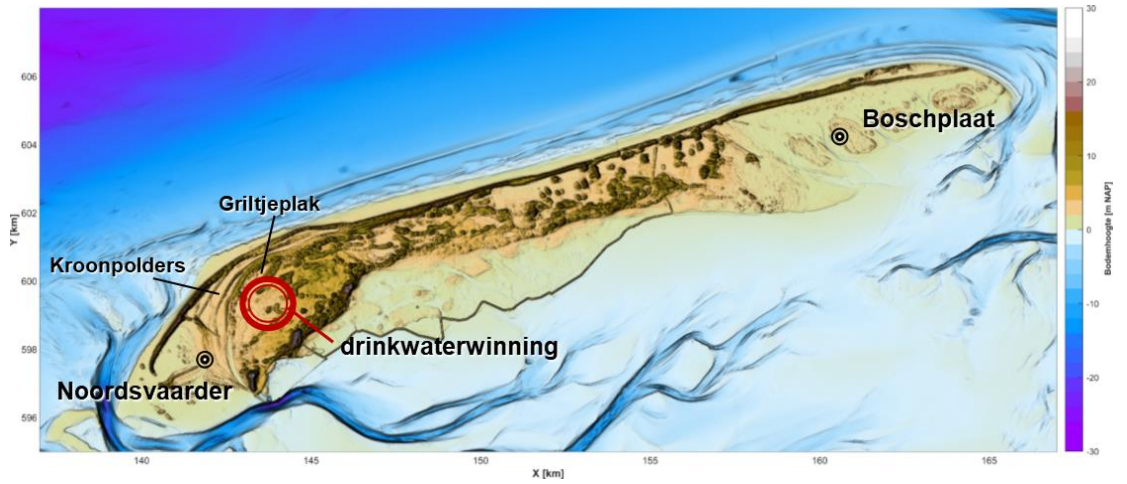
■ H0000, Geen habitat	■ H2150, Duinheiden met struikhei
■ H1140A, Slik- en zandplaten (getijdengebied)	■ H2160, Duindoornstruwelen
■ H1140B, Slik- en zandplaten (Noordzee-kustzone)	■ H2170, Kruidwilgstruwelen
■ H1310A, Zilte pionierbegroeiingen (zeekraal)	■ H2180A, Duinbossen (droog)
■ H1310B, Zilte pionierbegroeiingen (zeevetmuur)	■ H2180B, Duinbossen (vochtig)
■ H1320, Slijkgrasvelden	■ H2180C, Duinbossen (binnenduinrand)
■ H1330A, Schorren en zilte graslanden (buitendijks)	■ H2190A, Vochtige duinvalleien (open water)
■ H2110, Embryonale duinen	■ H2190B, Vochtige duinvalleien (kalkrijk)
■ H2120, Witte duinen	■ H2190C, Vochtige duinvalleien (ontkalkt)
■ H2130A, Grijszandduinen (kalkrijk)	■ H2190D, Vochtige duinvalleien (hoge moerasplanten)
■ H2130B, Grijszandduinen (kalkarm)	■ H6230, Heischrale graslanden
■ H2140A, Duinheiden met kraaihei (vochtig)	■ H6410, Blauwgraslanden
■ H2140B, Duinheiden met kraaihei (droog)	

Figuur 4.10 - Habitattypen bij de eilandstaart en omgeving (Meijer, et al., 2016)

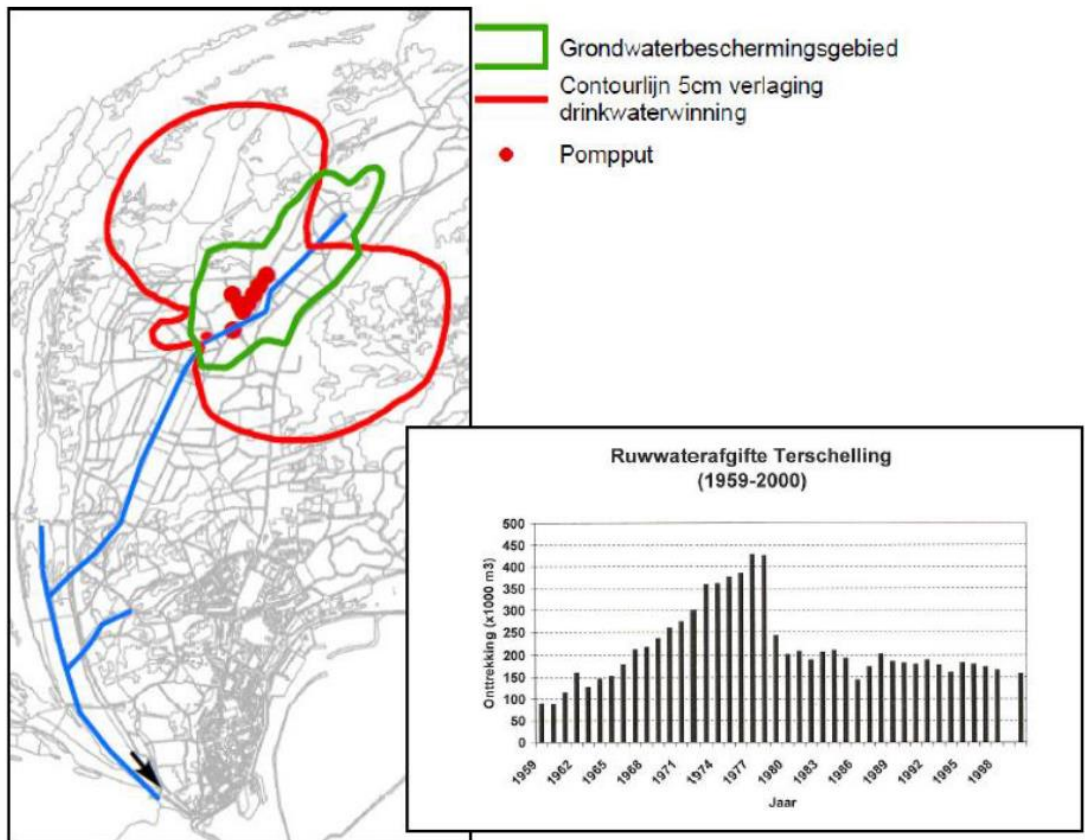
4.5 Drinkwaterwinning

Terschelling heeft naast de aanvoer van drinkwater vanuit de vaste wal ook haar eigen drinkwatervoorziening. In de bossen ten noorden van West Terschelling liggen de puttenvelden, waar grondwater opgepompt wordt voor drinkwatervoorziening (Figuur 4.11 en Figuur 4.12). De grondwaterwinning is gestart in 1958 en is geleidelijk toegenomen tot een hoeveelheid van ruim 400.000 m³/jaar in 1977-1978 (Meijer et al., 2016). Nadat men in 1979 een aansluiting op het waterleidingnet van de vaste wal heeft gemaakt, is de hoeveelheid gewonnen grondwater teruggevallen. Voor de gehele winning geldt een parapluvergunning van maximaal 190.000 m³/jaar. De daadwerkelijke winning is de afgelopen jaren nagenoeg gelijk aan de vergunningscapaciteit.

Het invloedsgebied van de drinkwaterwinning heeft een oppervlakte van circa 5,2 km². Binnen het invloedsgebied van de drinkwaterwinning ligt het Griltjeplak en de zuidoostelijke Kroonpolder (Figuur 4.11).



Figuur 4.11 – Locatie van de puttenvelden t.b.v. drinkwatervoorziening.



Figuur 4.12 - Ligging van de drinkwaterwinning op Terschelling, het beïnvloedingsgebied (rode lijn) en een grafiek van de gewonnen hoeveelheid water. (Uit: Den Held, 2012)

5 Lange termijn ontwikkelingen

5.1 Inleiding

De beschikbare kennis met betrekking tot lange termijn ontwikkelingen van de bodem van Terschelling kan relevante informatie bevatten die van invloed zijn op het huidige en toekomstige beheer van de kust. De paleografische ontwikkeling (paragraaf 5.2) maakt inzichtelijk hoe het Terschellingse landschap er gedurende de afgelopen duizenden jaren heeft uitgezien en de vorm heeft gekregen zoals we het nu kennen. Ook de bodembeweging (of daling) langs de kust wordt bepaald met het oog op het vaststellen van de bijdrage van bodembewegingen aan relatieve zeespiegelstijging in Nederland (paragraaf 5.3) en geeft inzicht in hoeveel sedimentbehoefte er potentieel is als gevolg van bodembewegingen.

5.2 Paleografische ontwikkeling

Tijdens het Saalien, de voorlaatste ijstijd, kreeg het ondergrondse reliëf van de Waddenzee zijn vorm, onder grote druk van zware gletsjers uit het noorden tot noordoosten. In het daaropvolgende interglaciaal van het Eemien kwam de zeespiegel weer omhoog en werd het gebied grotendeels overstroomd. In het Weichselien, de laatste ijstijd, waren het Waddengebied en de Noordzee een stuivende zandvlakte. In het Holoceen, dat 12.000 jaar geleden begon, kreeg het Waddenzegebied verder vorm. Tussen 5.000 en 6.000 jaar geleden, toen de zeespiegelstijging in snelheid afnam, ontstond een rij Waddeneilanden zo'n 7 tot enkele km noordelijker van de huidige. Waar in het westen het eerste Waddeneiland lag is niet geheel duidelijk, maar dit begon vermoedelijk al bij Terschelling of Vlieland en mogelijk al bij Texel (Vos et al., 2011). Daarachter lagen wadden, lagunes en geulen overgaande in de kwelders van het vasteland en de hoger gelegen zandige heuvelruggen. Dit geheel van landschappen verplaatste door kusterosie en onder invloed van zeespiegelstijging voornamelijk in landwaartse richting. Lokaal trad op het vasteland ook kustuitbouw op. In tegenstelling tot tegenwoordig werd het vasteland diep doorsneden door inhammen en estuariene riviervalleien. De luwte en estuariene circulatie bevorderde in deze inhammen slibsedimentatie waardoor deze openingen opvulden. Met name op die locaties en op een aantal andere plaatsen in Friesland en Groningen bouwde de vastelandskust zich uit.

Voor het gebied waar nu Terschelling ligt is in ieder geval het volgende duidelijk. Een zogeheten "mysterieus lichaam", van misschien 5000 jaar oud, gevonden op het strand van Terschelling, en een bronzen hielbijl van 3200 jaar voor Chr., gevonden in het Zeegat van het Vlie, geven aan dat er in die tijd land lag waar Terschelling en het zeegat nu liggen. De barrière-eilanden kunnen nog een flink eind zeewaarts hebben gelegen. De Vlake van Ameland is een rest van een 5000 jaar oude buitendelta die ca. 7 km meer zeewaarts ligt dan de huidige buitendelta tussen Ameland en Terschelling (Sha, 1990). Ook aan de westkant, op de positie van het huidige Vlie, wordt verondersteld dat daar 3850 v Christus zich een zeegat bevond, wat nog geen contact had met het gebied van de latere Zuiderzee (Vos et al., 2011). Op het vasteland was de Boornevallei aanwezig die tussen 6400 en 5300 BP veranderde in een estuarium waarvan de afzettingen terug zijn gevonden westelijk van Jorwerd (van der Spek, 1994).

Het is zeker dat het Vlie en de Eems als estuaria al in de Noordzee uitstroomden in de Romeinse tijd. Het ontstaan van het Vlie viel samen met het dichtslibben van het Oer-IJ (Vos et al., 2011). Oostelijk van het Vlie lagen Waddeneilanden (Sha, 1990; Oost, 1995). Het Vlie estuarium was vermoedelijk tot in de Hoge Middeleeuwen verbonden via een rivier met het achterliggende Aelmeer ongeveer lopende vanaf Stavoren tot Harlingen of zelfs tot Griend. In de periode erna erodeerde de uitstekende kaap rond het Marsdiep (zeker al van 9e eeuw aanwezig) waardoor het Marsdiep steeds verder landinwaarts kon doordringen door erosie in een deels veenrijk gebied. Zo

kon het rond de 12e eeuw waarschijnlijk het verbindende riviertje van het Vlie doorsnijden waardoor er een open getij ontstond richting het Flevomeer dat vervolgens in de Zuiderzee veranderde (Oost, ongepubliceerd). De exacte invloed op het Vlie (en daarmee op Terschelling) laat zich moeilijk inschatten, omdat getijdeareaal-groei en -verlies beiden een rol speelden, maar vermoedelijk nam het Vlie in eerste instantie in getijprisma en in dimensies toe.

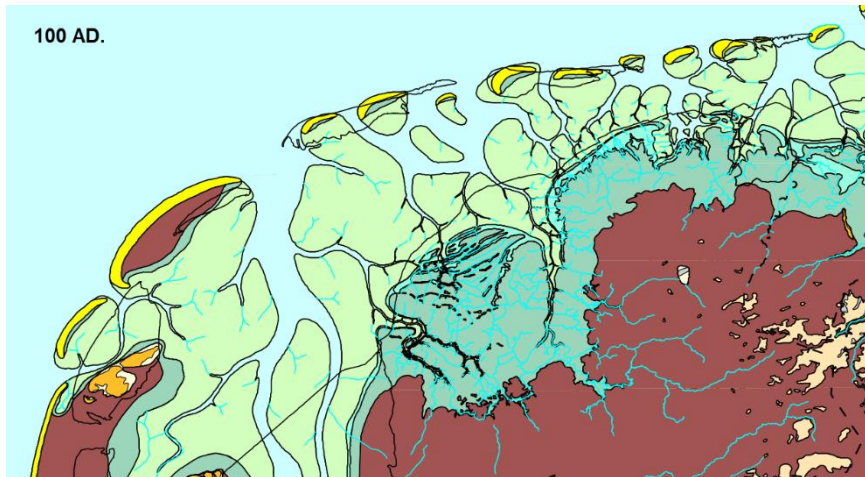
Vergelijkbaar met het Vlie en de Eems zullen ook kleinere rivieren zich een weg naar zee hebben gezocht, zoals Boorne en Lauwers. Daartussenin zullen de zeegaten veelal dood hebben gelopen in het kombergingsgebied. Namen eindigend op “balg” (Scholbalg, Eilandervalg) wijzen daarop. Mogelijk lag een kleinere inham die een open verbinding met zee had tussen West en Midden Terschelling en Oost Terschelling, al dan niet verbonden met een riviertje dat ongeveer bij het land uitkwam ter hoogte van Sexbierum (Figuur 5.1). Door de afnemende zeespiegelstijging in combinatie met opslibbing werd het oude estuarium van de Boorne grotendeels opgevuld en verlegde de rivier zijn koers naar een oostelijkere loop. Deze stroom had vermoedelijk contact met open zee via een doorgang iets oostelijk van het huidige Oosterend op Terschelling. Niet voor niets is de oude naam van het Amelander Zeegat, dat oorspronkelijk veel westelijker lag: “De Borne” in middeleeuwse vaaraanwijzingen (Das Seebuch).

Een deel van de duinen op West Terschelling is gedateerd op 410 tot 640 A.D., wat aangeeft dat in die tijd de kust van dit eiland dicht in de buurt lag van de huidige. Rond 850 AD, de tijd van de Noormannen, brandde het houten kerkje (wijzend op continue bewoning) bij Striep op Terschelling af en werd pas in de 10e eeuw opnieuw gebouwd. Het eiland bestond waarschijnlijk uit twee duinbogen welke van elkaar gescheiden werden door een brede washover-geul ongeveer tussen Formerum en Lies en richting Midsland aan Zee (Figuur 5.4). Deze situatie zal nog een tijdlang hebben bestaan gedurende de hoge Middeleeuwen, getuige de dialectverschillen tussen het ‘Westers’ en ‘Meslanzers’ welke gescheiden werden door ‘t Jit (= de opening) met het ‘Aasters’. In de luwte van de duinbogen leefden de boeren op zandkopjes in het kwelderlandschap. De kwelders werden pas vrij laat bedijkt (Schoorl, 1999; Kok, 2006). Later, maar in ieder geval voor de 16e eeuw, moeten de washovers verstoep zijn geraakt door nieuwe duinvorming (Vos et al., 2011; Figuur 5.2) wat toe te schrijven is aan de grote zandplaten die vanuit de buitendelta van het Zeegat van het Vlie van tijd aanlandden op West Terschelling (laatste is de Noordsvaarder).

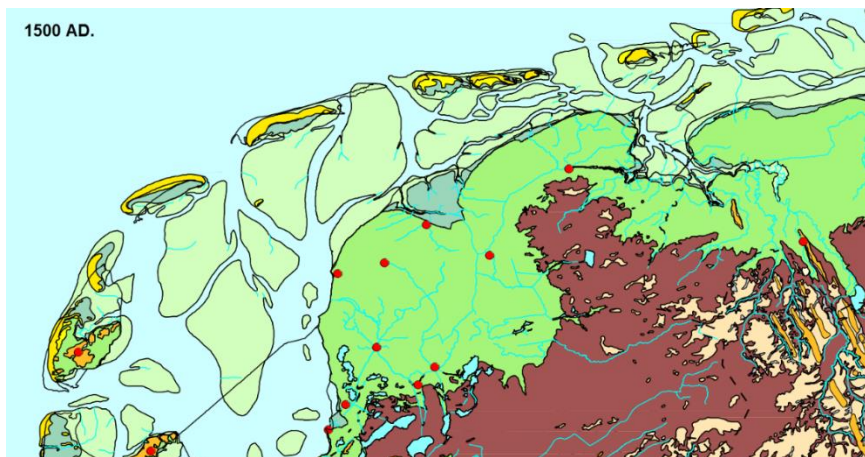
De doorgaande zeespiegelstijging zorgde vanaf de post-Romeinse periode voor een hernieuwd uitschuren van het nu meer naar het oosten liggende Boorne. Deze bereikte haar maximale dimensies aan het eind van de 9e begin van de 10e eeuw. Daarna slibde over de periode 1000-1700 AD deze inham dicht, waarbij het getijdeprisma van het gehele zeegat afnam van 992 miljoen m³ naar 496 miljoen m³ (van der Spek, 1994). Het zeegat van de Middellzee, het Borndiep (in de late middeleeuwen ook wel de Borne genoemd), mondde uit oostelijk van Oosterend op Terschelling. Oorspronkelijk bestond het zeegat tussen de eilanden uit twee aparte stromen, waarvan de meeste westelijke het Koggediep ging heten en de meest oostelijke het Born-diep (van der Spek, 1994 & Oost, 1995). In de periode 1550-1700 werd het Koggediep geleidelijk minder belangrijk (waarschijnlijk door de afname van het getijdeprisma van de Middellzee) en uiteindelijk verheelde in de 18e eeuw het ‘Camper Sandt’ zich met het eiland (Oost, 1995). Het overgebleven Borndiep verplaatste zich oostwaarts over de periode 1850-1950 (Oost, 1995). Hoogstwaarschijnlijk verliep de aangroei van oost-Terschelling, de vorming van de Boschplaat, over 10,5 km geleidelijk in de periode 1550-1800 (Figuur 5.3; van der Spek, 1994; Oost, 1995; Schoorl, 2000). De huidige westpunt van Terschelling ‘de Noordsvaarder’ groeide pas tussen 1850 en 1865 door verzanding, voorafgegaan door forse duinafslag en klifvorming, aan het eiland vast. Aan de forse duinen noordelijk van West-Terschelling valt af te leiden dat de zandaanvoer op deze westkop van het eiland ook in het verleden fors moet zijn geweest⁵. Dit duidt

⁵ Duinen grenzend aan de Waddenzee zoals de Dellewal en de steile duinfronten van het binnenduin verraden de strijd met het instuivende duinzand.

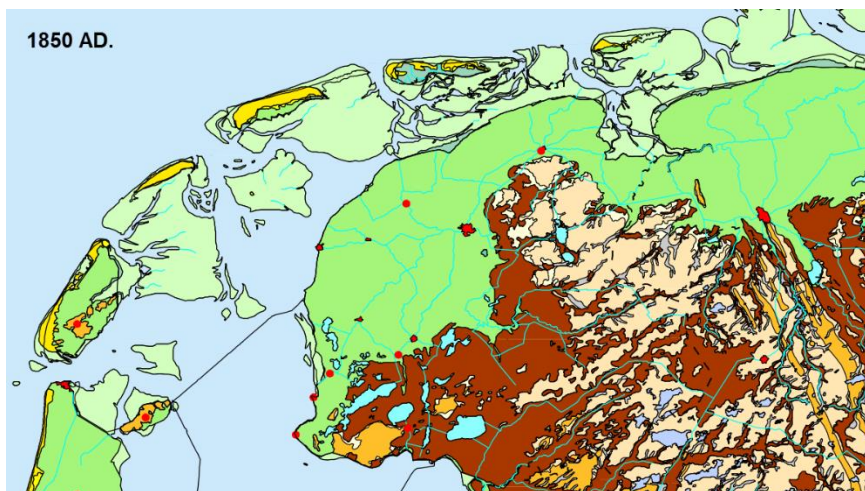
hoogstwaarschijnlijk op de eerdere aanlanding van grote platen uit het Zeegat van het Vlie, zoals ook te verwachten is op grond van de grootte van het zeegat.



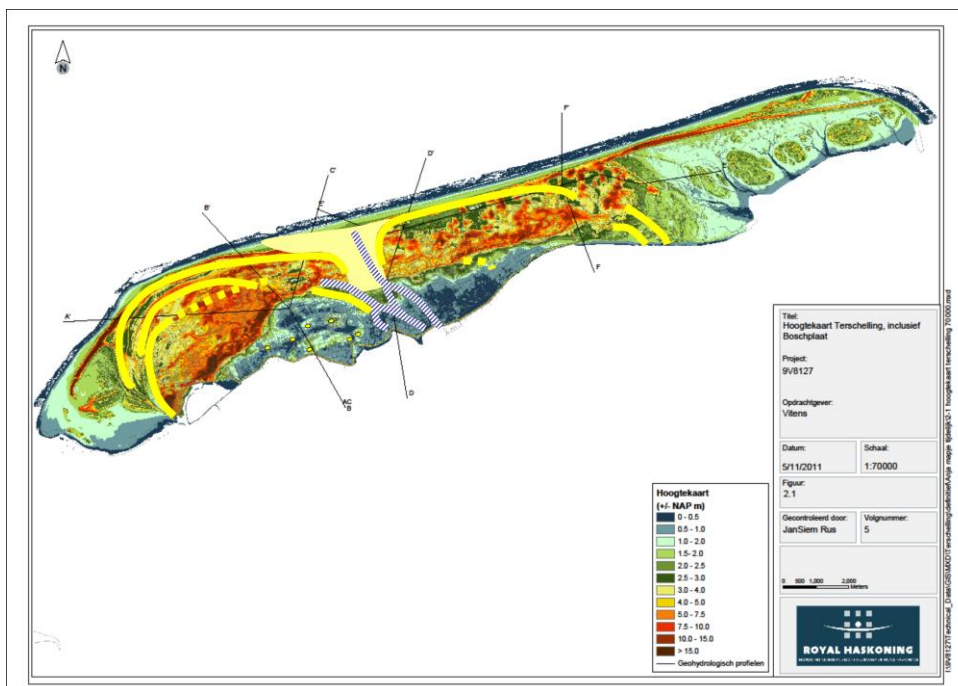
Figuur 5.1 - Paleogeografische kaart van het Waddengebied, omstreeks 100 na Christus (Vos en De Vries, 2013)



Figuur 5.2 - Paleogeografische kaart van het Waddengebied, omstreeks 1500 na Christus (Vos en De Vries, 2013)



Figuur 5.3 - Paleogeografische kaart van het Waddengebied, omstreeks 1850 na Christus (Vos en De Vries, 2013)



Figuur 5.4 - Reconstructie Terschelling rond ca. 1000 AD geprojecteerd op de huidige hoogtekaart: geel = aanwezige duinen, gele ovalen zijn bewoonde toppen; blauw = kreken en overwash-geulen (Oost, ongepubl.).

Doorvertaling lange termijn ontwikkelingen naar kustbeheer

Op grond van de archeologische vondsten en de ligging van de 5000 jaar oude buitendelta van de voorloper van het Zeegat van Ameland, mag verwacht worden dat ter hoogte van Terschelling één of meerdere eilanden aanwezig waren in prehistorische tijd die verder zeewaarts lagen. Geschat kan worden dat, grootschalig, de eilandenboog zich hier ca. 7000 m heeft teruggetrokken in 5000 jaar: dus gemiddeld 1,4 m per jaar tijdens een zeespiegelstijging van ca. 5 m (gemiddeld 1 mm/jaar). Dit zijn snelheden van kustachteruitgang die ook uit de afgelopen twee eeuwen naar voren komen. Verwacht mag worden dat ook in de nabije toekomst de achteruitgang van die orde grootte zal zijn, tenzij de zeespiegelstijging en de zandbehoefte van het achterliggende Waddengebied sterk toenemen.

Rekening moet worden gehouden dat de ontwikkelingen in de laatste 1000 jaar dit grootschalig gedrag beïnvloeden. De buitendelta van het Zeegat van het Vlie is vermoedelijk al vanaf de Hoge Middeleeuwen (ca. 1000 tot ca. 1250) aanzienlijk geweest in dimensies en zal vermoedelijk een grote hoeveelheid zand hebben geleverd. Dit gebeurde al dan niet in de vorm van grote aanlandende platen, waaruit het zeer brede duinareaal van Terschelling kon ontstaan. Deze toevoer van zand had ook tot gevolg dat Terschelling over een aanzienlijke lengte een min of meer gesloten front vormt qua duinmassieven.

Over de laatste eeuw is er ook een afname van het zandvolume van de buitendelta van het Vlie waargenomen (Elias et al., 2012), zie paragraaf 6.2.2. Dit zandvolume zorgt voor sedimentatie in het bekken en zal ook zand aanvoeren richting de kust van Terschelling. Bekend is dat de zandaanvoer vanaf een zeegat in oostwaartse richting langs een eiland geleidelijk minder invloed heeft op de grootschalige kustontwikkeling. Dit zou kunnen verklaren waarom ter hoogte van ca. km 15 er sprake was van een retirende kust. Aan de uiterste oostkant is de sterke groei van de Boschplaat gestopt en overgegaan in erosie. Hoewel dit een op de grootschalige ontwikkeling een kortlopend proces zal zijn moet rekening gehouden worden met een voortgaande erosie over in totaal meerdere decennia.

5.3 Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens

In Nederland worden hoogtes gerelateerd aan het Normaal Amsterdams Peil (NAP). Er bestaan duizenden NAP-merken in Nederland waarvan de hoogte bekend is. Zes daarvan, allemaal gelegen in Midden-Nederland, worden als stabiel verondersteld en de beweging van de andere merken wordt feitelijk ten opzichte van deze zes punten berekend. Deze berekening is voor het laatst uitgevoerd in 2004 na de 5^e nauwkeurigheidswaterpassing (1996-1999). Ook de jaarlijks gemiddelde zeespiegelstand langs de Nederlandse kust wordt in NAP uitgedrukt; in 2019 stond de zee gemiddeld op ongeveer 0,10 m NAP (Baart et al., 2018).

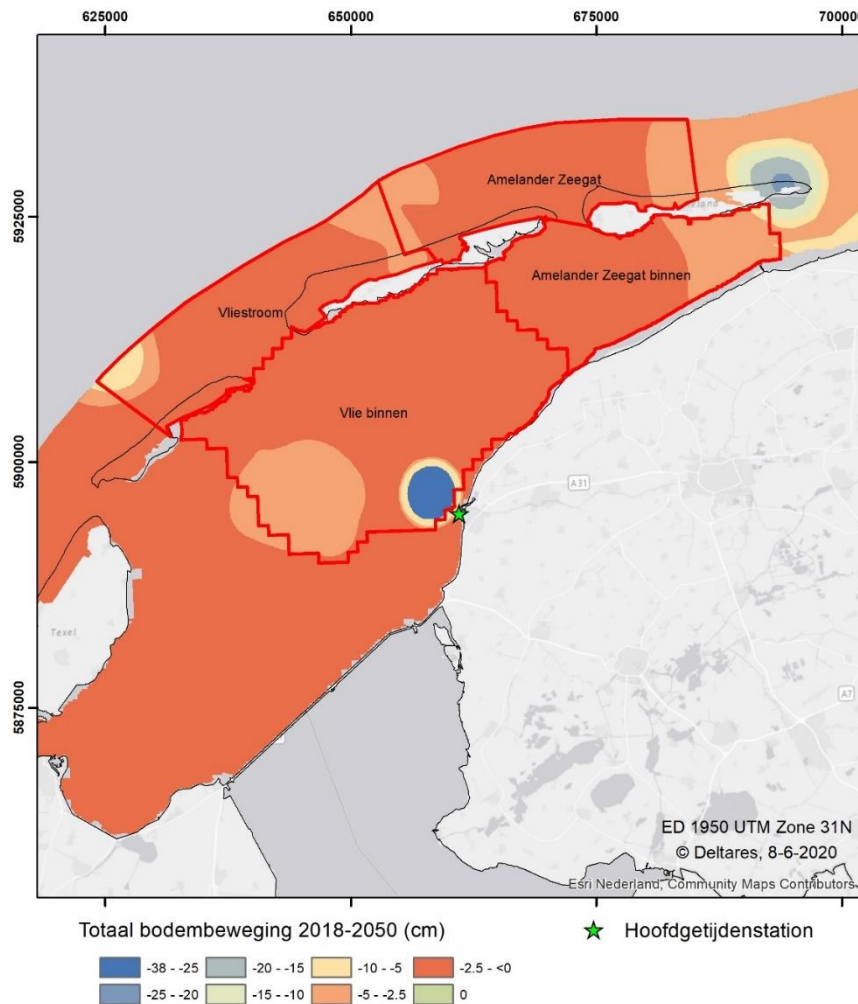
De gegevens laten zien dat Nederland in beweging is, waarbij sommige delen omhoog komen en andere juist dalen. De laatste jaren zijn in verschillende rapporten overzichtskaarten voor bodemweging langs de Nederlandse kust gepresenteerd (Hijma & Kooi, 2018a; 2018b; Hijma & Van Onselen, 2019). De kaarten 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 als gevolg van bodembewegingen. De kaarten maken onderscheid in geologische bodembeweging en antropogene bodemdaling (Tabel 5.1), uitgesplitst naar de laatste 100, laatste 30 en komende 30 jaar⁶. Voor Terschelling zijn geologische bodembeweging en bodemdaling door gaswinning van belang. De kaarten zijn vooral gebaseerd op modelberekeningen en kennen daardoor een relatief grote mate van onzekerheid, al worden de resultaten wel vergeleken met gemeten bodembewegingen. Er wordt momenteel gewerkt aan de verbetering van de monitoring van bodembeweging langs de Nederlandse kust om de bestaande onzekerheden te verkleinen (zie bijlage in Hijma & Van Onselen, 2019).

Tabel 5.1 - Componenten van de belangrijkste componenten van bodembeweging in Nederland.

Hoofdoorzaak	Oorzaak	Beschrijving
Geologische bodembeweging	Tektoniek	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	Daling die samenhangt met het terugbuigen van de aardplaat in Noord-West 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.
	Elastische respons	Opheffing als gevolg een elastische reactie van de aardkorst op de recente ijs afsmelting op Groenland. Door deze massa verdwijnt gewicht op Groenland en de vrijwel instantane aanpassing van de aardkorst hierop zorgt voor opheffing in Nederland. Deze component wordt pas sinds kort meegenomen in de bodemdalingsmonitor en is nog niet verwerkt in de kaarten en tabellen in Hijma & Van Onselen, 2019.
Antropogene bodemdaling	Olie-/gaswinning	Daling aan het maaiveld die wordt veroorzaakt door de drukverlaging in olie- of gasvelden en die zorgt voor samendrukking van de betreffende lagen.
	Zoutwinning	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 inzinking van bovenliggende lagen.
	Grondwaterwinning	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	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	Daling onder invloed van extra gewicht dat op het maaiveld (of waterbodem) wordt aangebracht door de mens en waardoor lagen in de ondergrond worden samengedrukt.

⁶ De kaarten worden gemaakt binnen het Bodemdalingsmonitor-programma van KPP B&O Kust en zullen om de zoveel jaar geactualiseerd worden. Actualisaties zullen nodig zijn als bijvoorbeeld modellen voor het berekenen van geologische bodembeweging of winningsplannen veranderen.

De kaart in Figuur 5.5 is afgeleid van de landelijke kaarten voor bodembeweging langs de Nederlandse kust, maar hierbij is ingezoomd op de omgeving van Terschelling. Tabel 5.2 geeft de bodembewegingsgetallen en volumes voor de deelgebieden voor kustonderhoud die relevant zijn voor Terschelling. De kaart laat zien dat de omgeving van Terschelling vrij gelijkmatig aan het dalen is en de tabel geeft aan dat dit met snelheden van ongeveer 6 cm per eeuw gebeurt. Het grootste deel van deze daling is geologisch van oorsprong en daardoor vrij constant. De figuur laat ook zien dat er meerdere cirkelvormige gebieden met verhoogde bodemdaling zijn. Op de Noordzee zijn dit van west naar oost de wingebieden Vlieland, Terschelling en Ameland en in de Waddenzee van west naar oost de wingebieden Zuidwal, Ballastplaat en Ameland. Bij de Ballastplaat gaat het om zoutwinning, bij de overige gebieden voornamelijk om gas. De invloed van de gaswinning bij Terschelling reikt tot het eiland zelf, maar bedraagt hooguit enkele centimeters. De sterk verhoogde bodemdalingsvolumes voor *Vlie binnen* voor de komende 30 jaar worden niet zozeer veroorzaakt door de gaswinning bij Zuidwal, maar vooral door de zoutwinning bij de Ballastplaat. Modelberekeningen laten zien dat in het centrum van de winning er meer dan 1 m bodemdaling zal gaan optreden. Op de Waddenzeebodem zal hier overigens naar verwachting niks tot zeer weinig van te zien zijn, aangezien de bodemdaling direct gecompenseerd wordt door versnelde sedimentatie. Maar aangezien het hier om een volume van meer dan 10 miljoen m³ gaat in de komende decennia, heeft dit uiteraard wel invloed op de sedimenthuishouding van de Waddenzee en de omliggende Noordzee.



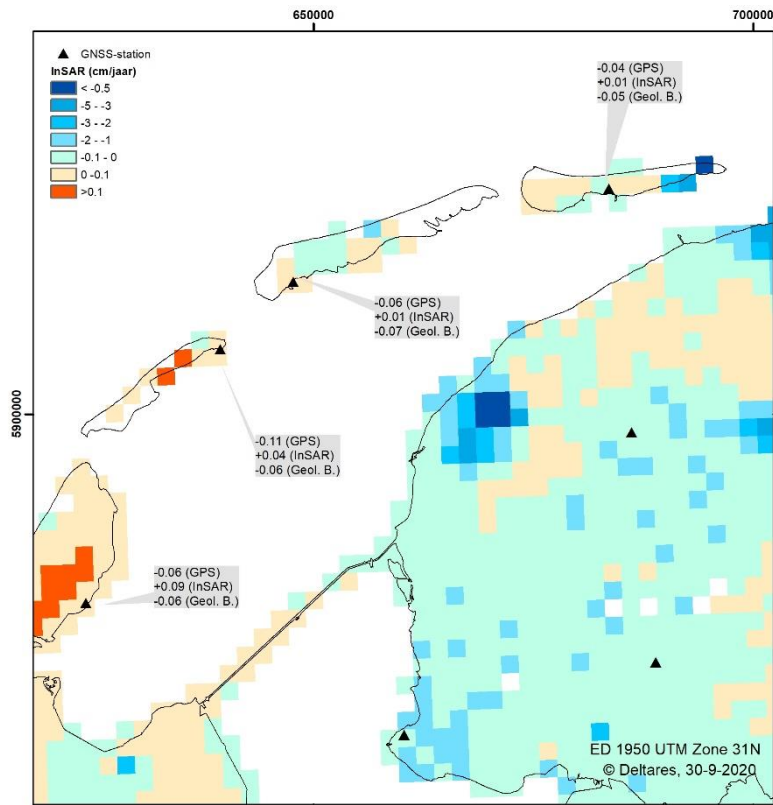
Figuur 5.5 – Totale bodembeweging (winning van gas, olie en zout; geologische bodemdaling) in de periode 2018-2050 (naar Hijma & Kooi, 2018b) met de relevante deelgebieden. De geologische bodemdaling in deze kaart omvat nog niet de elastische respons (zie toelichting in Tabel 5.1).

Tabel 5.2 - Bodembewegingsgetallen voor de deelgebieden in Figuur 5.5

Periode	Gemiddelde geologische bodembeweging (cm)	Gemiddelde bodembeweging door winning (cm)	Gemiddelde bodembewegings-snelheid (cm/yr)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm ²)	Totale bodemdalingsvolume ± onzekerheid (Mm ² , gem. per jaar)
<i>1917-2017</i>					
Vliestroom	-6.27	-0.37	-0.066	19.4 ± 8.2	0.194 ± 0.08
Vlie Binnen	-6.11	-0.26	-0.064	41.8 ± 18.1	0.418 ± 0.18
A. Zeegat	-6.26	-0.18	-0.064	18.5 ± 8.2	0.185 ± 0.08
A. Zeegat Binnen	-5.92	-0.53	-0.064	17.6 ± 7.5	0.176 ± 0.08
<i>1987-2017</i>					
Vliestroom	-1.88	-0.37	-0.075	6.6 ± 2.5	0.219 ± 0.08
Vlie Binnen	-1.83	-0.26	-0.070	13.8 ± 5.4	0.459 ± 0.18
A. Zeegat	-1.88	-0.16	-0.068	5.9 ± 2.5	0.196 ± 0.08
A. Zeegat Binnen	-1.78	-0.48	-0.075	6.1 ± 2.3	0.205 ± 0.08
<i>2018-2050</i>					
Vliestroom	-2.07	-0.43	-0.076	7.3 ± 2.8	0.221 ± 0.08
Vlie Binnen	-2.01	-2.01	-0.122	26.4 ± 8.9	0.801 ± 0.27
A. Zeegat	-2.06	-0.32	-0.072	6.9 ± 2.7	0.208 ± 0.08
A. Zeegat Binnen	-1.95	-0.47	-0.073	6.6 ± 2.6	0.200 ± 0.08

Op Terschelling en de omliggende eilanden staan ook Global Navigation Satellite System (GNSS)-stations die nauwkeurige hoogtemetingen kunnen. Daarnaast worden op www.bodemdalingskaart.nl kaarten gepresenteerd die op basis van radarsatellieten (InSAR) vervaardigd zijn. Figuur 5.6 laat de resultaten zien voor Terschelling en de wijdere omgeving. De achterliggende kleurenkaart is gemaakt op basis van InSAR en laat voor Terschelling een wisselend en niet eenduidig beeld zien: sommige vierkantjes zijn licht negatief en sommige vierkantjes licht positief. Aan deze kaart wordt nog volop gewerkt en de vierkantjes zijn 2x2 km en daarmee vrij grof. De InSAR-data op deze schaal is nog niet voldoende robuust om duidelijke uitspraken te doen over bodembeweging op Terschelling. De InSAR kaart laat wel duidelijk de bodemdaling bij Harlingen (zoutwinning) en Ameland (gaswinning zien). De gegevens van de GNSS-stations van Texel, Vlieland, Terschelling en Ameland laten allemaal een dalende trend zien, waarbij de waardes liggen tussen 0.04 en 0.11 cm daling per jaar, redelijk in lijn met geologische bodemdaling. Het GNSS-station op Terschelling meet al sinds eind jaren '90 en de meetreeks is daarom lang genoeg om langjarige trends van bodembeweging redelijk betrouwbaar te kunnen vaststellen.

Samengevat: zeer waarschijnlijk daalt Terschelling meerdere centimeters per eeuw als gevolg van geologische bodemdaling. In het midden van Terschelling kan dit wat harder gaan door gaswinning. Monitoring op basis van GNSS en InSAR laten tegengestelde waardes zien, waarbij op dit moment meer waarde gehecht kan worden aan het GNSS-station op Terschelling. De gemeten bodemdaling op dat station is in overeenstemming met de gemodelleerde geologische bodemdaling.

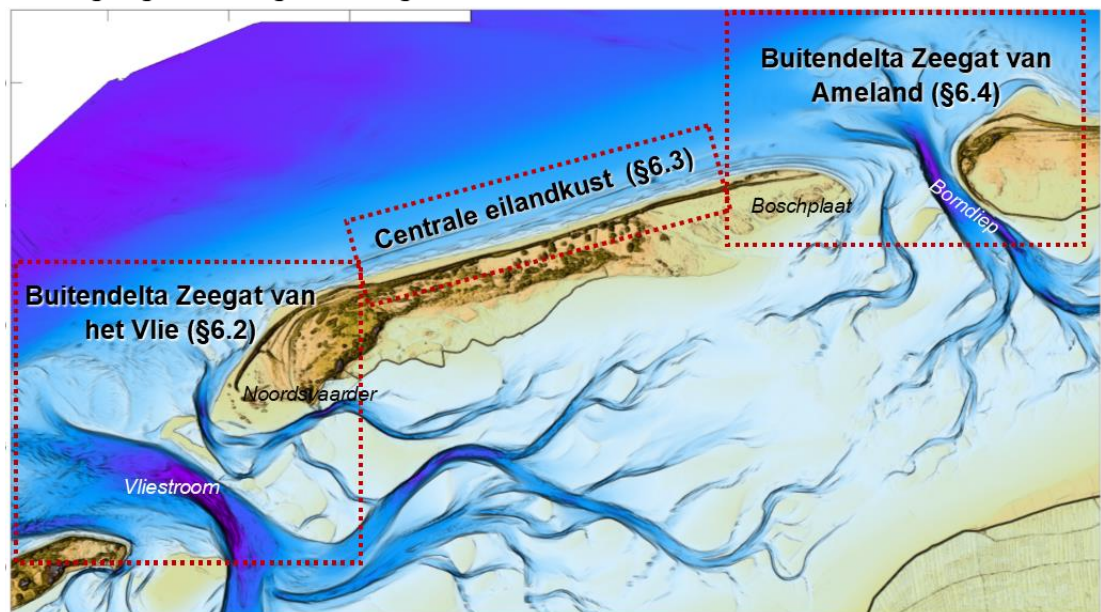


Figuur 5.6 – Kaart met de diepere bodemdaling (www.bodemdalingskaart.nl, grotendeels middels InSAR-data). Bij ieder GNSS-station staat deze snelheid van bodembeweging volgend uit de GNSS-data (<http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/gpsnetmap/GPSNetMap.html>), de InSAR-data en de gemodelleerde geologische bodemdaling uit Hijma & Kooi (2018b) met de relevant deelgebieden. De geologische bodemdaling in deze kaart omvat nog niet de elastische respons (zie toelichting in Tabel 5.1).

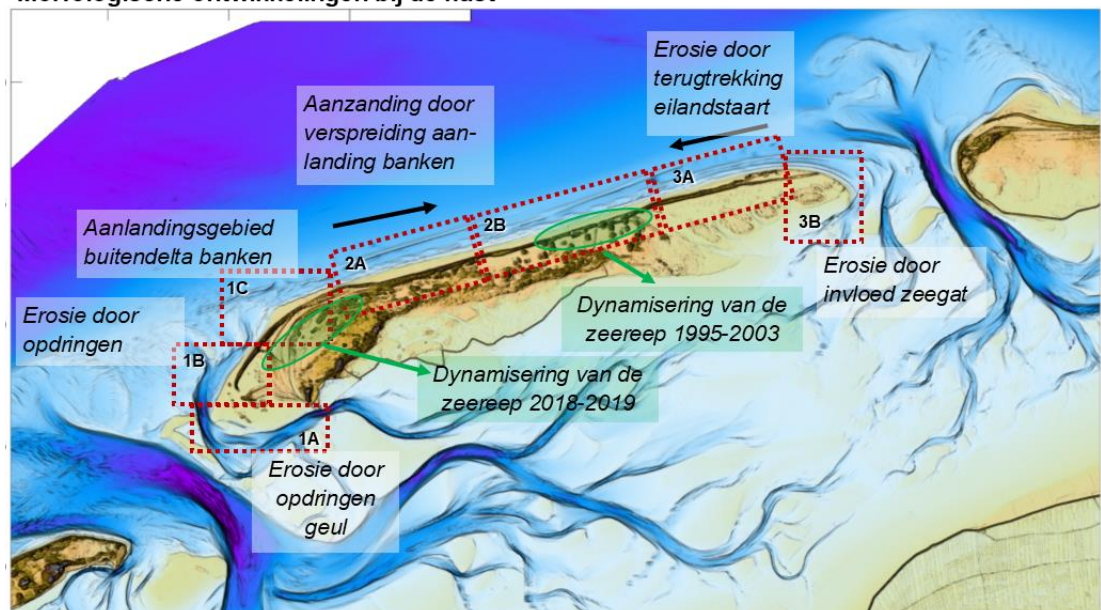
6 Beschrijving van het morfologisch systeem

6.1 Samenvatting morfologisch gedrag en kenmerken

Indeling in grootschalige morfologische eenheden



Morfologische ontwikkelingen bij de kust



Figuur 6.1 – Samenvatting van het morfologisch systeem bij Terschelling

Terschelling is ingesloten door twee zeegaten. Het Zeegat van het Vlie, met de hoofdgeul Vliestroom, bevindt zich aan de westkant. Het Zeegat van Ameland, met de geul Borndiep ligt ten oosten (Figuur 6.1). De morfologische ontwikkelingen van deze zeegaten bepalen in grote mate (direct en indirect) de ontwikkeling van het eiland zelf, vooral bij de eilandkop en -staart. De natuurlijke dynamiek kan vrijwel ongestoord plaatsvinden aan zowel de eilandkop en -staart, in tegenstelling tot Texel, Vlieland en Ameland. De buitendelta van het Zeegat van het Vlie is sinds de afsluiting van de Zuiderzee sterk in volume afgenomen en de gehele buitendelta is landwaarts

verplaatst (zie paragraaf 6.2). In het Zeegat van Ameland is er een twee-geulen systeem gevormd (zie paragraaf 6.4). Mede hierdoor is er sinds 1970 een sterke terugtrekking van de Boschplaat opgetreden. De centrale eilandkust wordt gekenmerkt door een 2 tot 3 banken systeem (zie paragraaf 6.3). Over het algemeen zijn de morfologische veranderingen hier beperkt. Alleen in 1993 is er een vooroeversuppletie uitgevoerd in het kader van het NOURTEC onderzoeksproject.

De Noordsvaarder, aan de westzijde van Terschelling, staat direct onder invloed van de voorliggende buitendelta en de geul het Boomkensdiep. Het kustgedrag is hierdoor ruimtelijk sterk variërend. Aan de zuidzijde (Figuur 6.1, 1A) is er een overheersend erosieve trend. Deze is gerelateerd aan het landwaarts insnijden van een relatief klein geultje, maar zal in de nabije toekomst naar verwachting sterk verminderen. Gescheiden door een klein gebied van kustuitbouw, vindt er grenzend aan de geul Boomkensdiep een erosie plaats van de kust (Figuur 6.1, 1B). In oostelijke richting lijkt het Boomkensdiep sterk beïnvloed te worden door de voorliggende banken (Figuur 6.1, 1C). Hier neemt de geul sterk in diepte en breedte af en de nog aanwezige erosie van de achterliggende kust zal naar verwachting stoppen als in de nabije toekomst de banken van de buitendelta met de kust verhelen. Het verhelen en daarna verspreiden van de sedimenten bepaalt hier de langere termijn kustontwikkeling. Oostwaarts draagt dit sediment bij tot kustuitbouw. Tot het midden van het eiland is de kust stabiel of uitbouwend door de grote aanvoer van zand (Figuur 6.1, 2A).

Verder oostelijk neemt de aanzanding van de kust langzaam af en gaat over in erosie (Figuur 6.1, 3A). Deze erosie is voor een groot deel gerelateerd aan de sterke terugtrekking van de Boschplaat. Dit speelt sinds 1970 en domineert de ontwikkelingen van dit deel van het eiland (Figuur 6.1, 3B). Deze terugtrekking heeft ook invloed westelijk hiervan (Figuur 6.1, 3A).

De zeereep van Terschelling heeft al vanaf 1988 een hoge dynamiek (zie paragraaf 6.5). De dynamiek is in de periode 2008-2017 toegenomen op de Boschplaat waar de zeereepduinen geërodeerd worden. Op de NW zijde van Terschelling zijn de duinen onlangs gedynamiseerd in het kader van de Programmatische Aanpak Stikstof-maatregelen (Figuur 6.1).

6.2 Zeegat van het Vlie

Deze paragraaf focust op de morfologische ontwikkelingen van de buitendelta van het Zeegat van het Vlie en aanliggende kust van Terschelling. Een overzicht van de kennis van de morfologische ontwikkelingen van het deel van dit zeegat dat onderdeel is van de Waddenzee staat in het kombergingsrapport Marsdiep en Vlie (Oost et al., 2019, onderdeel van de beheerbibliotheek Waddenzee).

6.2.1 Algemene kenmerken

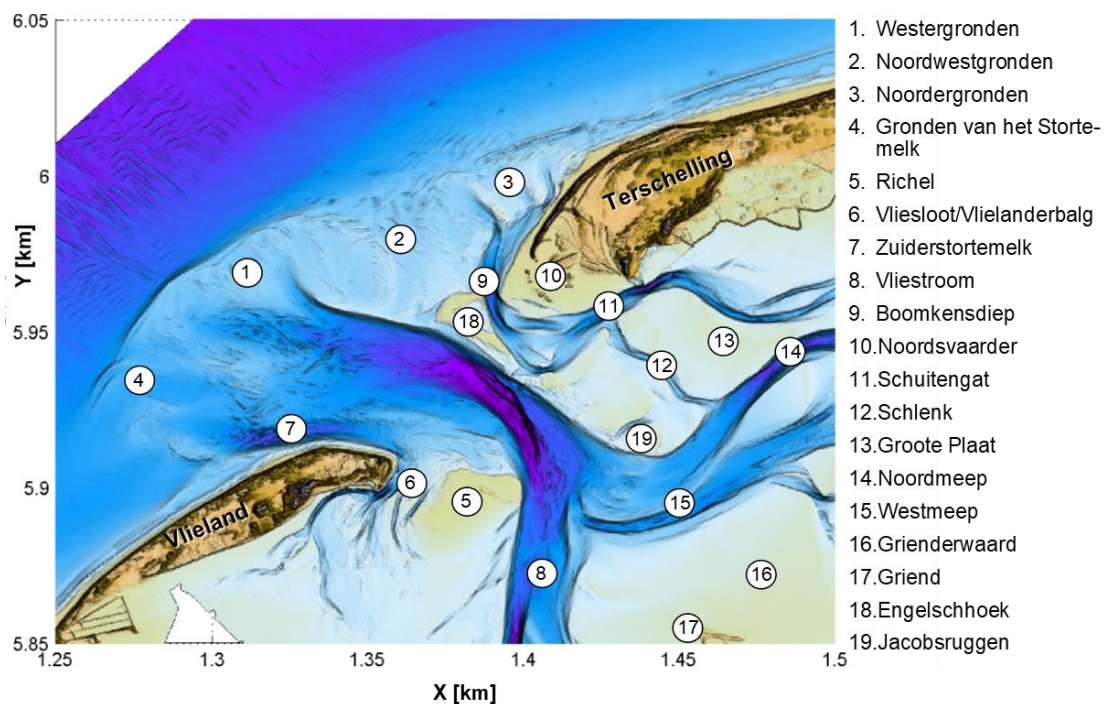
De belangrijkste geulen en platen van het Zeegat van het Vlie staan in Figuur 6.2. De hoofdgeul is de Vliestroom [8], met een NW – ZO oriëntatie. Op de buitendelta bevinden zich twee vloedgeulen, Zuiderstortemelk [7] en Boomkensdiep [9], welke zich langs de eilandkoppen van respectievelijk Vlieland en Terschelling uitstrekken. Het Boomkensdiep gaat aan de binnenzijde over in het Schuitengat [11], welke door een ondiepe zandplaat gescheiden is van de Vliestroom. Dit is de reden dat deze geul sinds 1996 niet meer de toegangsheuvel tot de haven van Terschelling vormt. De toegang tot de haven verloopt nu via de Schlenk [12]. In het bekken splitst de Vliestroom zich in een zuidelijke tak (Vliestroom) en een noordelijke tak (Westmeep [15] en Noordmeep [14]). Deze twee geulenstelsels worden gescheiden door de plaatgebieden Griend [17] en Grienderwaard [16].

Tussen Vlieland en Vliestroom, bevindt zich een plaat, Richel [5] genaamd. De Richel is een belangrijk broedgebied van vogels zoals de bontbekplevier, strandplevier en dwergstern. Ook is het een rustgebied voor de grijze zeehond. De twee kleine geulen Vliesloot [6] en Vlielandbalg [6] bevinden zich tussen de Richel en Vlieland.

De buitendelta strekt zich ongeveer 8 km in zeewaartse richting en 22 km in langsrichting uit. Het merendeel van het plaatoppervlak en volume bevindt zich ten noorden van de Vliestroom in de Noordwestgronden [2]. De noordwestgronden strekken zich ver langs de kust van Vlieland uit. In dit gebied zijn verschillende kleinere platen te onderscheiden die zich in noordoostelijke richting verplaatsen. De kleinere Noordergronden [3] bevinden zich het dichtst bij de kust van west-Terschelling.

Het zuidelijke gedeelte van de buitendelta is relatief diep. Het Zuiderstortemelk [7] geeft hier al lange tijd een erosieve druk op de kust van Vlieland. Hier zijn beschermingsconstructies gemaakt om de doorgaande erosie tegen te gaan. Meer informatie over de morfologische ontwikkeling bij Vlieland zijn te vinden in de Beheerbibliotheek van Vlieland (Elias et al., 2016).

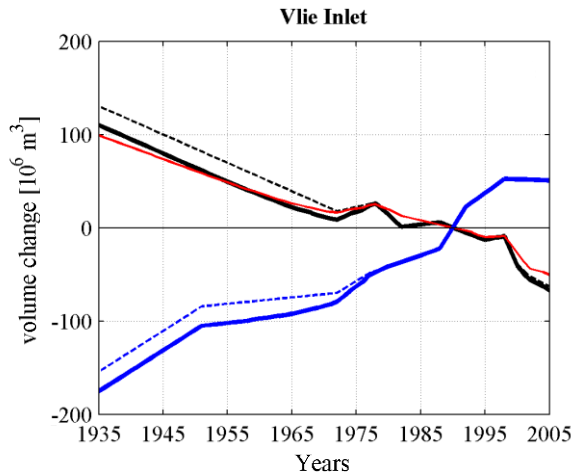
Aan de noordwestelijke kant van Terschelling bevindt zich de Noordsvaarder [10]. Het is een gevarieerd 650 hectare groot natuurgebied bestaande uit grote zandvlaktes, kwelders en stuifduinen. Het biedt ruimte aan belangrijke ecologische waarden, waaronder zeldzame plantensoorten en broedvogels. De Noordsvaarder is ontstaan toen een grote zandplaat in de 19e eeuw aanlandde op eiland Terschelling.



Figuur 6.2 - Overzicht van de geulen en platen in het Zeegat van het Vlie (onderliggende bodem is gebaseerd op de 2016-vakloding).

6.2.2 Grootschalige morfologische ontwikkeling

De buitendelta van het zeegat van het Vlie is sinds de afsluiting van de Zuiderzee in 1932 sterk in volume afgenomen en de gehele buitendelta is landwaarts verplaatst (Figuur 6.3 uit Elias et al., 2012). Voor de aanleg van de afsluitdijk was de Zuiderzee verbonden met het Vlie door de zuidelijke vertakking van de hoofdgeul. Na afsluiting verzandden de afgesloten geulen in het bekken en ook vond er veel sedimentatie plaats langs de kust van Friesland. Het kombergingsgebied van het Vlie veranderde niet alleen instantaan als een direct gevolg van afsluiting, maar deze verandering is een doorgaand proces ten gevolge van de aanhoudende sedimentatie in het bekken. De vergroting van het sedimenttransport naar het bekken wordt in eerste instantie geleverd door de buitendelta, waardoor de buitendelta in omvang afneemt.



Figuur 6.3 - Overzicht van de sedimentatie-erosie volumes voor het Zeegat van het Vlie (uit Elias et al. 2012). Volumeveranderingen van de kust (zwart), buitendelta (rood) en Waddenzee bekken (blauw). Stippellijn geeft de volumes weer exclusief gebaggerde zandvolume.

Ondanks dat er een vrijwel lineaire erosie van de buitendelta optreedt (Figuur 6.3, Elias et al., 2012), is de vorm (het patroon van geulen en platen) over de laatste decennia vrij stabiel (Figuur 6.4). In de periode 1995-2010 is er op hoofdlijnen nauwelijks verandering te onderscheiden. Zowel in de oude bodems als in de nieuwe vinden we wel dezelfde geulen en platen. De Vliestroom, gelegen in het midden van het zeegat, was de hoofdgeul. Aan weerszijden langs de eilandkoppen liepen de nevengeulen Zuiderstortemelk en Boomkensdiep. Vooral het Boomkensdiep zag er anders uit: Het Boomkensdiep was breder, minder diep en lag verder zeewaarts op de buitendelta. Direct na afsluiting zijn er wel grotere veranderingen te zien.

De grootste verschillen tussen de oudere en recente bodemligging vinden we op de platen. De ontwikkelingen op de buitendelta worden sterk beïnvloed door het sediment-bypassing mechanisme⁷. Voor de afsluiting van de Zuiderzee ligt het dominant plaatareaal zeewaarts en noordoostwaarts van de Vliestroom, zoals te zien in de 1926 bodem (Figuur 6.4). Het heeft geen uniforme hoogte maar bestaat uit een opeenvolging van kleinere parallel gelegen platen en geulen. De platen migreren oostwaarts richting de kust van Terschelling door het 'outer channel shifting' mechanisme (in Figuur 6.18a wordt dit concept samengevat).

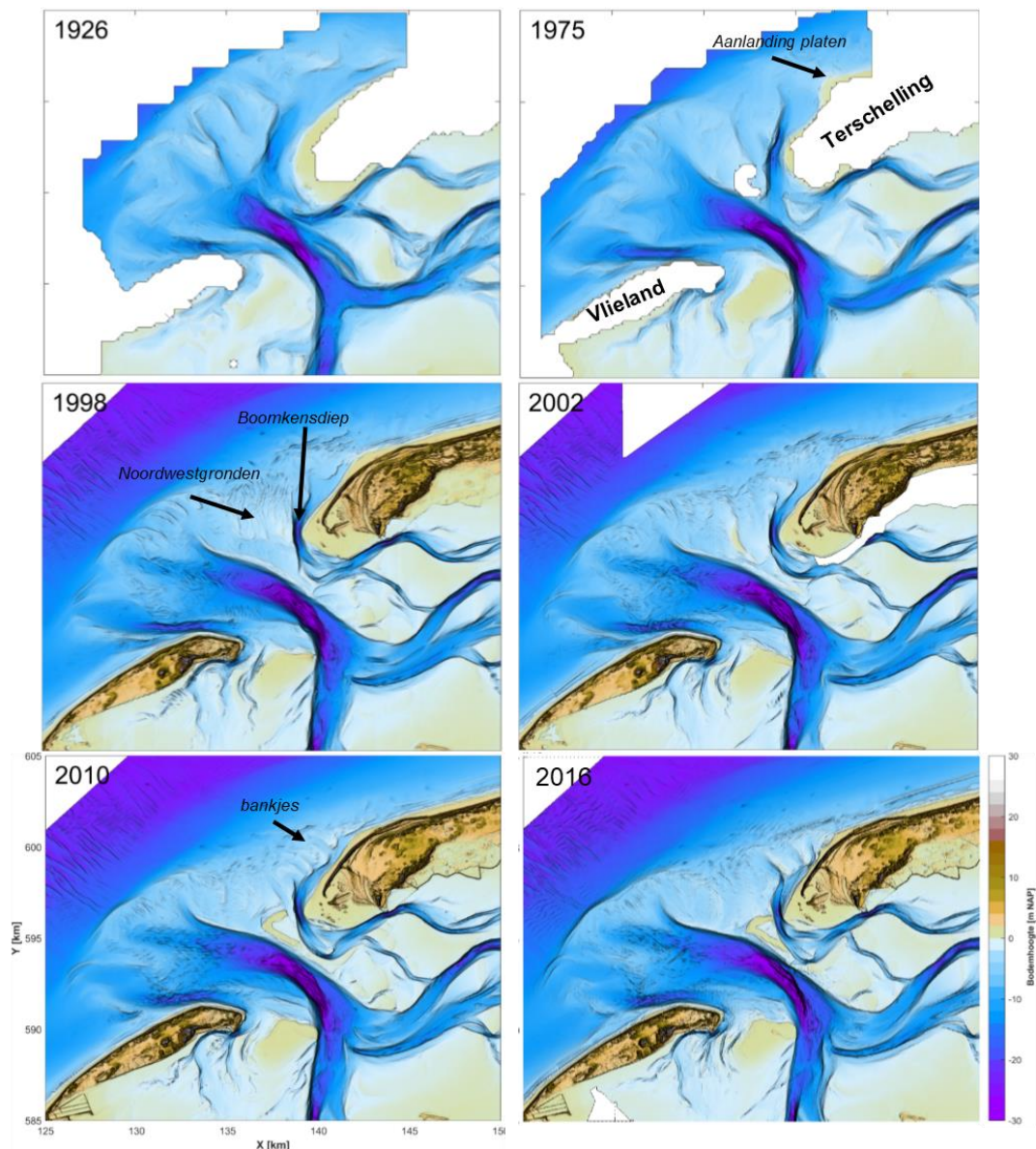
In de 1975-bodem (Figuur 6.4) zien we dat na de afsluiting van de Zuiderzee de platen en geulen op de buitendelta sterk zijn uitgevlakt. Dit is veroorzaakt door de veranderde ligging van het zwaartepunt van het kombergingsgebied (noordwaarts) na afsluiting. Een meer noordelijke aanstroming van de Vliestroom vanuit het bekken, resulteert in een meer zuidelijke uitstroming de buitendelta op. Dit verstoorde het 'outer channel shifting' mechanisme. In de huidige configuratie wordt tijdens eb sediment voornamelijk afgezet op de Westergonden en Gonden van het Stortemelk. Deze ondiepten vormen nu de nieuwe 'actieve' buitendelta. De Noordwestgonden en de Noordergonden veranderen van functie en worden langzaam door golven opgeruimd. De golven 'bulldozeren' het sediment naar de kust. De Noordwestgonden en de Noordergonden zijn nu een grote uniforme vlakte die in hoogte wat toeneemt. De zandvolumes die van de Noordwestgonden en de Noordergonden af worden verplaatst resulteren in de aanlanding van grote zandvolumes (geschat rond 2.5 miljoen m³ sinds 1998 in IJff et al., 2019) op Terschelling (ongeveer 10 km ten noorden van het zeegat). De aanlandingen zijn duidelijk te zien in de bodemkaarten (Figuur 6.4). In 2010 is net ten noorden van het Boomkensdiep nog een hele serie

⁷ De buitendelta vormt het doorgeefluik voor de sedimentstroom van het bovenstroomse eiland naar het benedenstroomse eiland. Dit proces wordt ook wel sediment-bypassing genoemd. Sediment-bypassing gaat vaak gepaard met de vorming en migratie van banken op de buitendelta die uiteindelijk verhelen met het benedenstroomse eiland en hierdoor voor een belangrijk deel de kustlijnontwikkeling van de aanliggende eilanden bepalen.

bankjes te zien, in de bodem van 2016 is aanlanding te zien. De kust heeft geprofiteerd van deze zandtoevoer, zie verder paragraaf 6.2.3.

De landwaartse verplaatsing van Noordwestgronden en de Noordergronden drukt het Boomkensdiep dicht. Daardoor neemt de geulbreedte sterk af, verplaatst de geul zich landwaarts en neemt ook de diepte toe. Tussen 1985 en 1995 verliest de geul de directe aansluiting met de Vliestroom en vormt er zich een kleine zandrug als scheiding, in het verlengde van de Engelschhoek. De geul vormt nu een kortsluitgeul met de in het bekken liggende Schuitengat. Het huidige Boomkensdiep blijft persistent langs de eilandkop van Terschelling liggen. Gevolg is dat, hoewel het nu slechts een kleine geul is in verhouding tot Vliestroom, het wel een significante erosie van de Noordsvaarder initieert. De zandrug tussen Boomkensdiep en Vliestroom leidt ertoe dat het Schuitengat niet meer gebruikt kan worden als vaargeul naar de haven.

Het afnemen van de totale omvang van de buitendelta (Figuur 6.3) heeft waarschijnlijk implicaties voor toekomstig onderhoud van het eiland. Het is de verwachting dat de plaataanlandingen nog wel zullen plaatsvinden, maar dat de volumes kleiner zijn (IJff et al., 2019).

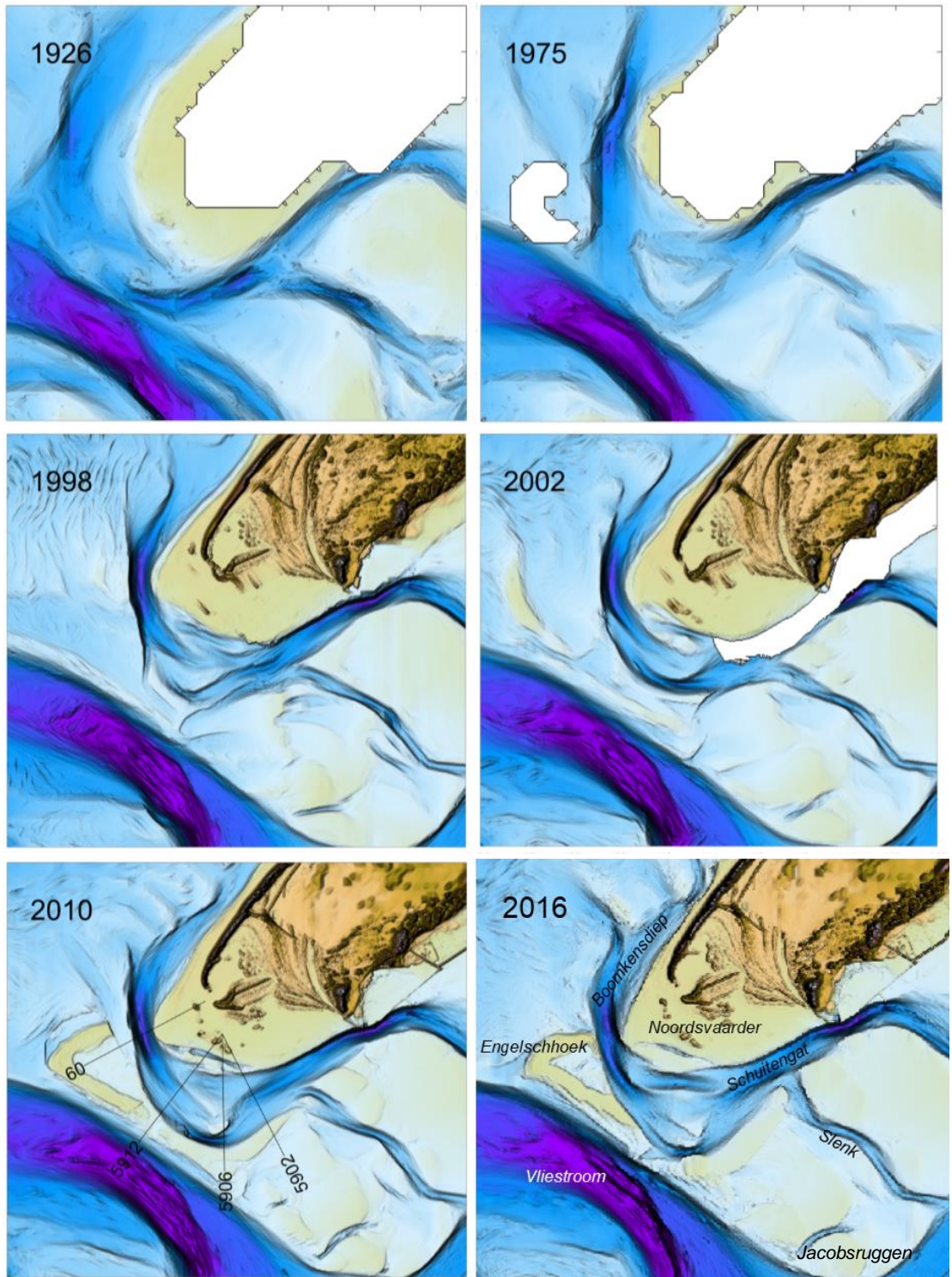


Figuur 6.4 - Grootschalige morfologische ontwikkeling van het Zeegat van het Vlie op basis van de Vaklodingen (de eilanden zijn ingevuld met het AHN)

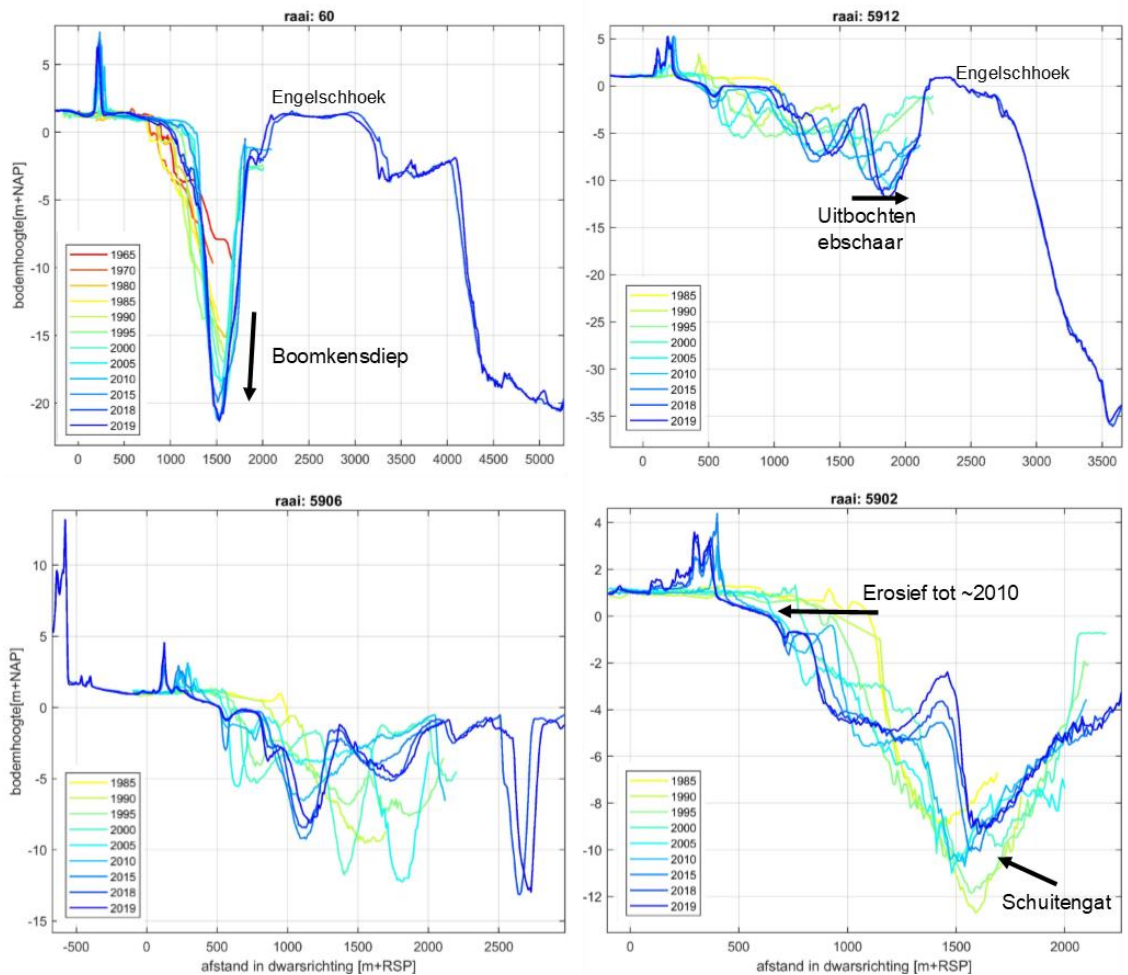
6.2.3 Morfologische ontwikkeling bij de Noordsvaarder

Figuur 6.5 geeft op basis van Vaklodingen voor de periode 1926-2016 de ontwikkelingen voor het deel van het zeegat nabij Terschelling in detail weer. Het Schuitengat is een relatief klein geultje met groot belang voor Terschelling. Tot 1996 vormde dit de belangrijkste toegangseul naar de haven van Terschelling, zie de 1926 en 1975 bodem in Figuur 6.5. Tussen 1985 en 1995 verzandt de verbinding tussen de Vliestroom en Schuitengat en wordt deze vaarroute minder goed mogelijk. In de 1998 bodem in Figuur 6.5 is te zien dat Engelschhoek en Jacobsruggen vrijwel aan elkaar zijn gekomen, wat het Schuitengat van de Vliestroom scheidt. Voor een uitvoerig beeld van de ontwikkeling tussen Schuitengat en Vliestroom is het rapport "Vooronderzoek naar alternatieven voor de vaarroute naar Terschelling" (van der Weck, 1995) te raadplegen. De groei van Engelschhoek en Jacobsruggen (hoger worden en zuidoostwaarts uitstrekken) snoert ook het Boomkensdiep in binnen de buitendelta. De geul wordt richting Noordsvaarder gedrukt en geeft tijdelijk erosie van de kustlijn (zie Figuur 6.8).

Voor het beheer is de ontwikkeling van Schuitengat en Boomkensdiep gezamenlijk van belang. De scheiding ertussen wordt gevormd door een ondiepte, doorsneden door een complex stelsel van eb- en vloedscharen. Vanaf 2002 lijkt er zich een volledige geul gevormd te hebben. De oorsprong van deze verbinding ligt in een ebschaar die voor het eerst te zien is in 1993, daarna langzaam uitbocht en in grootte toeneemt (zie raai 5912 in Figuur 6.6). Door dit uitbochten, verplaatsen van de geul richting Vliestroom, wordt de drempel tussen Schuitengat en Vliestroom steeds smaller, maar ook steeds hoger. In de 2010 opname (in Figuur 6.5) is de drempel nog steeds zichtbaar. In de 2016 bodemopname (Figuur 6.5) is te zien dat het uitbochten zich heeft doorgezet, en zorgt voor een verlaging van de drempel tussen Schuitengat en Vliestroom. Daarnaast zien we de duidelijke vorming van een eb-schaar langs de kust van Terschelling. Deze eb-schaar zou een nieuwe kortsluitgeul kunnen gaan vormen tussen Boomkensdiep en Schuitengat. Als dit gebeurt, zal de uitgebochte geul waarschijnlijk verzanden en er geen nieuwe verbinding tussen Schuitengat en Vliestroom ontstaan.



Figuur 6.5 - Weergave bodem rondom de Noordsvaarders door middel van vaklodingen voor de periode 1926-2016.



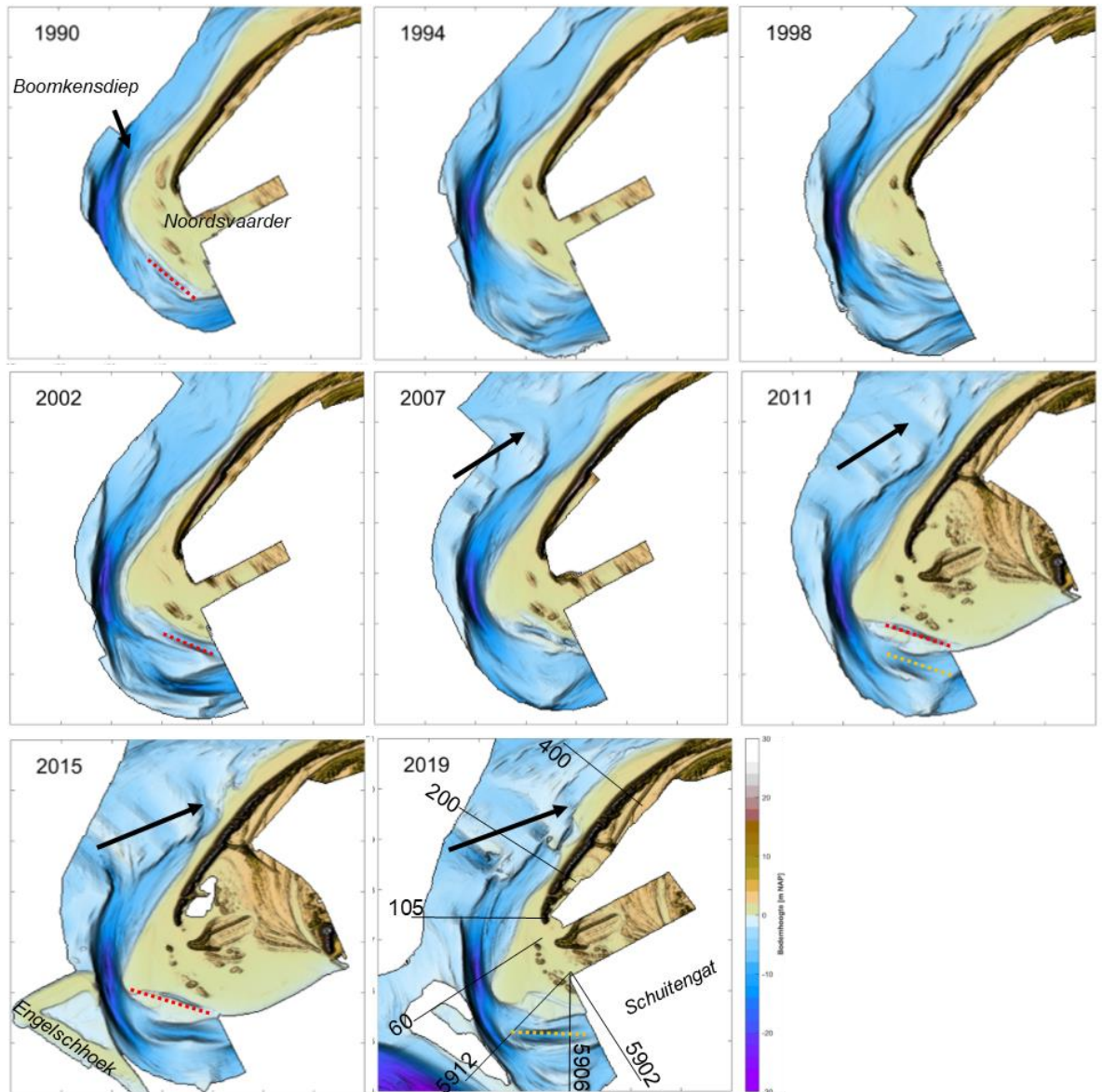
Figuur 6.6 - Dwarsprofielen rond de kop van de Noordsvaarder over de periode 1985-2019. Locatie van de raaien zijn weergegeven in Figuur 6.5 (bodem 2010)

Figuur 6.7 en Figuur 6.6 geven de detailontwikkeling van de strandvlakte van de Noordsvaarder (en Boomkensdiep). In Figuur 6.8 geeft de ontwikkeling van de 0m contour tussen 1990 en 2019. In deze figuren is onder meer te zien dat dan de zeezijde (ten noorden van raai 60) er een terugtrekking van de kustlijn is (zie ook volgende paragraaf). Ten zuiden van raai 60 vinden we juist een lokale aangroei van het strand in de laatste 5 jaar. Ten zuiden hiervan, richting keel en Waddenzee rondom raai 5906, trekt de 0m contour sterk terug. Deze erosie is gerelateerd aan de lokale geulontwikkelingen ter plaatse, maar lijkt in de laatste jaren weer te stabiliseren. In de dwarsprofielen van raaien 5912, 5906 en 5902 is deze variabiliteit in de geulontwikkelingen ook te zien.

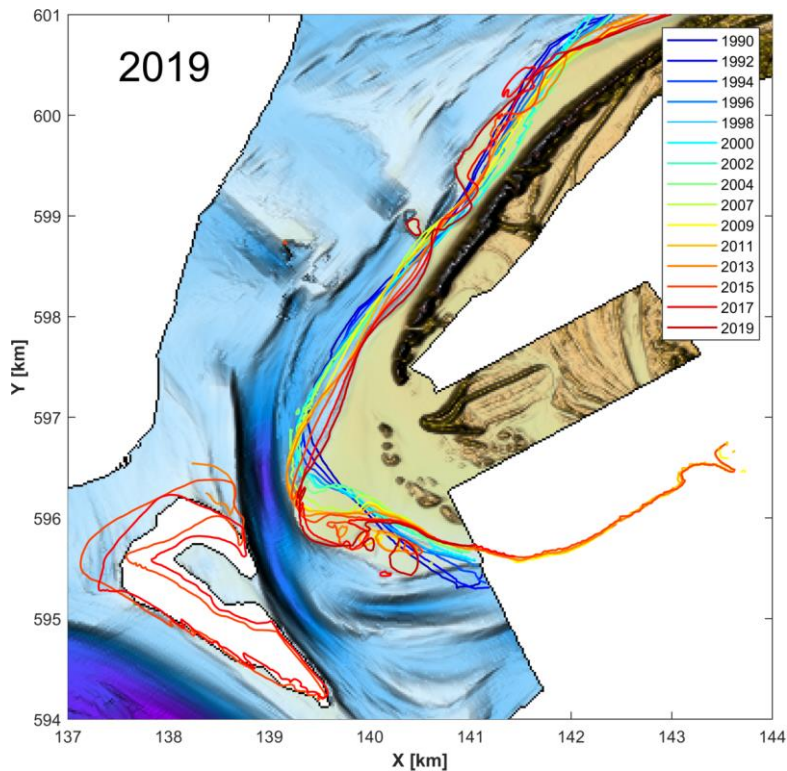
Op de kop van de Noordsvaarder (raai 60 in Figuur 6.6) ligt het Boomkensdiep dicht tegen het strand, dat is de hiervoor beschreven insnoering. Bij deze raai is zowel de uitbouw van het strand (tot ca 2015) als een landwaartse verplaatsing van de Engelschhoek te zien. Beiden maken de geul smaller en ook veel dieper (van -15m tot -22m). Ten zuiden van deze raai, ligt het diepe geulgedeelte van het Boomkensdiep veel verder zeewaarts. Op de flauwe binnengeulwand ontwikkelen zich diverse kleinere geultjes (eb- en vloedscharen).

Direct langs de kust ontstaat rond 1990 een duidelijk vloedgeultje (rode lijn in Figuur 6.7), met zeewaarts hiervan een eb-schaar gerelateerd aan het Schuitengat. Het vloedgeultje blijft gedurende de gehele periode aanwezig, verplaatst zich landwaarts en zorgt lokaal voor een sterke erosie van het strand (Figuur 6.8). Ter plaatse van het ebschaartje is het gedrag veel dynamischer. Het geultje ontwikkelt zich en verplaatst zich zeewaarts om uiteindelijk een

doorgaande geul te vormen. Vanaf 2011 is er weer een nieuwe ebschaar te zien (oranje lijn in Figuur 6.7). Tussen deze ebschaar en de het landwaartse geultje ontstaat een hoge drempel. In de meest recente bodem van 2019 is te zien dat het oorspronkelijke vloedgeultje verdwijnt en dan stopt lokaal de erosie van de Noordsvaarder (Figuur 6.8).



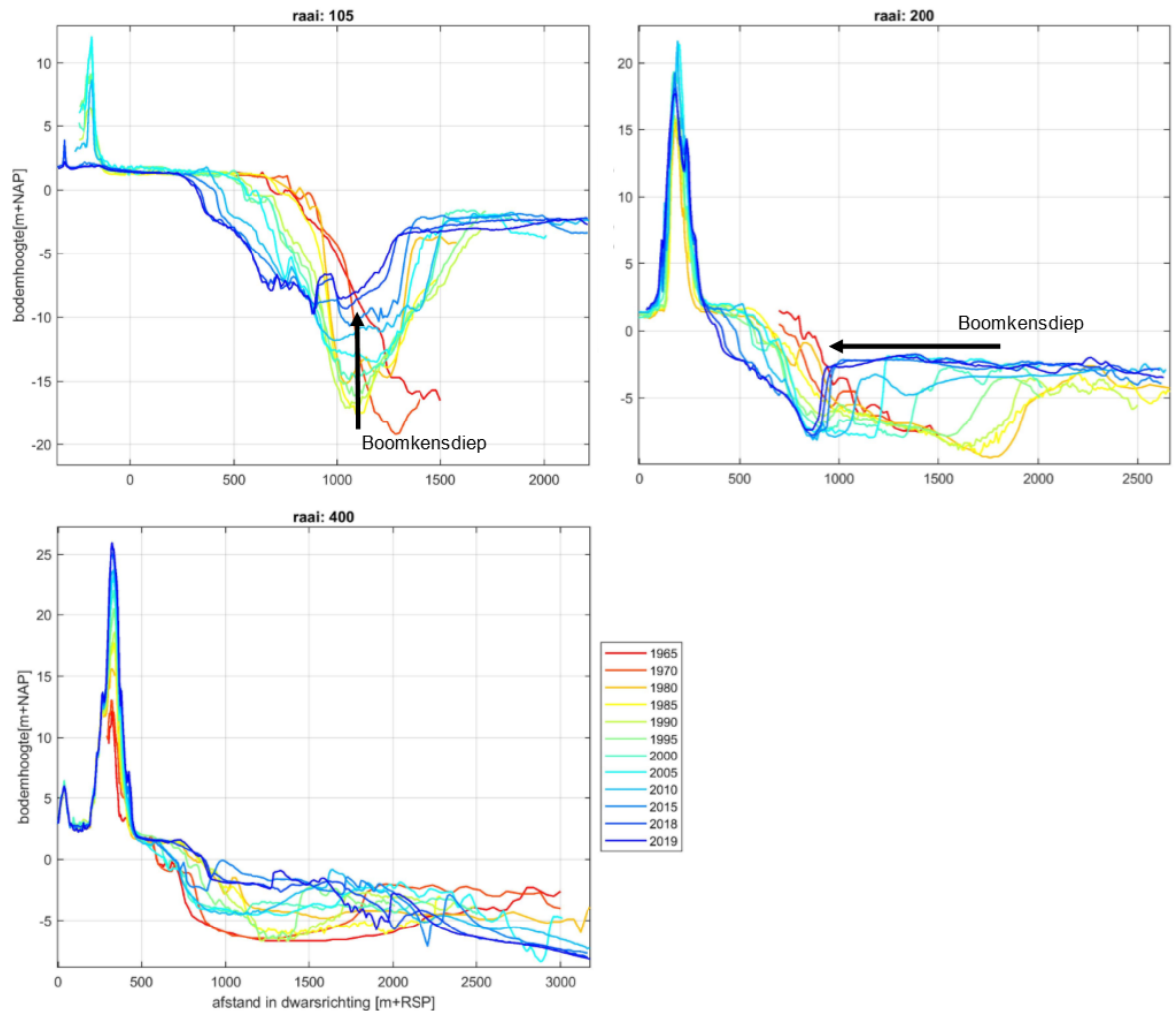
Figuur 6.7 – Detailontwikkelingen voor de periode 1990 tot 2019 rondom de Noordsvaarder, op basis van de vergride JARKUS data.



Figuur 6.8 - Ontwikkeling van de 0m contour rond de Noordsvaarder op basis van de vergridde JARKUS data. De legenda geeft kleurschalen om de 2 jaar tussen 1990 en 2019.

Het Boomkensdiep heeft ook een sterke invloed op de kustlijnontwikkeling van het deel van de Noordsvaarder tussen raaien 100 en 500 (Figuur 6.7). Bij raai 105 wordt het Boomkensdiep door de voorliggende Engelschhoek aan de zeezijde dichtgedrukt (Figuur 6.9). De geul wordt duidelijk ondieper: van -20 m in 1965 naar -9m in 2019. Het opvullen gaat gepaard met een erosie van de landwaartse geulwand (~250m tussen 1980 en 2019), ook terug te zien in de ontwikkeling van de 0m-contour lijn in Figuur 6.8. Het dichtdruken van het Boomkensdiep is ook in de oostwaartser gelegen profielen goed te zien. In raai 200 is de geulbreedte van het Boomkensdiep sinds 1965 sterk afgenomen, van meer dan 1000m tot 400m in 2019. De geulas is daarbij sterk landwaarts verplaatst. Lag het diepste deel van de geul in 1965 nog op 1800m RSP, in 2019 is dit 800m RSP, al lijkt de snelheid in de afgelopen 5 jaar sterk afgenomen te zijn. De kustlijn vertoont hierbij een kleine erosie door landwaartse verplaatsing van de geulwand.

Rond raai 400 is het aanlanden van de buitendeltabanken (Noordergronden) te zien (Figuur 6.7 en Figuur 6.9), en ook het effect ervan op de kust (Figuur 6.8). Het dynamische karakter van het aanlandingsgebied is te zien in de positie van het profiel rondom de 0m lijn. De vorming en migratie van de buitendelta-bank geeft goed inzicht in de 'sediment-bypassing' processen.



Figuur 6.9 - Dwarsprofielen aan de noordzijde van de Noordsvaarder over de periode 1985-2019. Locatie van de raaien zijn weergegeven in Figuur 6.7 (bodem 2019)

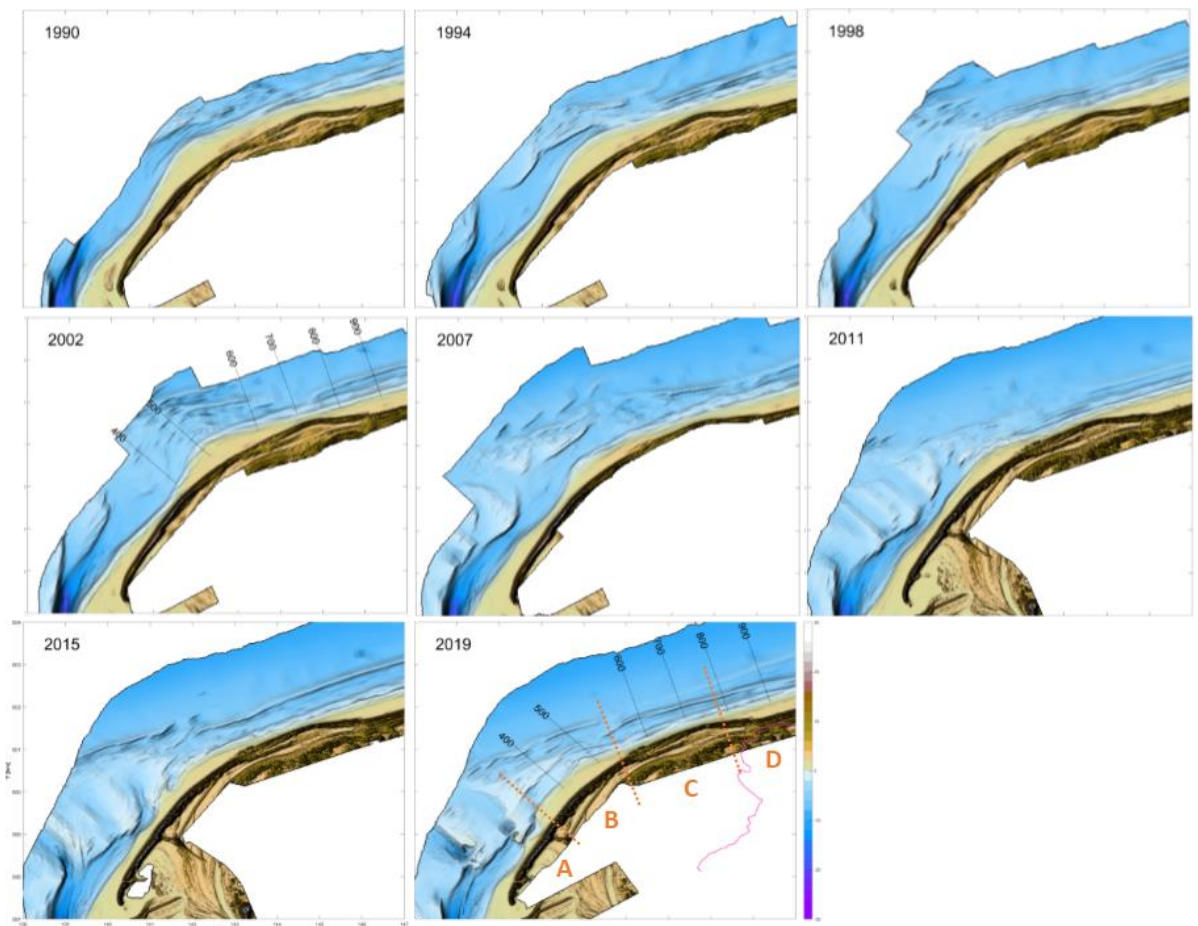
6.2.4 Morfologische ontwikkeling bij de overgang tussen Noordsvaarder en centrale eilandkust

Het aanlanden van platen vanuit de Noordwestgronden en de Noordergronden zorgt voor extra sedimenttoevoer naar de kust. Met aanlanden wordt de kustlijn (in relatief) korte tijd sterk zeewaarts verplaatst. Daarna volgt een langdurige periode van erosie door het 'uitsmeren' van de aangelande bank. Hierdoor is er sprake van structurele erosie aan de kust rondom de overgang van de Noordsvaarder naar de eilandkust bij raaien 500 tot 800, waarbij lokaal de Basiskustlijn (BKL) wordt overschreden (zie paragraaf 7.3.1).

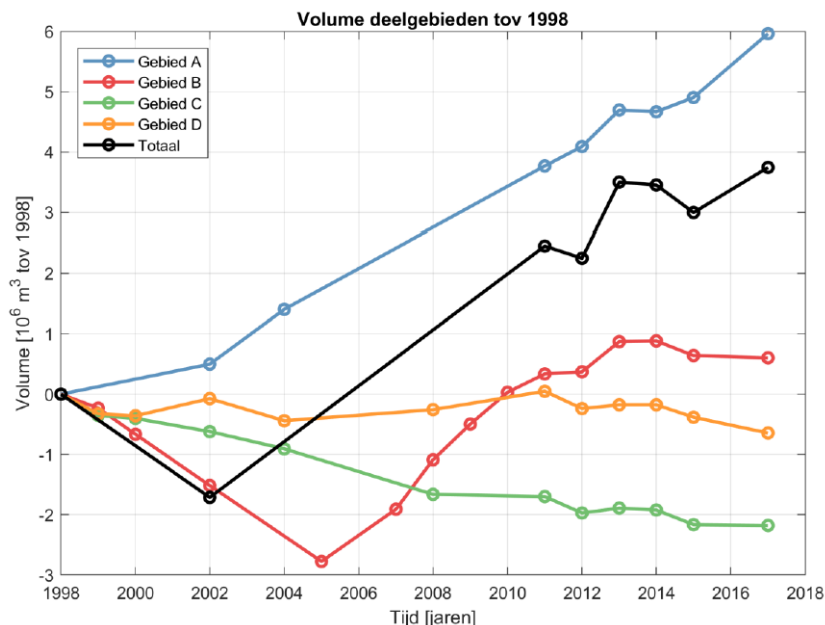
In Figuur 6.10 is te zien dat de platen zich in noordoostelijke richting bewegen waarna ze aanlanden en verhelen met de kust. Ten oosten hiervan is rondom raai 600 te zien dat de breedte van het strand is afgenomen in 2019 ten opzichte van 1990. In IJff et al., (2019) zijn de sedimentatie en erosiepatronen gekwantificeerd en zijn de volume toe- en afnames ten opzichte van 1998 berekend. Hierbij zijn vier deelgebieden te onderscheiden (zie Figuur 6.10): A) Kop Noordsvaarder; B) het Aanlandingsgebied; C) Overgangsgebied; en D) Centrale eilandkust. In gebied A is er een duidelijke toename van de hoeveelheid sediment doordat platen het gebied hier inkomen aan de zeewaartse grens (Figuur 6.11). Dit weegt voor de volumebalans dus op tegen de erosie aan het strand door het opdringen van het Boomkensdiep. Gebied B ligt rond het gebied waar platen aanlanden waardoor een periodieke trend kan plaatsvinden tussen toe- en afname van sediment in dat gebied. Daarom neemt het volume eerst af tot 2005, waarna het volume toeneemt en laatste 5 jaar stabiel is. In gebied C is duidelijke erosie te zien met een afvlakking

in recente jaren en in gebied D zijn er schommelingen aanwezig met een lichte afname in recente jaren. Netto is er sprake van een toename van sediment in het gebied door de aanvoer van zandplaten, te zien in de totale volumes.

Op de termijn van decennia nemen de volumes van de Noordwestgronden en Noordergronden af (paragraaf 6.2.2), waardoor er de verwachting heerst dat de volumes van aanlandende platen ook zullen afnemen. IJff et al., (2019) concludeert daarom dat het niet aannemelijk is dat de lokale erosie (en BKL overschrijding) in toekomst door natuurlijke processen opgeheven zal worden. Hierbij verschuift de locatie van de overschrijding zich oostwaarts met een snelheid in de orde grootte van 11-33 meter per jaar. Belangrijk aandachtspunt is dat ten oosten van raai 800 zich de zeevaartse grens van de primaire waterkering direct aan de kust bevindt (roze lijn in Figuur 6.10). IJff et al., (2019) verwacht dat de BKL rond 2028-2032 voor het eerst in dit gebied overgeschreden raakt, afhankelijk van de natuurlijke processen. Deze overschrijding betekent niet direct dat de veiligheid van de primaire waterkering vanaf dat moment in het geding is.



Figuur 6.10 - Detailontwikkelingen voor de periode 1990 tot 2019 rondom het overgangsgedebied tussen de Noordsvaarder en centrale eilandkust, op basis van de vergridde JARKUS data. Zeewaartse grens van de primaire waterkering in de roze lijn.

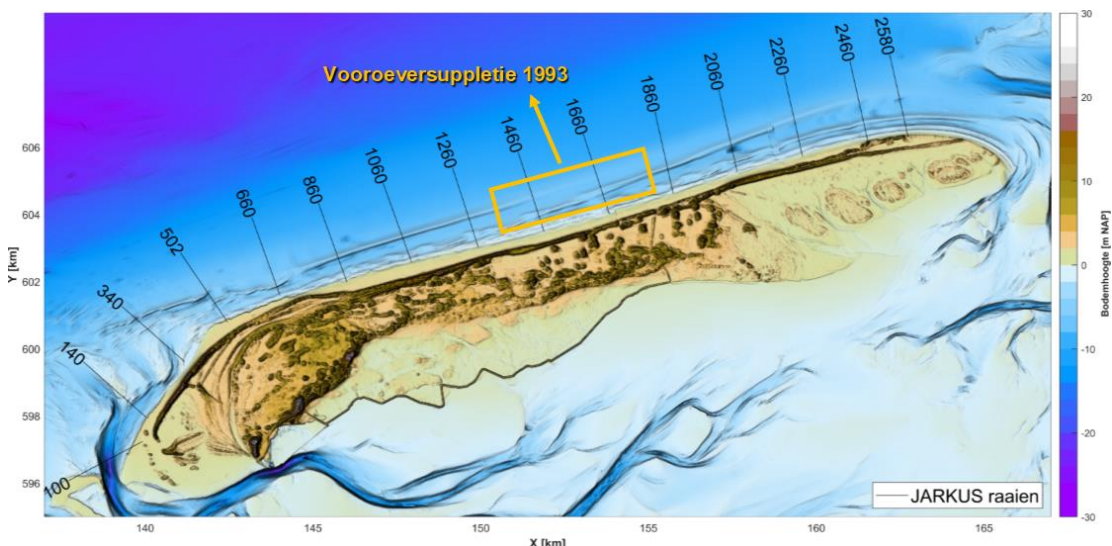


Figuur 6.11 - Volumes in deelgebieden ten opzichte van 2017. Deelgebieden als weergegeven in Figuur 6.10. Bolletjes geven aan in welke jaren er data beschikbaar was voor betreffend deelgebied/totaal. Gebied A=Kop Noordsvaarder, B=Aanlandingsgebied, C=Overgangsgebied en D=Centrale eilandkust. Bron: Ijff et al., (2019)

6.3 Centrale Noordzeekust van Terschelling

6.3.1 Algemene kenmerken

De centrale eilandkust wordt gekenmerkt door 2 tot 3 banken in het kustprofiel. Beheermaatregelen langs de kust van Terschelling zijn beperkt. Alleen in 1993 is er een vooroeversuppletie uitgevoerd. Deze suppletie is uitgevoerd in het kader van het Nourtec onderzoeksproject van 1993-1997 (Hoekstra et al., 1994). De suppletie van 2.1 miljoen m³ werd uitgevoerd op de vooroever tussen raai 1380 en 1800 (lengte van 4,5 km) in de trog tussen de midden en buitenste brekerbank. Dit komt overeen met een gemiddeld volume van 450 m³/m (zie ook paragraaf 7.2). Het doel van de suppletie was om ervaring op te doen met een vooroeversuppletie.



Figuur 6.12 - Overzicht van de Centrale Noordzeekust van Teerschelling, met enkele JARKUS raaien en de locatie van de 1993 vooroeversuppletie (onderliggende bodem is gebaseerd op de 2016-2019 Vaklodingen met AHN).

6.3.2 Morfologische ontwikkeling bij de centrale eilandkust

Het bankgedrag bij Terschelling (voor en vlak na de suppletie in 1993) is uitgebreid beschreven in Ruessink en Kroon (1994). Grunnet en Reussink (2005) en Stein (2005) geven ook een beschrijving van het effect van de vooroeversuppletie 10 jaar na uitvoering.

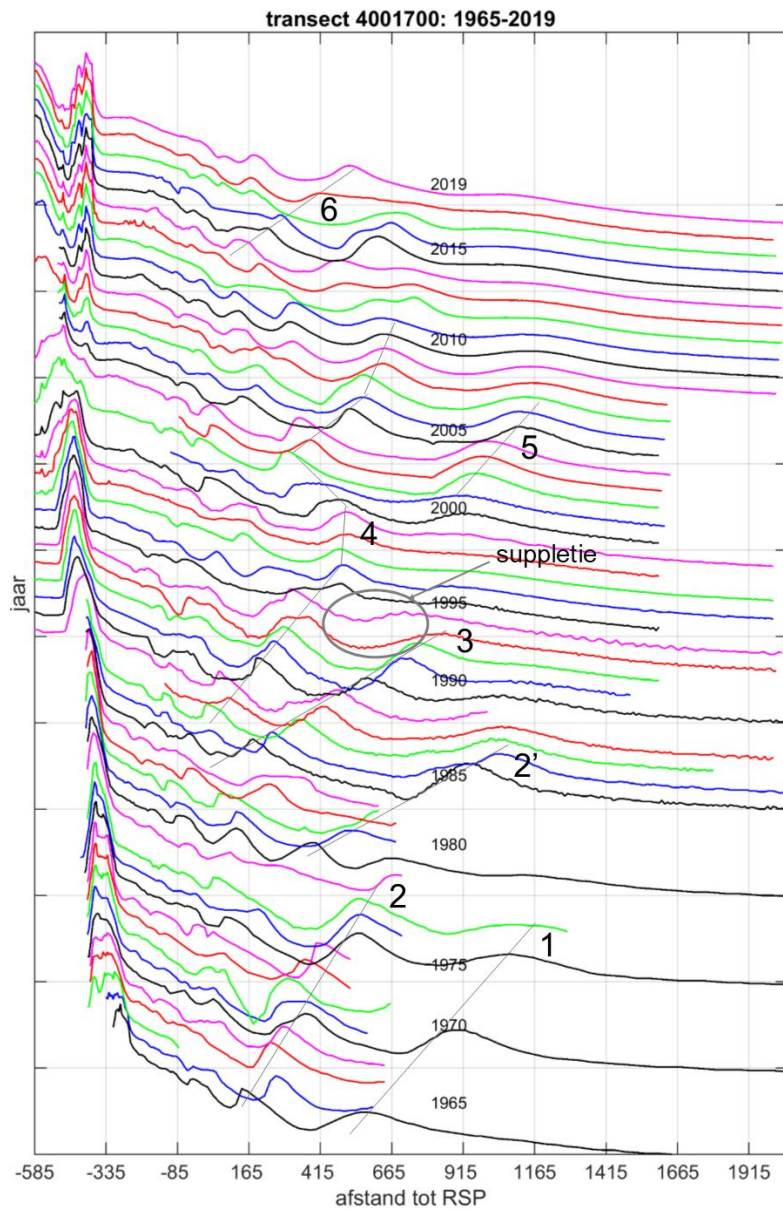
Voor aanleg van de vooroeversuppletie (over de periode 1965-1993) zijn er permanent 2 tot 3 banken aanwezig met een zeewaartse migratiecyclus (Ruessink en Kroon, 1994). Ruessink en Kroon concluderen op basis van observaties dat het bankgedrag 3 stadia van ontwikkeling vertoont (zie timestack van raai 1700 in Figuur 6.13):

- 1) Generatie van de bank langs de kust. Deze binnenbank ligt tot zo'n 300m van de kustlijn en kan in deze zone blijven liggen. Wel fluctueert de positie.
- 2) Zeewaartse migratie van de bank van 300m tot zo'n 1300m vanuit de kustlijn. De migratiesnelheid varieert. Bank 2 had een snelheid tussen de 40 en 60 m/jaar terwijl bank 2' met een sneheid van 120-140 m/jaar verplaatste.
- 3) Uitdempen van de bank op zo'n 1300m vanuit de kustlijn. Bij de start van uitdempen is de bank zo'n 5,5m hoog. Het uitdempen gebeurt in een aantal jaren.

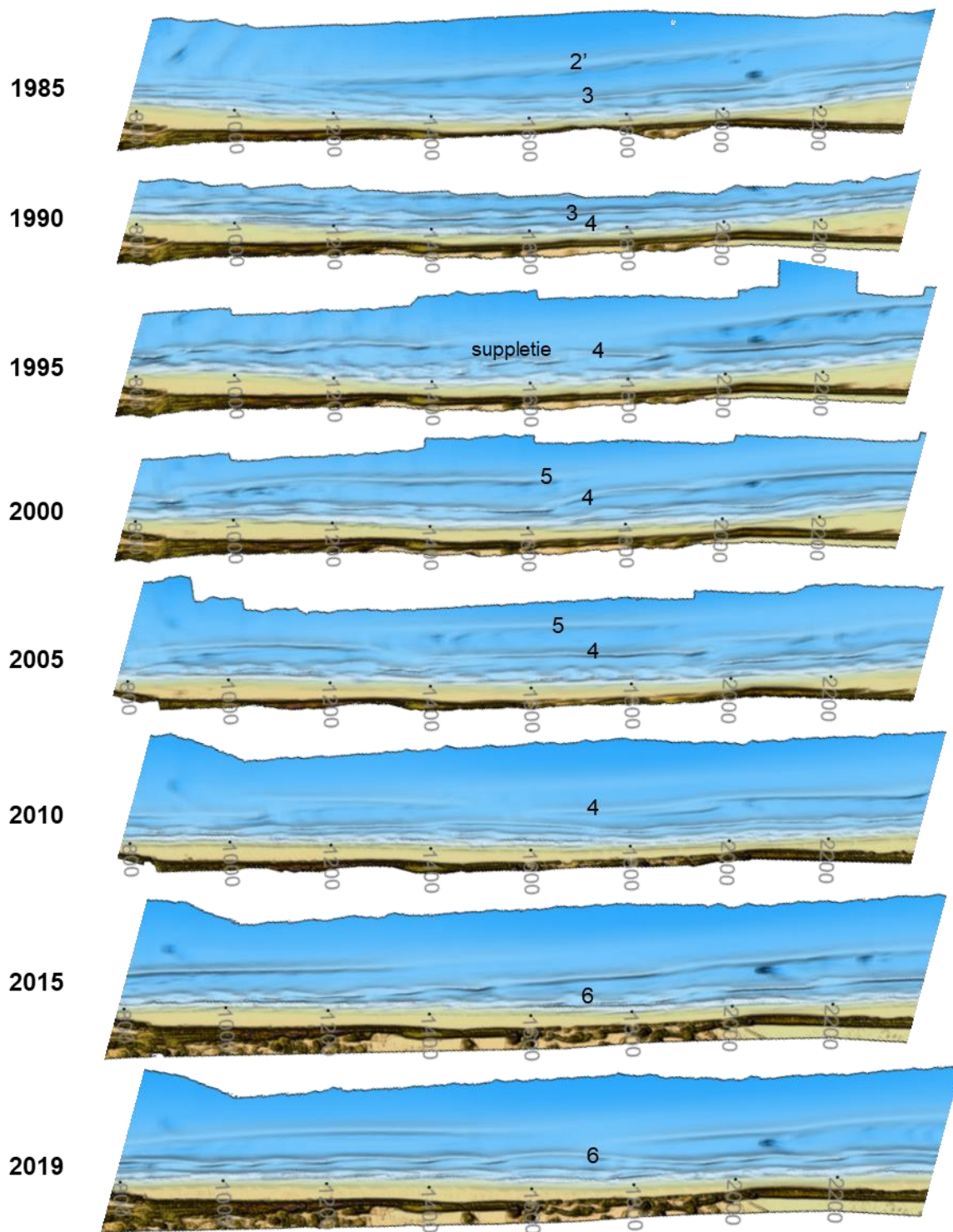
Als hypothese wordt gegeven dat de bankhoogte van de buitenbank maatgevend is voor de processen die landwaarts en zeewaartse migratie van de landwaarts gelegen banken controleren. Met andere woorden, de buitenbank bepaalt het bankgedrag over een periode van jaren. Daarnaast word geconcludeerd dat dit dwarsproces beïnvloedt word door langs processen. Als er een bank door langstransport het profiel in migreert (Figuur 6.14), geeft dat een beïnvloeding van het bankgedrag.

Grunnet en Reussink (2005) en Stein (2005) concluderen dat de zeewaartse migratie van de banken werd verstoord 6-7 jaar na uitvoering van de vooroeversuppletie. De ligging van de middelste bank vertoont hierna een grillig verloop tussen 1995 en 2000 (bank 4 in Figuur 6.13). Vanaf 1999 / 2000 begon bank 4 weer zeewaarts te migreren met dezelfde snelheid als voor de vooroeversuppletie. Hierna vormen zich weer nieuwe banken (5 en 6), en lijkt de dynamiek in het kustprofiel weer grotendeels hetzelfde te zijn als in de situatie voor de suppletie.

Stein (2005) keek ook naar de effectiviteit van de suppletie, in termen van toename in het MKL-volume. Hij concludeerde dat de suppletie al in het eerste jaar al een positief effect had op het MKL-volume, doordat het suppletiezand zich landwaarts verplaatste. In de jaren erna zorgde het veranderde bankenpatroon in combinatie met de al aanwezige zeewaartse trend in MKL-positie voor verdere toename van het MKL volume. In paragraaf 7.3.1 en Figuur 7.3 wordt deze ontwikkeling van de MKL-positie beschreven.



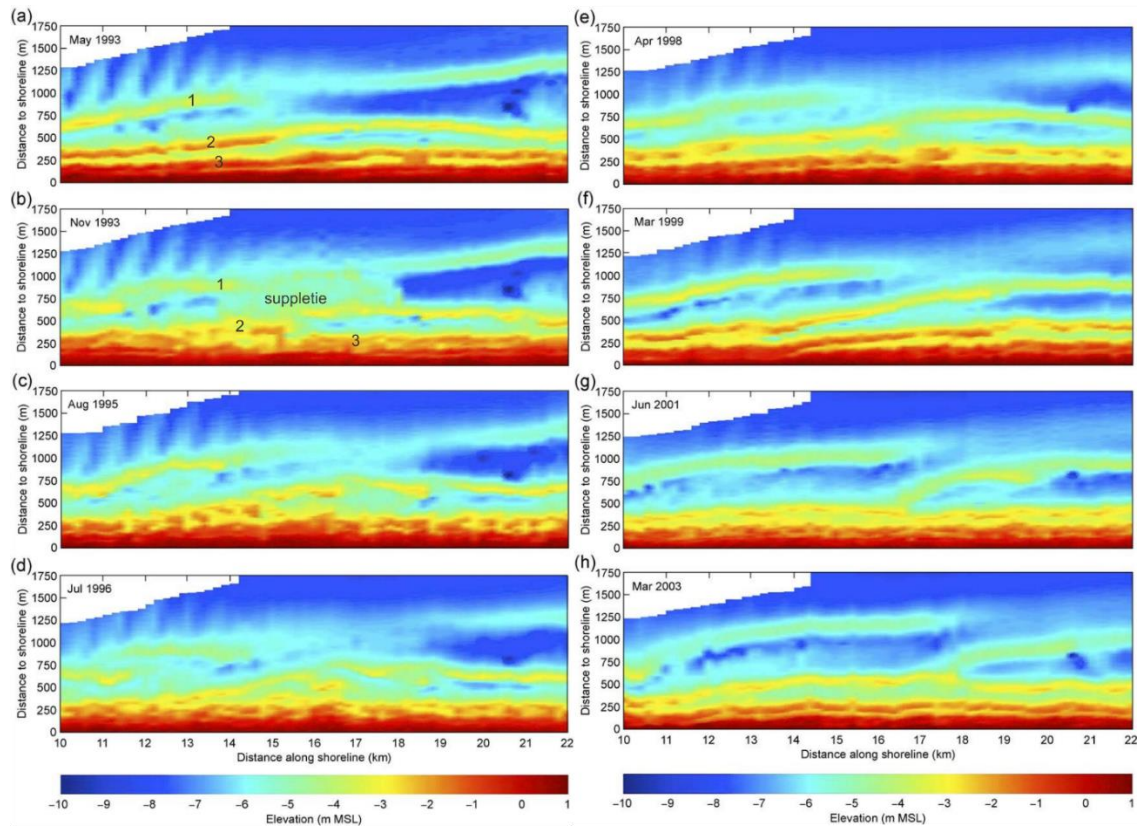
Figuur 6.13 - Overzicht bankgedrag van raai 1700 (km. 17) door middel van JARKUS Timestack). Nummers geven de ligging van de banken overeenkomstig aan Ruessink en Kroon (1994).



Figuur 6.14 - Bovenaanzicht van de morfologie van de centrale eilandkust van Terschelling op basis van vergride JARKUS data representatief voor de periode 1985-2019.

Uit de analyse van Grunnet en Ruessink (2005) volgt dat net voor uitvoering van de suppletie (Figuur 6.15 mei 1993) er 3 banken aanwezig zijn in het profiel. De buitenbank is hier al een 3-4 jaar aan het uitdempen (zie ook Figuur 6.15). De suppletie, het opvullen van de trog tussen binnen- en buitenbank, is duidelijk zichtbaar in de opname van november 1993. In de jaren daarop volgend, vertoont de buitenbank grootschalige 3D ontwikkelingen. De bank breekt tijdelijk op in 2 stukken (Figuur 6.15 d). De middenbank vertoont tevens een complex 3D patroon (Figuur 6.15 c). Tussen km. 10-15 verheelt de bank met de kustlijn, terwijl tussen km. 15-22 de bank wordt

onderbroken door kleine geulen ('rip channels'). In de jaren 1998-1999 is er weer een aaneengesloten middenbank gevormd, vanaf km 16 ligt deze bank veel verder zeewaarts. In 2001 is te zien dat de middenbank ter hoogte van km 17, splits in twee banken: een binnen- en buitenbank. In 2003 is er dan een duidelijk gevormde doorgaande binnenbank te onderscheiden.



Figuur 6.15 - Overzicht bodem op basis van NOURTEC en JARKUS metingen voor: (a) Mei 1993, (b) November 1993, (c) Augustus 1995, (d) Juli 1996, (e) April 1998, (f) Maart 1999, (g) Juni 2001 en (h) Maart 2003. Overgenomen uit Grunnet en Ruessink (2005).

6.4 Amelander Zeegat

Deze paragraaf beschrijft de morfologische ontwikkelingen van de buitendelta van het Amelander Zeegat en de aanliggende kust van Terschelling. Een overzicht van de kennis van de morfologische ontwikkelingen van het kombergingsgebied van het Zeegat van Ameland staat in het 'Kombergingsrapport' van het Zeegat van Ameland (Oost en Cleveringa, 2017).

6.4.1 Algemene kenmerken

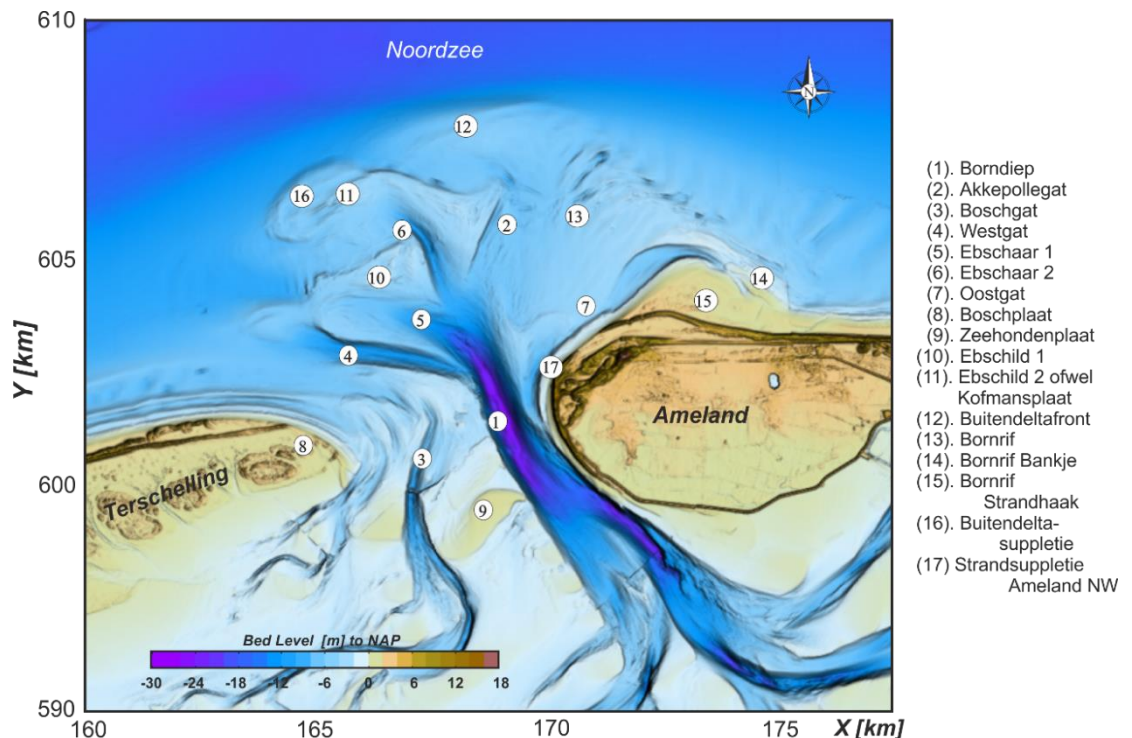
De belangrijkste geulen en platen van het Amelander Zeegat worden weergegeven in Figuur 6.16 aan de hand van de bodemopname uit 2019. Deze bodem vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde van het zeegat, langs de westkust van Ameland (het Borndiep [1]). Het Borndiep ging op de buitendelta over in het Akkepollegat [2]. Deze geul is in de bodem van 2019 nog nauwelijks te onderscheiden.

Het oostelijke uiteinde van Terschelling wordt Boschplaat [8] genoemd. Aan de zeewaartse zijde hiervan bevindt zich de vloed-gedomineerde geul Westgat [4]. Tussen de Boschplaat en het Borndiep bevindt zich een ondiep gebied waarin diverse kleinere geulen zichtbaar zijn [3]. De grootte van deze geulen varieert door de tijd. Als er een duidelijke geul vormt dan ontstaat er een verbinding tussen de geulen in het bekken en het Westgat. Deze verbinding is in het verleden vaak Boschgat [3] genoemd. In het bekken bevindt zich de wat hogere Zeehondenplaat [9]. Deze

plaat vormt een scheiding tussen het oostelijke en westelijke deel van het bekken. Het oostelijke deel maakt verbinding met het Borndiep, het westelijke deel met het Boschgat.

Op de buitendelta bevinden zich drie onderscheidbare platen [10, 11, 13], waarvan de grootste (Bornrif [13]) oostelijk van het Akkepollegat ligt. Dichterbij Terschelling, aan de westzijde van de buitendelta (ook wel Kofmansbult genoemd), tussen Westgat en Akkepollegat, hebben zich vanaf 2010 twee ebscharen [5 en 6] met bijbehorende ebschilden gevormd [10, nog naamloos, en 11, Kofmansplaat]. Als onderdeel van de sediment-bypassing cyclus⁸ vormen er zich periodiek op het Bornrif kleinere platen zoals het Bornrif Bankje [14] dat in 2019 is verheeld met de kust van Ameland. De aanlanding van het Bornrif Bankje vond ten oosten van de Bornrif Strandhaak [15] plaats.

Het Amelander Zeegat is zeer goed onderzocht in het Kustgenese 2.0 programma, met een groot monitoringsprogramma en een pilotsuppletie op de buitendelta⁹. Aan de westzijde van de Kofmansplaat is de buitendeltasuppletie [16] aangelegd in 2018 (5,5 miljoen m³).



Figuur 6.16 - Overzicht van de geulen en platen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (onderliggende bodem is gebaseerd op de 2019 Vakloding), uit Deltares (2020).

6.4.2 Grootschalige morfologische ontwikkeling

Het sediment-bypassing proces (en de bijbehorende bankaanlandingen) bij het Amelander Zeegat werd eerst beschreven als een cyclisch of periodiek proces (Oertel, 1977; FitzGerald et al., 1984; Israel en Dunsbergen, 1999; Cheung et al. 2007; Robin et al., 2009, Hein et al., 2016). Voor het

⁸ De buitendelta vormt het doorgeefluik voor de sedimentstroom van het bovenstroomse eiland naar het benedenstroomse eiland. Dit proces wordt ook wel sediment-bypassing genoemd. Sediment-bypassing gaat vaak gepaard met de vorming en migratie van banken op de buitendelta die uiteindelijk verhelen met het benedenstroomse eiland en hierdoor voor een belangrijk deel de kustlijnontwikkeling van de aanliggende eilanden bepalen.

⁹ Buitendeltasuppleties zijn niet primair gericht op het tegengaan van kustachteruitgang, maar gebruiken de natuurlijke processen om het hele kuststelsel van sediment te voorzien. Met behulp van buitendeltasuppleties kan ingespeeld worden op de dynamiek van platen en geulen in de buitendelta, zodat meer zand richting de kust beweegt, waar het kustlijnerosie mitigeert, voordat er kustlijnhandhaving nodig is vindt via reguliere suppleties. Een voorwaarde van een dergelijke suppletie is dat onderliggende processen en mechanismen wel voldoende begrepen worden.

Zeegat van Ameland concluderen Israël (1989) en Israël end Dunsbergen (1999) een plaat-geulevolutie met een cyclus van 50-60 jaar. Recent onderzoek door Elias et al. (2019) laat zien dat voor het Amelander Zeegat een dergelijke cyclus niet (meer) optreedt. Deze conclusie is mede gebaseerd op de gegevens die tijdens de Kustgenese 2.0 campagne en pilotsuppletie in het Ameland Zeegat zijn verzameld, naast oudere datasets. De (half)jaarlijkse bathymetrische waarnemingen laten zien hoe de aanvankelijke kleinschalige verstoringen in het centrale deel van de buitendelta (de ebgeul- en plaatsystemen) de ontwikkelingen van de gehele buitendelta kunnen bepalen en uiteindelijk beginnen te domineren. Instabiliteiten zijn in eerste instantie kleine morfodynamische veranderingen, waarvan voorheen niet werd gedacht dat zij de buitendeltadynamiek als geheel zouden beïnvloeden.

Aan de hand van de bathymetrische waarnemingen tussen 2005 en 2019 wordt de start van een sediment-bypassing cyclus door de vorming en verplaatsing van verschillende ebschaar- en ebschild-systemen beschreven in Figuur 6.17. In Elias et al. (2020) en Deltares (2020) worden de volgende 5 ontwikkelingsfasen beschreven:

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

Sedimentaantvoer 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 deze geul. Hier vormt zich een langgerekte ondiepte of bank (zie Figuur 6.17, 2005 bodem).

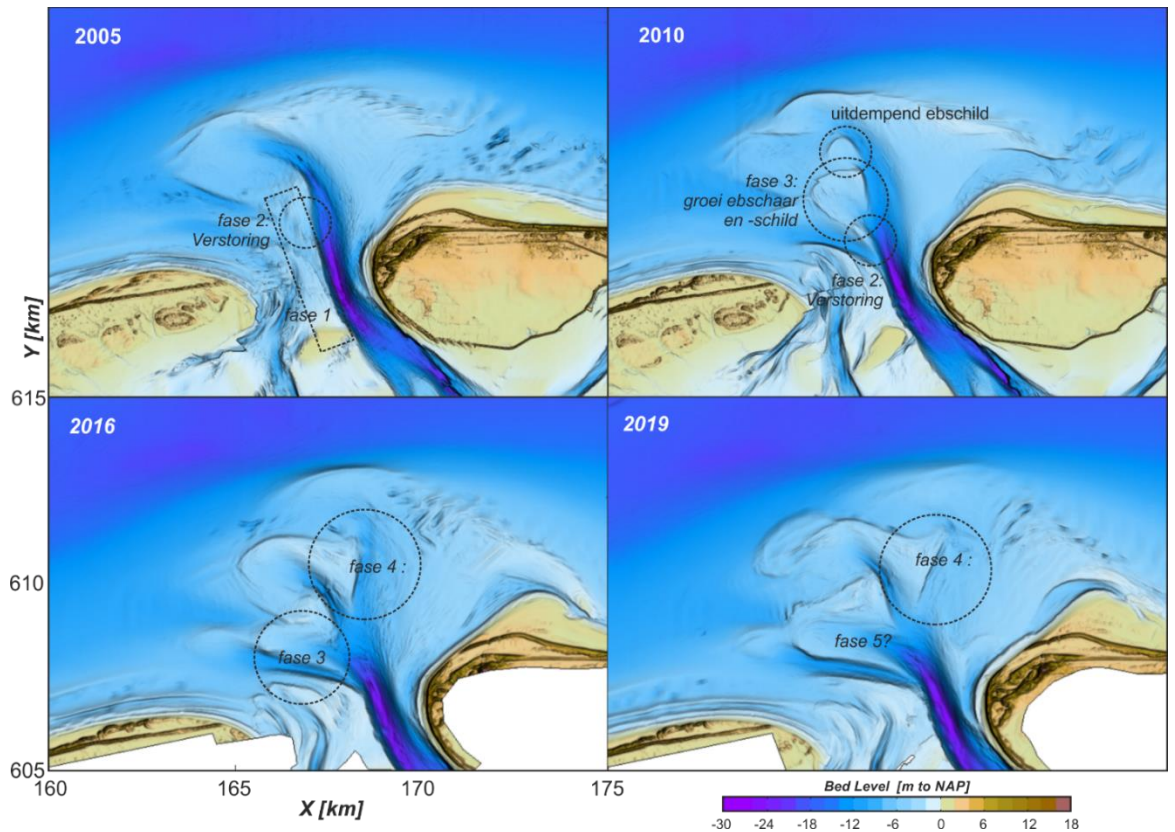
Fase 2; Vorming van verstoringen. Op deze bank vormen zich kleine instabiliteiten of verstoringen. Als deze verstoringen verbinding maken met de grote ebstromingen door het Borndiep ontstaat een klein geultje of ebschaar. Het geërodeerde sediment accumuleert zeewaarts van dit geultje in de vorm van een klein ebschild.

Fase 3; Vorming van ebscharen en ebschilden. De initieel kleine instabiliteiten groeien daarna snel uit. Een serie ebscharen met ebschilden ontstaat. Deze zijn niet allemaal stabiel. Soms worden ze opgenomen in een ander, nieuw ontwikkelend systeem. De gevormde eb- en vloedchilden beginnen de ontwikkeling van de westelijke zijde van het buitendeltaplatform te bepalen (Figuur 6.17, 2010). De ebscharen ontwikkelen snel, en de ebschilden verplaatsen zich tot 500 m per jaar in zeewaartse richting.

Fase 4; Geul-plaatinteracties. 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 hoofd-eb geul (Akkepollegat) steeds verder naar het oosten te drukken (Figuur 6.17, 2016-2019). In de meest recente bodem van 2019 is het Akkepollegat nauwelijks meer als geul te onderscheiden. Het diepe deel van het Borndiep maakt al verbinding met de meest zuidelijke nieuwe ebschaar.

Fase 5; Heroriëntatie van de hoofdgeul en benedenstroomse bankaanlanding. Deze vijfde stap heeft nog niet plaatsgevonden, maar de volgende ontwikkeling ligt voor de hand; met een doorgaande oostelijke verplaatsing van de nieuwe banken wordt het Akkepollegat steeds minder efficiënt als ebgeul. De meest zuidelijke ebschaar heeft een sterker verhang en vormt daarmee een efficiënter alternatief. Deze ebschaar zal zich sterk ontwikkelen als het meer en meer stroming trekt. Uiteindelijk vormt zich een nieuwe hoofd-ebgeul op het westelijke deel van de buitendelta. Het debietverlies van het Akkepollegat zorgt ervoor dat de banken snel kunnen verhelen met het Bornrif en uiteindelijk zal een nieuwe aanlandingsbank gevormd worden. Met aanlanding van deze bank is de sediment-bypassing cyclus voltooid. Het is nog de vraag hoe het Westgat gaat reageren op deze verandering. Een optie is dat het Westgat direct verbinding gaat

maken met het Boschgat. Dan ontstaat tijdelijk een twee-geulen systeem zoals dat ook in de periode 1985-1990 te zien was.



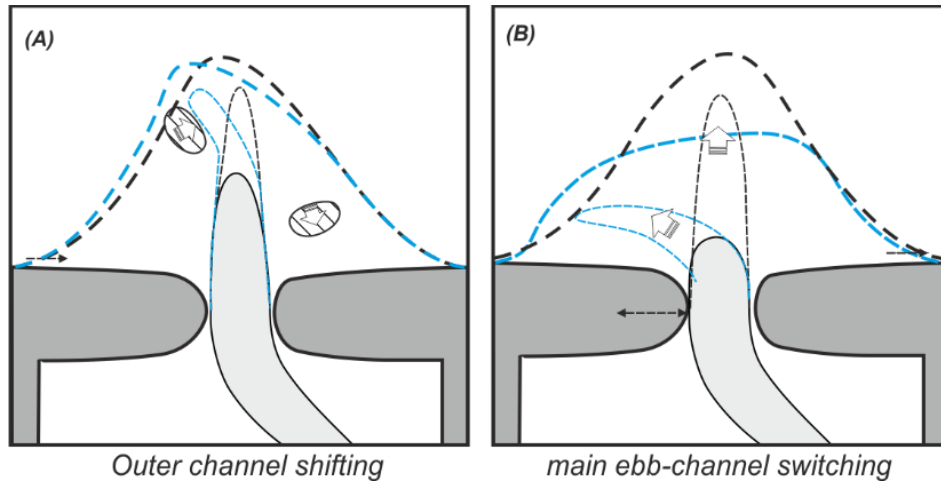
Figuur 6.17 - Ontwikkeling van de buitendelta van het Zeegat van Ameland over de periode 2005-2019

Het sediment-bypassing proces van het Zeegat van Ameland is in Figuur 6.18 conceptueel samengevat. Hierin wordt onderscheid gemaakt tussen twee processen: (a) “Outer channel shifting” en (b) “Main ebb-channel switching”. In het verleden trad outer channel shifting op, het huidige gedrag vertoont juist de kenmerken van main ebb-channel switching (zie Elias et al. 2019 voor een nadere uitleg).

Outer channel shifting; Deze vorm van sediment-bypassing wordt gekenmerkt door beperkte aanpassingen van de buitendelta. Door de aanvoer van sediment vanaf de kustlijn van Terschelling vindt er plaatgroei plaats op de westelijke zijde van de buitendelta. Deze banken migreren oostwaarts en drukken daarbij het meest zeewaartse deel van de ebgeul naar het oosten. Met oostwaartse verplaatsing wordt deze geul steeds minder efficiënt en op een gegeven moment vormt er een nieuwe uitstroming aan de westelijke (bovenstroomse) zijde van de bank, waarna het proces herstart. Met iedere cyclus wordt er een volumesediment aan het Bornrif toegevoegd. Sediment accumuleert op het Bornrif en wordt door golven landwaarts verplaatst.

Main ebb-channel switching; Deze tweede variant beschrijft het huidige gedrag. Eigenlijk zijn de processen gelijk aan voorgaande variant, alleen treedt er nu grootschalige verplaatsing van de gehele ebgeul op. De bijbehorende tijdschaal is daarmee ook veel langer (decennia) dan de tijdschaal van outer channel shifting (jaren tot decennium). Doordat de gehele eb-geul verplaatst, verandert ook het gehele platform van vorm. Hierdoor kunnen ook de eilandstaart en -kop van gedrag veranderen. Zo is de erosie van de Boschplaat waarschijnlijk mede een gevolg van het verdiepen van het westelijke deel van de buitendelta. In Figuur 6.17 is de cyclus van main ebb-channel switching te volgen. Deze cyclus wordt geïnitieerd door de vorming van ebschaar en ebschild systemen. De ebschaar zorgt voor een grote aanvoer van sediment waardoor de banken

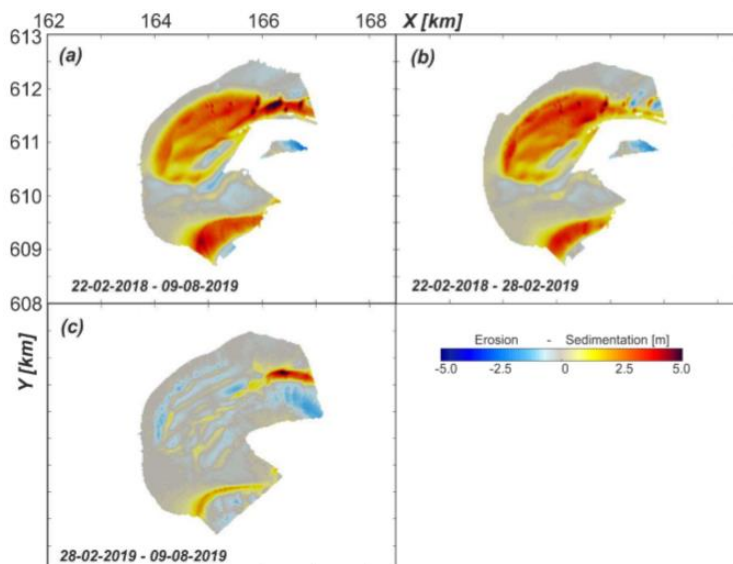
snel kunnen groeien. Zodra deze banken ver zeewaarts zijn verplaatst nemen de golfgedreven processen het over, waardoor de hoofdgeul dichtgedrukt wordt.



Figuur 6.18 - Conceptuele beschrijving van 2 sediment-bypassing modellen voor Ameland (a) “outer channel shifting” en (b) “main ebb channel switching”. Uit Deltares (2020).

6.4.3 De ontwikkeling van de buitendeltasuppletie

De buitendeltasuppletie ([16] in Figuur 6.16) werd van maart 2018 tot februari 2019 geplaatst op de Kofmansbult. In Elias et al. (2020) is een eerste analyse van de morfologische ontwikkeling van de buitendeltasuppletie uitgevoerd voor de bodemmetingen tot en met augustus 2019. De suppletie veranderde het morfodynamische gedrag van de Kofmansbult niet zichtbaar. De zeewaartse verplaatsing van de ebschaar-/ebschildsystemen (zie paragraaf 6.4.2) bleef doorgaan. Erosie van de buitendeltasuppletie zelf is wel waargenomen (Figuur 6.19), met name onder wintercondities ten gevolge van hogere golven. Het overgrote deel van de suppletie is nog aanwezig op de locatie van suppleren (augustus 2019). Elias et al. (2020) stelt dat vervorming van de suppletie door wintercondities mogelijk slechts een initieel effect kan zijn, en dat dit gedrag niet noodzakelijkerwijs zich zal herhalen. Voortzetting van frequente metingen en de daaropvolgende geïntegreerde analyse zullen uitwijzen wat de mogelijke effecten van de buitendeltasuppletie op het kuststelsel zijn.



Figuur 6.19 – overzicht van de geobserveerde sedimentatie-erosie patronen van de buitendeltasuppletie over (a) de totale periode: 22-02-2018 tot 09-08-2019, (b) tijdens de uitvoering: 22-02-2018 tot 25-02-2019 en (c) na uitvoering: 28-02-2019 tot 09-08-2019. Uit: Elias et al., (2020)

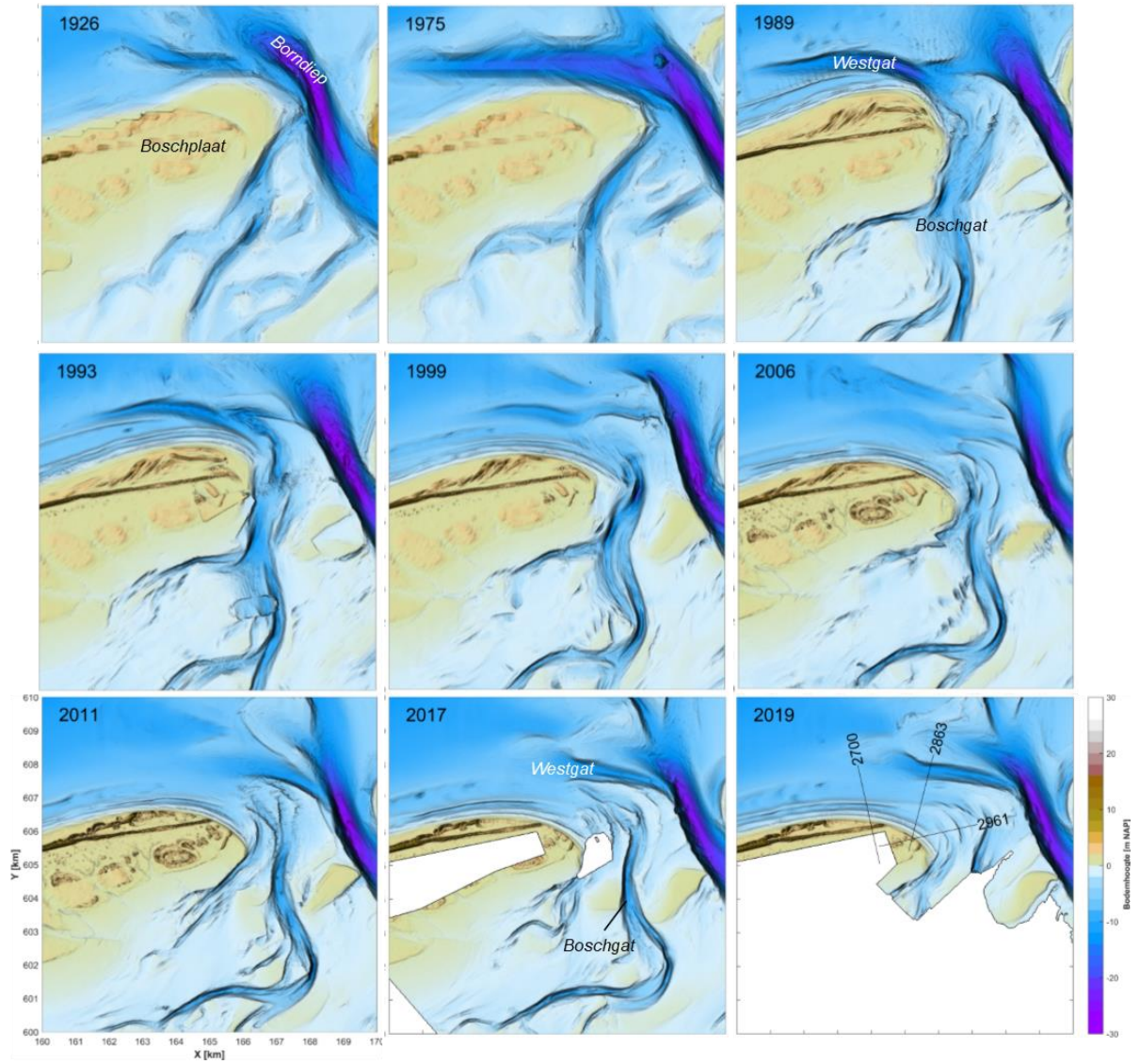
6.4.4 Morfologische ontwikkeling bij de Boschplaat

De Boschplaat beslaat de eilandstaart van Terschelling, en heeft zich in de periode van 1940 tot 1974 uitgebouwd en is zich sinds 1975 aan het terugtrekken (Elias et al., 2019). De ontwikkeling van de bodem van de Boschplaat is weergegeven in Figuur 6.20 en Figuur 6.21. De uitbouw van de Boschplaat is gedeeltelijk gerelateerd aan de constructie van een stuifdijk (tussen 1932 en 1936). Rond 1974 had de Boschplaat een lange smalle spit gevormd.

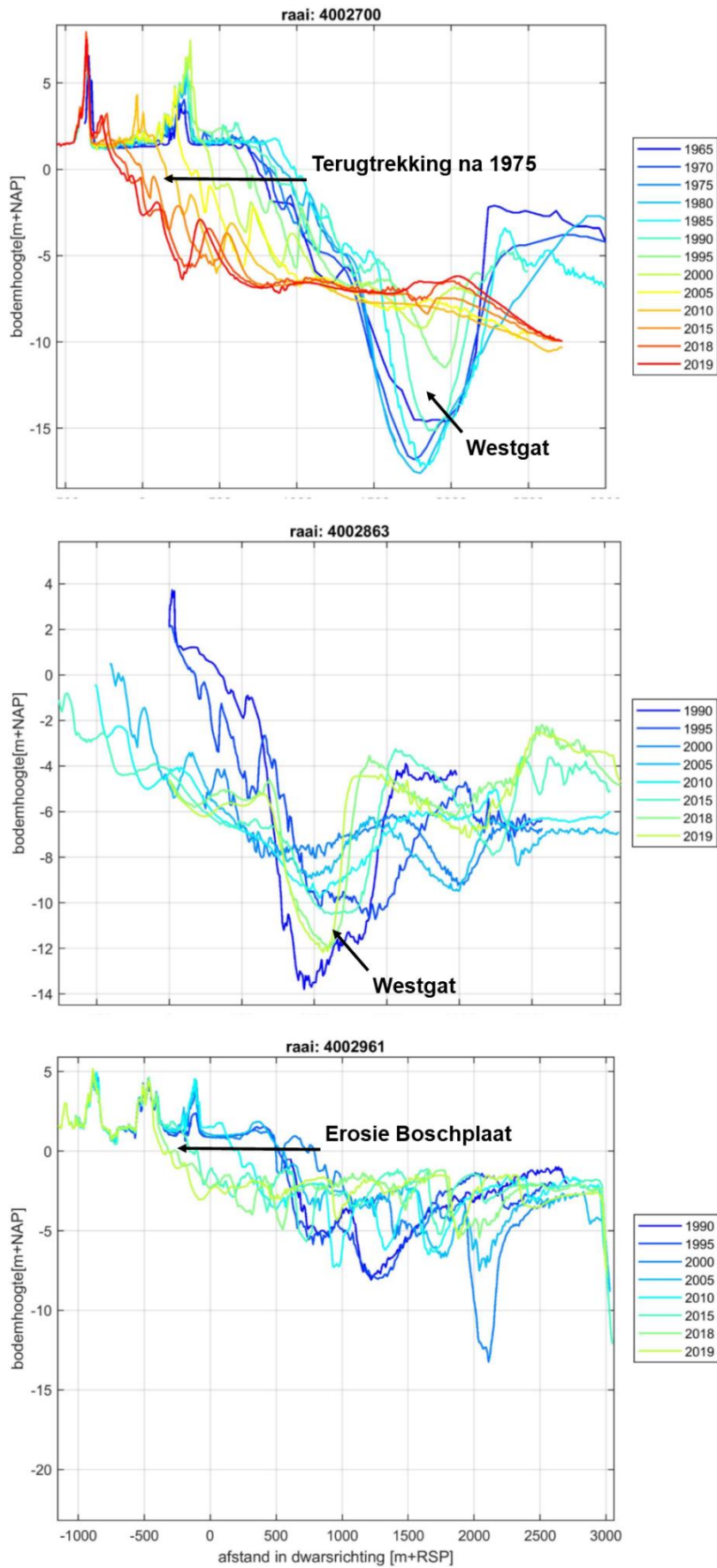
In de periode 1989-1999 zorgde de vorming van een doorgaande geul Boschgat-Westgat voor een versterkte terugtrekking. Vanaf 1999 is de doorgaande geul niet meer te zien, maar is er een ondiep platform (~5m diep) waarin enkele kleine dynamische geultjes zich hadden ontwikkeld. Sinds 1999 wordt de voortgaande terugtrekking van de Boschplaat waarschijnlijk veroorzaakt door de veranderingen op de buitendelta. Het Westgat werd minder belangrijk en de ebschilden namen af in grootte en diepte (1999-2005), en het gebied tussen Kofmansbult en Boschplaat werd dieper (2005-2016). Hierdoor kunnen golven ver het zeegat binnendringen, waardoor een sterk golfgedreven, netto oostelijk gericht transport optreedt richting het Borndiep. De structureel grotere afvoer dan aanvoer van sediment geeft een doorgaande erosie van de Boschplaat.

Een westelijke ligging van de hoofd-ebgeul zorgt ervoor dat sediment niet richting het centrale deel en de noordelijke rand van de buitendelta getransporteerd wordt, maar juist naar de westzijde van de buitendelta. Hier kan dan plaatgroei en bankopbouw plaatsvinden. Golfbreking op deze banken zorgt voor een verminderde golfaanval langs de Boschplaat en in de keel van het zeegat. Met voldoende golfreductie zou er dan weer een uitgroei van de spit kunnen plaatsvinden. Of plaatgroei gaat plaatsvinden is verre van zeker. Door een grotere ebdominantie net ten noorden van het Westgat, komt de vloedstroming door het Westgat in de verdrukking. Een hernieuwde verbinding met het Boschgat, zoals dat ook in het verleden wel is opgetreden, is op zich een logische ontwikkeling (Deltares 2020).

Voor het analyseren van de terugtrekking van de Boschplaat kan ook de LIDAR metingen gebruikt worden. De LIDAR data is sinds 1997 beschikbaar en geeft in hoge resolutie (5x5m) een volledig ruimtelijk dekkend beeld van het droogvallende strand en de duinen. De hoge resolutie maakt het mogelijk om nauwkeurige volume- en oppervlakteberekeningen uit te voeren. De analyse van de ontwikkeling van de Boschplaat met behulp van deze LIDAR data zal in het najaar van 2020 uitgevoerd worden binnen het KPP Beheer en Onderhoud Kust programma.



Figur 6.20 - Bodem Boschplaat voor de periode 1926-2019.



Figuur 6.21 - Ontwikkeling van geselecteerde Jarkus profielen (2600, 2863 en 2961, voor ligging zie Figuur 6.20) over de periode 1991 (rode lijn) – 2019 (groene of rode lijn).

6.5 Duinen

Deze sectie vat de resultaten van de uitgevoerde onderzoeken in het kader van “Natuurlijk Veilig” van KPP BenO Kust programma samen voor Terschelling. Natuurlijk Veilig beoogt antwoorden te geven op vragen over de ruimtelijke planning en uitvoering van suppleties in relatie tot biodiversiteit, zowel van het natte deel van de kust als strand en duinlandschappen op Nederlandse schaal (zie ook www.natuurlijkveilig.nl).

6.5.1 Beheer en ontwikkeling duinen voor 1990

Tot 1990 werd in Nederland de kustlijn vooral gehandhaafd door de duinen te gebruiken als een buffer. Deze werden intensief beplant om zoveel mogelijk inwaaierend zand vast te leggen. Het zo ingevangen zand kon aan de Noordzee-zijde afslaan tijdens zware stormen en uitgesmeerd worden over de kust (De Groen et al., 2019). Zo kon de kustlijn enigszins gehandhaafd worden, maar op een aantal plaatsen overheerste kustafslag en moest de duinenrij geregeld landinwaarts worden verschoven. Op Terschelling gebeurde dit verschuiven tussen km paal 15 en 20. Vanaf ongeveer 1960 werd de vegetatie aan de zeezijde van de duinen machinaal weggehaald, zodat de zeereep door de wind naar achter kon rollen (gecontroleerd geretireerd; Arens et al., 2007; Figuur 6.22).



Figuur 6.22 - Kust Terschelling bij het Hoornderbos op 10-7-1987: aan de topzijde is duidelijk de landwaartse positie van de zeereep zichtbaar (Bron: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat).

Het intensieve beheer door de waterschappen en Rijkswaterstaat leidde tot vrij statische zee-reepduinen die al het zand invingen. Daardoor ontvingen de achterliggende duinen weinig tot geen instuivend zand meer vanaf de kust. In combinatie met een verhoogde stikstofdepositie, lagere grondwaterstanden en verminderde begrazing trad voor de natuurgebieden een versnelde plantensuccessie (vergrassing en verstruweling) op, waarbij zeldzame soorten die horen bij een dynamisch duingebied sterk achteruitgingen (Löffler et al., 2008; Figuur 6.23).



Figuur 6.23 - Vergrassing van Rita's Duin op een doorlopende landschapsfoto links 1966 en rechts 1990 <https://duinenenmensen.nl/een-halve-eeuw-ritas-duin-bij-oosterend/> (met toestemming van de fotografe Rita Ketner-Oostra).

6.5.2 Beheer en ontwikkeling duinen na 1990

Sinds 1990 wordt de kustlijn van Nederland gehandhaafd via suppleties. Uit waarnemingen blijkt dat de zeereepdynamiek daarbij toeneemt, als er ook dynamisch beheer wordt uitgevoerd (De Groen et al., 2019).

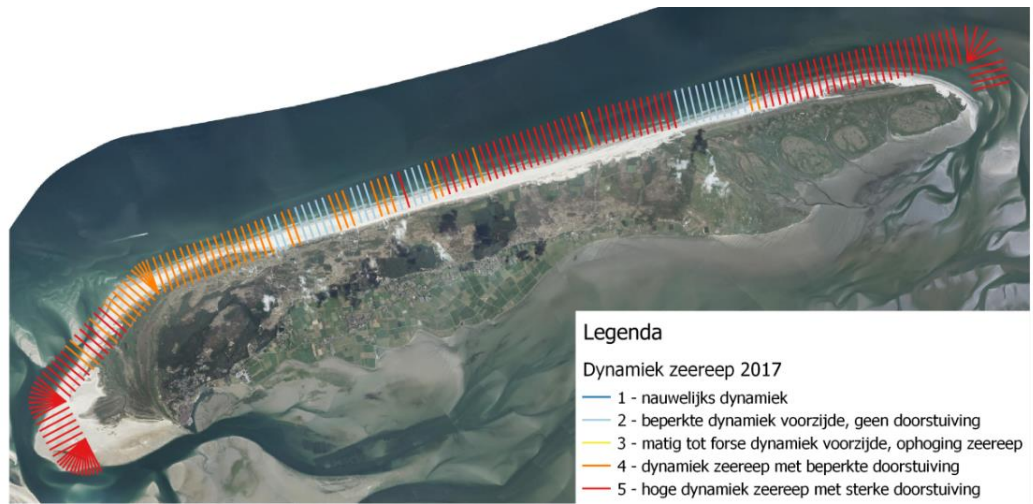
Ook voor Terschelling is in de periode 2008-2017 een vrij beperkte verschuiving naar meer dynamisch beheer evenals naar een grotere zeereepdynamiek opgetreden (IJff et al., 2019b). Al vanaf 1988 is de gemiddelde dynamiek van de zeereep op Terschelling het hoogste van alle Nederlandse kustvakken (Figuur 6.21), waardoor een verdere toename moeilijk is. De dynamiek is over de periode 2008-2017 vooral toegenomen op de Boschplaat waar de zeereepduinen geërodeerd worden en in delen bij het Hoornsederbos noordelijk van Hoorn (Figuur 6.25; IJff et al., 2019b). Opvallend is dat de duinen tussen km paal 15 en 20, noordelijk van Oosterend geen verandering of zelfs een lichte afname in dynamiek laten zien. Daar werd in 1995 al besloten om de zeereep los te laten en te kerven. Na een onstuimige ontwikkeling kent het gebied een zeer hoge dynamiek welke nauwelijks verder toe kan nemen.

In de periode 1965-2016 blijkt het duinvolume met ca 70% is toegenomen (berekend t.o.v. 1990-volume = 100%). Gekeken over de periode 2008-2017 blijkt dat sedimentatie in de duinen overweegt met uitzondering van NW Terschelling en de sterk afslijpende Boschplaat (Figuur 6.26).

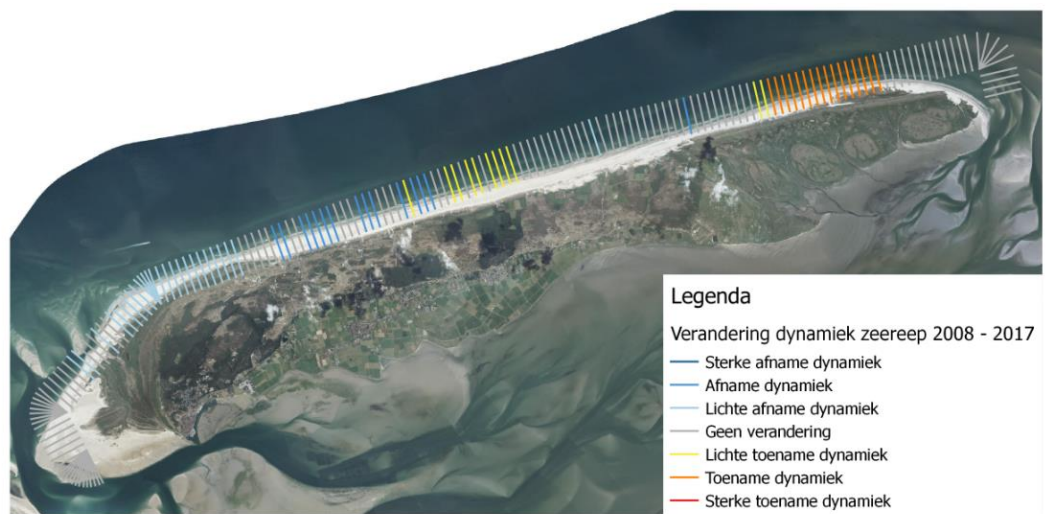
Op de Noordsvaarder vindt afslag van de zeereep plaats (IJff et al., 2019). Aan het begin van de vorige eeuw was er sprake van een grote toevoer van stuifzand uit het westen vanaf de Noordsvaarder die de in cultuur gebrachte oudere duinen bedreigde. Om dit zand af te vangen zijn in de twintiger jaren tussen km. 3 en 6 de Kroonpolders (Figuur 6.27) aangelegd waarbij een aantal grote stukken strand afgesloten werden van de zee. In de periode 1948 - 1951 zijn de zogeheten zuidelijke en westelijke (eigenlijk: de noordelijke) stuifdijk aangelegd op de westzijde van de Noordsvaarder. Deze waren oorspronkelijk met elkaar en met de oudere stuifdijken op de Noordsvaarder verbonden. Deze duinen zijn deels aangelegd als kogelvanger voor militair gebruik. Tijdens de stormvloed van 1953 werden flinke delen van de stuifdijken afgebroken en niet meer hersteld. In deze zeereep zijn, na het staken van het onderhoud aan de stuifdijken, onder invloed van de erosie spontaan diepe kerven ontstaan (o.a. ter hoogte van raai 650), welke bijdragen aan de overstuiving van vegetatie achter de zeereep (IJff et al., 2019). Op de NW zijde van Terschelling zijn de duinen recent gedynamiseerd in het kader van de Programmatische Aanpak Stikstof-maatregelen. Het betreft twee projecten (Figuur 6.27): In 2018 is het zuidwestelijk deel van de direct aan de reddingsbootschuur grenzende vallei geplagd en zijn -zeer succesvol- maatregelen genomen om de verstuiving te bevorderen in 2018. Het doel was om de oorspronkelijk zeer diverse vegetaties te herstellen. Hervestiging vond plaats van een aantal soorten van kalkrijke duinvalleien, o.a. parnassia (Figuur 6.28; IJff et al., 2019a). Het tweede project vond plaats in 2019. Toen werd tussen raai 300 en 700 door Staatsbosbeheer 30 ha oude, begroeid geraakte, stuifkuilen opnieuw in verstuiving gebracht. Het gaat vooral om kleine plekken van tien tot honderd vierkante meter meer landinwaarts, maar tussen paal 3 en paal 7 zijn ook enkele grote verstuivingen in de zeereepduinen gerealiseerd.

Tussen paal 15 en 20 vindt er actief doorstuivings-beheer plaats. Er zijn in de periode van 1995 tot 2003 enkele kerven gegraven en stuifschermen schuin over de zeereep geplaatst, om de wind en verstuiving over de zeereep te geleiden. Tot 2003 werd vegetatie van de voorzijde afgeschoven om doorstuiven te bevorderen. De maatregelen hebben tot een geweldige dynamiek in het gebied geleid, en tot een drastische verandering van zeereepreliëf en landschap (Arens et al., 2007).

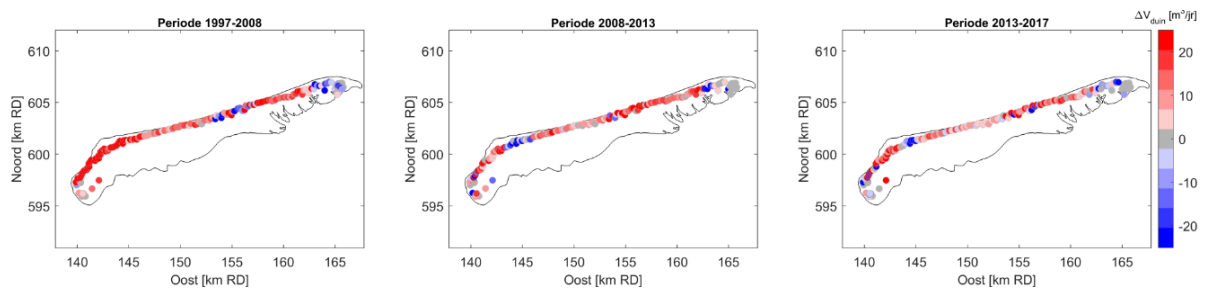
In 2019 is Staatsbosbeheer ook gestart met het aanleggen van kerven in de zeereep rondom paal 13 (Figuur 6.27) en met aanvullende verstuivingsmaatregelen in het achterliggende gebied, tevens in het kader van de PAS-problematiek.



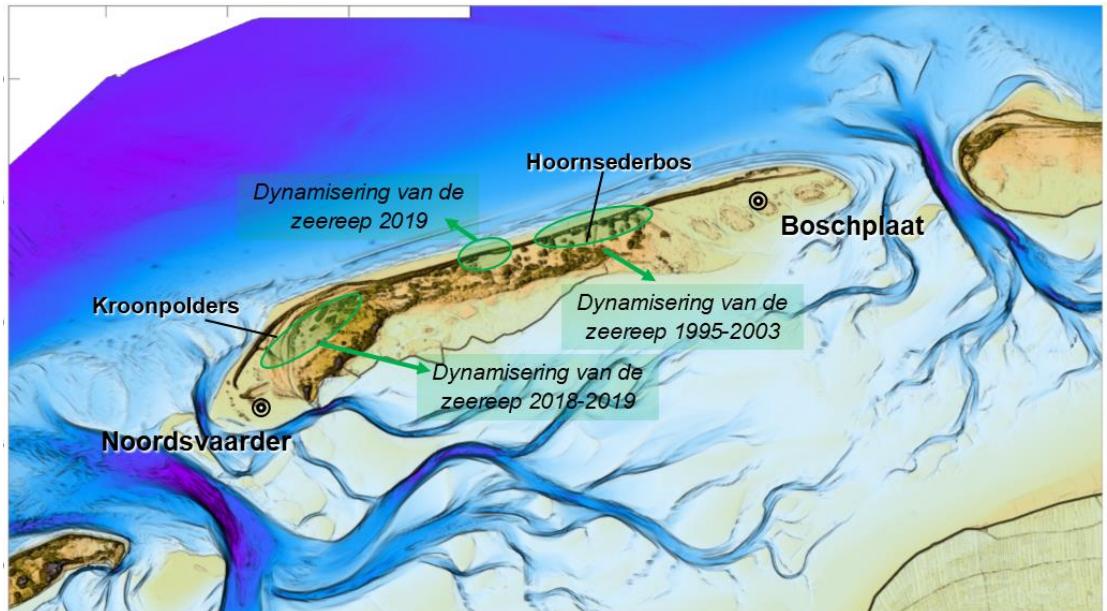
Figuur 6.24 - Dynamiek zeereep 2017 (IJff et al., 2019b).



Figuur 6.25 - Verandering dynamiek zeereep tussen 2008 en 2017 (IJff et al., 2019b).



Figuur 6.26 - Verandering duinvolume in m^3 /jaar voor diverse perioden (IJff et al., 2019b).



Figuur 6.27 – overzicht locatie dynamiseringswerkzaamheden



Figuur 6.28 - Stuifkuilen, aangelegd als PAS-maatregel in de Kroonpolders (foto Stéphanie IJff).

7 Kustlijnontwikkeling

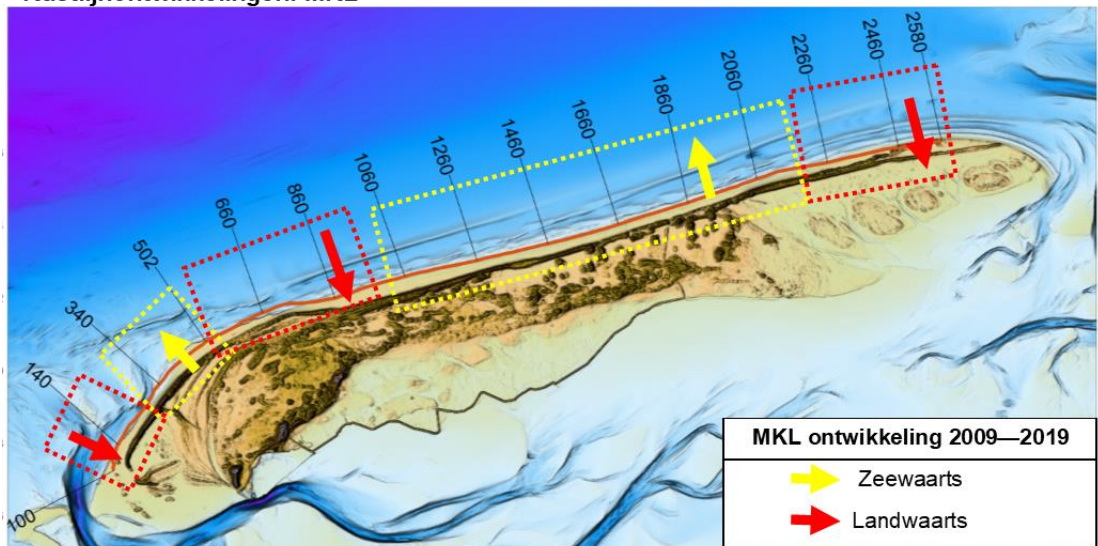
7.1 Samenvatting

De morfologische ontwikkelingen bij de kust van Terschelling bepalen grotendeels de ontwikkeling in de MKL (Figuur 7.1). De kop van het eiland in het westen is een dynamisch gebied waar zowel een negatieve trend in de MKL is te zien door het opdringen van de geul Boomkensdiep, als een positieve trend in de MKL positie door het aanlanden van de buitendelta banken. Langs de centrale eilandkust is in 1993 eenmalig een suppletie uitgevoerd op de vooroever, welke bijdroeg aan een al aanwezige positieve trend in de MKL. Bij de staart van het eiland is er een structurele negatieve trend in de MKL positie door de erosie van de Boschplaat.

Morfologische ontwikkelingen bij de kust



Kustlijnontwikkelingen: MKL



Figuur 7.1 – Samenvatting van de morfologische ontwikkelingen bij de kust (uit Hoofdstuk 6) en de ontwikkelingen in kustlijnontwikkeling zoals gepresenteerd in paragraaf 7.3.1. De MKL ontwikkeling in het onderste paneel volgt uit Figuren 7.2 en 7.3.

7.2 Zandsuppleties

Beheermaatregelen langs de kust van Terschelling zijn beperkt. Er zijn slechts twee suppleties uitgevoerd, beiden met (mede) een onderzoeksdoelstelling. De pilotsuppletie op het midden van het eiland van 1993 is besproken in paragraaf 6.3.2. De eerste resultaten van een analyse van de pilotsuppletie op de buitendelta van het Amelanders Zeegat zijn te vinden in paragraaf 6.4.3.

Naar aanleiding van de (structurele) lokale overschrijding van de BKL tussen raaien 620-760 bij de Noordsvaarder is er een regionaal advies uitgevoerd binnen KPP B&O Kust (IJff et al., 2019). Hierbij is natuurlijke ontwikkeling van de morfologie en ecologie beschreven als mede het effect van een mogelijke suppletie hierop. Een strand- of vooroeversuppletie zou hier tijdelijk voor een compensatie van de BKL overschrijding zorgen, en na de suppletie zal de erosieve trend zich voortzetten. Rondom raai 700 zijn er spontaan kerven gevormd. De erosie in dit gebied heeft meerwaarde voor de natuurlijke ontwikkeling. Zolang de veiligheid niet in het geding is, wordt, in IJff et al., (2019), aanbevolen om dit in de toekomst zo te laten.

Een landelijk overzicht van uitgevoerde zandsuppleties is te vinden op de Kustviewer (<https://www.openearth.nl/coastviewer-static/>).

Tabel 7.1 – Overzicht zandsuppleties bij het kustvak van Terschelling

Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ) [1000 m ³]	Volume [m ³ /m]
Terschelling-midden	1-apr-93	1370	1810	onderwatersuppletie	2100	455
Buitendelta Zeegat van Ameland	2018	-	-	Pilot buitendelta suppletie	5500	-

7.3 Ontwikkeling kustindicatoren

In deze paragraaf wordt de ontwikkeling van de kustzone bij Terschelling beschreven met behulp van kustindicatoren. De trends en veranderingen in deze kustindicatoren over de tijd kunnen aan de hand van de morfologische ontwikkelingen uit Hoofdstuk 6 worden verklaard. Kustindicatoren die hier worden uitgelicht zijn de Momentane KustLijn (MKL), duinvoet, strandbreedte en faalkans van de eerste duinenrij. Een overzicht van de historische en ook de meest recente informatie over de kustindicatoren zijn te vinden op de Kustviewer (<https://www.openearth.nl/coastviewer-static/>). Daarnaast is de meest recente informatie over de huidige en de verwachte kustlijnligging ten opzichte van de BKL te vinden in de (jaarlijks opgestelde) kustlijnkaartenboek van Rijkswaterstaat (www.rijkswaterstaat.nl/kustonderhoud/).

7.3.1 Ontwikkeling van MKL – BKL

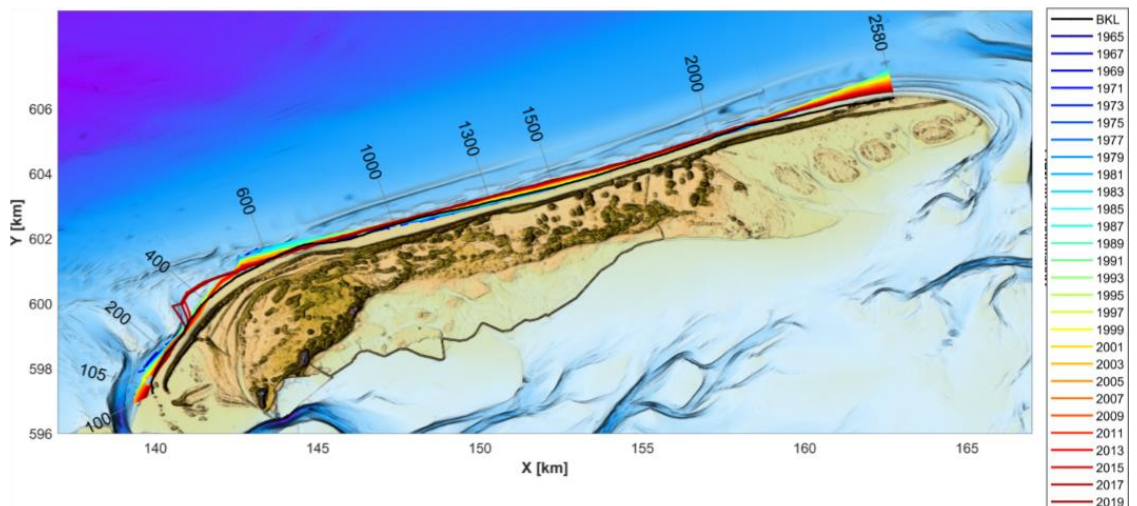
De MKL-positie (voor definitie, zie Figuur 3.2) geeft de jaarlijkse kustlijnligging weer, en geeft een eventuele overschrijding van de BKL aan. In Figuur 7.2 wordt de ontwikkeling van de MKL tussen 1965 en 2019 weergegeven langs de kust van Terschelling. In Figuur 7.3 wordt hetzelfde MKL ontwikkeling weergegeven, alleen met de raai-nummers op de x-as zodat de onderlinge verschillen tussen de jaren duidelijker zijn. Voor de eilandstaart is geen BKL gedefinieerd, omdat hier geen kustlijnhandhaving plaatsvindt. De MKL ontwikkelingen laten dus niet het gedrag van de gehele Boschplaat zien, maar alleen tot aan raai 2580.

Op Terschelling ligt de MKL van 2019 bijna overal zeewaarts van de BKL, alleen bij de kop van het eiland, gelegen tussen raaien 100 – 800, zijn er raaien waar dit niet zo is. Dit gebied wordt sterk beïnvloed door de buitendelta, het opdringen van de geul Boomkensdiep zorgt voor lokale erosie (paragraaf 6.2.3), zie raaien 100 - 280 in Figuur 7.2 en Figuur 7.3. In raaien 300 - 440 is er sprake van een sterke zeewaartse trend in de laatste jaren, door aanlanding van de buitendelta banken (Noordergronden).

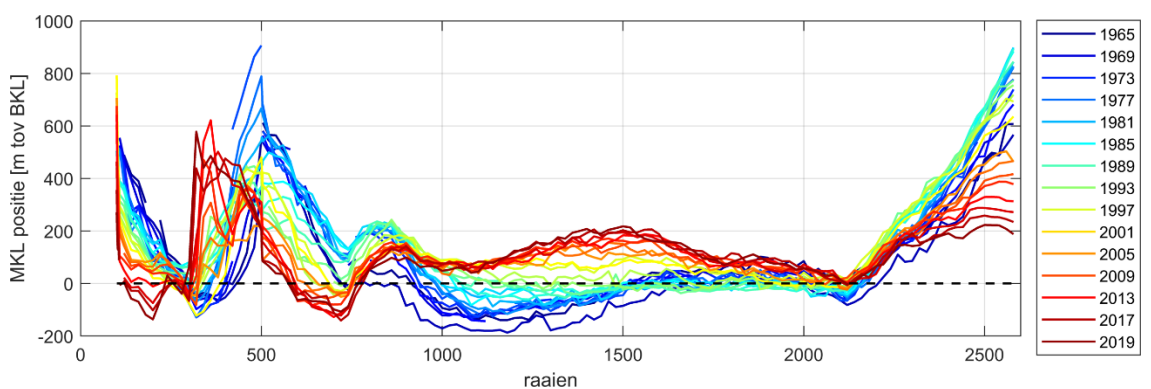
Raai 500 tot 980 vertonen over het algemeen een sterke continuerende terugtrekking van de MKL posities, waarbij de MKL landwaarts van de BKL ligt voor raaien 640 en 760. Sinds 1985 is de MKL bijna 400m landwaarts verplaatst, waarschijnlijk door het aanlanden van buitendelta banken rond 1970 (zie de piek in Figuur 7.3). Met aanlanden wordt de kustlijn (in relatief korte tijd sterk zeewaarts verplaatst, waarna een langdurige periode van erosie door het 'uitsmeren' van de aangelande bank volgt (paragraaf 6.2.4).

Langs de centrale eilandkust van Terschelling ligt de kustlijn ruim zeewaarts van de BKL en tussen de raaien 1060 en 2100 vertoont de kustlijn een zeewaarts gerichte trend. Sedimentaandoer vanaf de buitendelta en de verspreiding langs de kust zorgt hier voor een overvloed aan sediment. Rondom raai 1500 lijkt de zeewaartse verplaatsing wel versterkt te zijn door de uitgevoerde suppletie. Stein (2005) concludeert dat de effectiviteit van de vooroever-suppletie in 1993 (raaien 1370 en 1810) vooral groot is geweest in de westelijke helft van de suppletie en in mindere mate in de oostelijke helft. Waarschijnlijk speelt hier ook de al gaande morfologische ontwikkeling een rol. De kust bouwt namelijk oostwaarts uit, deze uitbouw heeft een zandgolf-achtige voortplanting langs de kust en is hier juist op het tijdstip van de suppletie in deze profielen aangekomen.

Bij de staart van het eiland (ten noorden van de Boschplaat) is er een landwaarts gericht trend in de MKL, maar nog zonder BKL overschijding. Dit wordt veroorzaakt door de erosie van de Boschplaat, zie paragraaf 6.4.3.



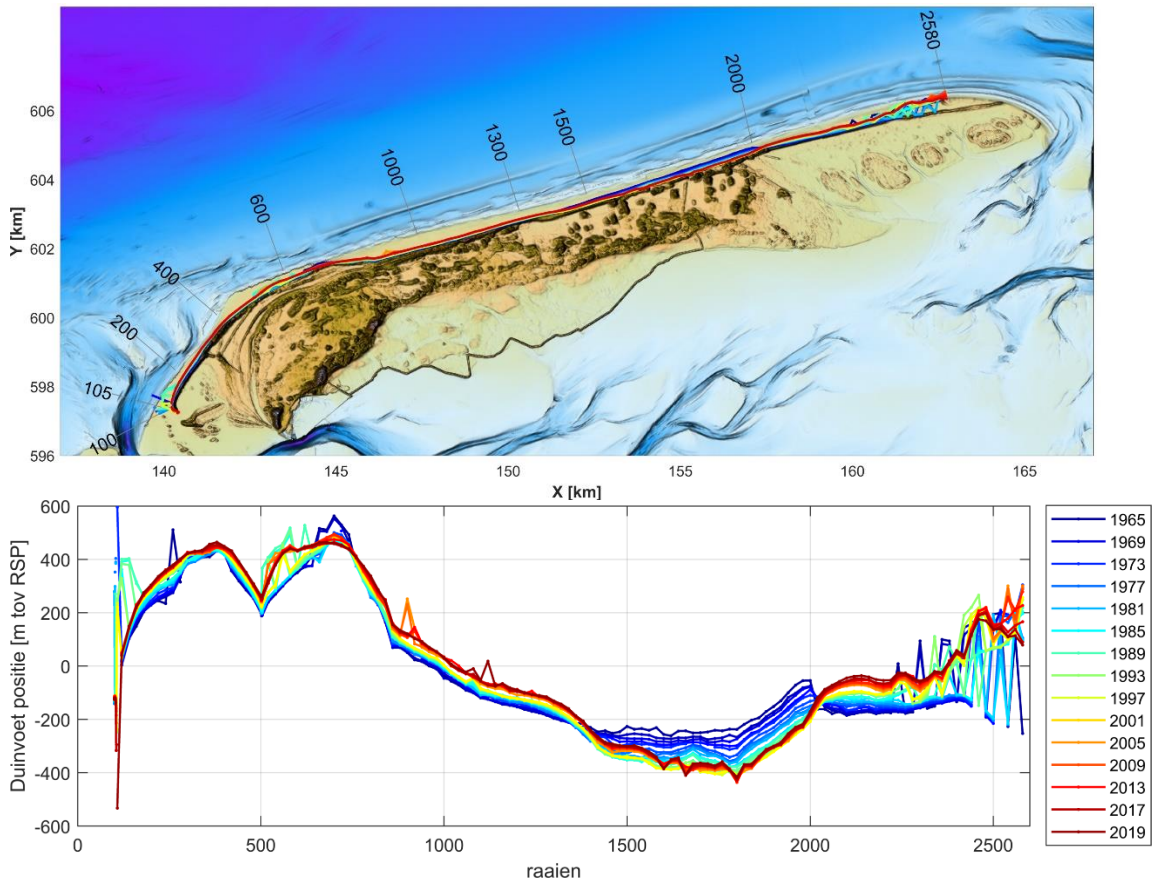
Figuur 7.2 – Ontwikkeling MKL voor de periode 1965 – 2019 langs de kust van Terschelling. De BKL is weergegeven met de zwarte lijn.



Figuur 7.3 - Ontwikkeling MKL voor de periode 1965 – 2019 voor alle raaien bij de kust van Terschelling. De BKL is weergegeven met de zwarte stippellijn

7.3.2 Ontwikkeling van de 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 (i.e. knikpunt in het profiel). In Figuur 7.4 wordt de ontwikkeling van de DV tussen 1965 en 2019 weergegeven langs de kust van Terschelling. De positie van de duinvoet lijkt langs de hele kust van Terschelling redelijk constant sinds ~2001. Hiervoor was er vooral tussen raaien 1500 en 2000 een landwaarts gerichte trend in de duinvoet positie te zien. De duinvoet positie bij de Boschplaat laat tussen 1965 en 1980 sterke variaties zien, dit komt doordat de duinen in de JARKUS profielen voor deze jaren niet volledig zijn ingemeten, en de duinvoet positie varieert tussen de stuifdijk en de duin dat zich vormt voor de stuifdijk (zie Figuur 6.20).



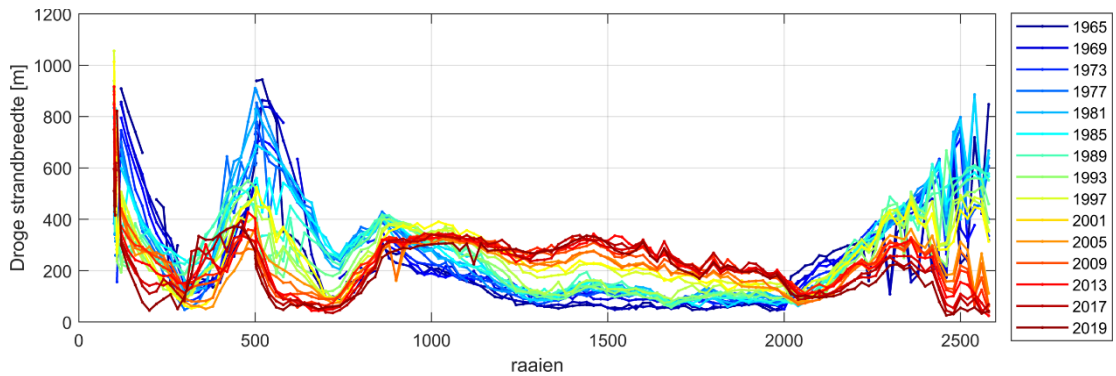
Figuur 7.4 - Ontwikkeling duinvoet voor de periode 1965 – 2019 voor alle raaien bij de kust van Terschelling.

7.3.3 Ontwikkeling van strandbreedte

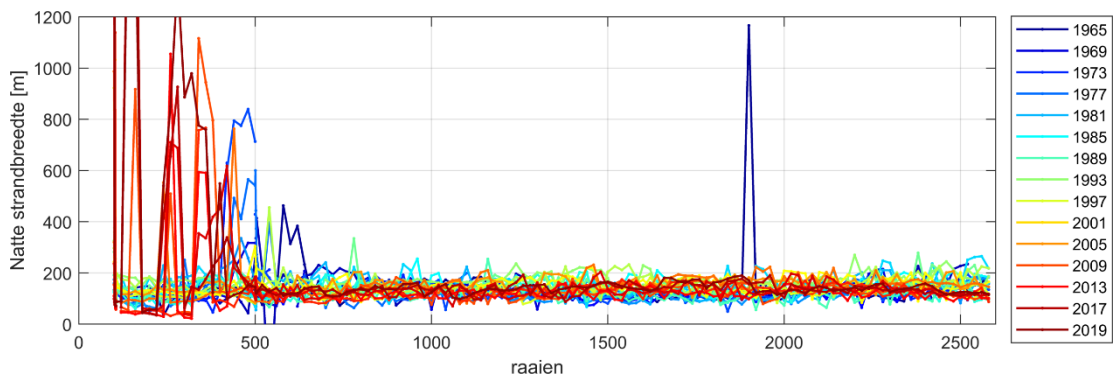
De strandbreedte is geen indicator in het beleid van Rijkswaterstaat, maar wel van belang voor bijvoorbeeld recreatie. Er wordt onderscheid gemaakt tussen het natte strand en het droge strand. De natte strandbreedte is de horizontale afstand tussen het snijpunt van het strandprofiel met de gemiddeld 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 A.3 voor de berekenmethode). In Figuur 7.5 en Figuur 7.6 wordt de ontwikkeling van het droge en natte strandbreedte tussen 1965 en 2019 weergegeven langs de kust van Terschelling.

Tussen raaien 100 – 280 is een algemene afname van de droge strandbreedte te zien door het opdringen van de geul Boomkensdiep. In raaien 300 – 500 is een sterke schommeling van de strandbreedte zien, wat wordt veroorzaakt door het aanlanden van de buitendelta banken. Verder volgen de trends in strandbreedte redelijk de MKL trends. Rond 1997 is een sprong in de

strandbreedte te zien, waarschijnlijk veroorzaakt door de vooroeversuppletie in 1993. Hierna blijft de strandbreedte toenemen, maar lijkt te stabiliseren in de laatste jaren.



Figuur 7.5 - Ontwikkeling droge strandbreedte voor de periode 1965 – 2019 voor alle raaien bij de kust van Terschelling.



Figuur 7.6 - Ontwikkeling natte strandbreedte voor de periode 1965 – 2019 voor alle raaien bij de kust van Terschelling.

7.3.4 Faalkans van de eerste duinenrij / zeereep

De officiële wettelijke toetsing (paragraaf 5.4) 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 is een database samengesteld met faalkansen van alle JARKUS raaien langs de Nederlandse duinenkust, voor de jaren 1965-2010 (HKV, 2011). Op basis van deze database zijn analyses uitgevoerd van de effecten van veranderingen in suppletiebeleid door de jaren heen op de faalkans van de duinen (HKV, 2012). In 2017 is deze database geactualiseerd voor de periode tot en met 2017 (HKV, 2017).

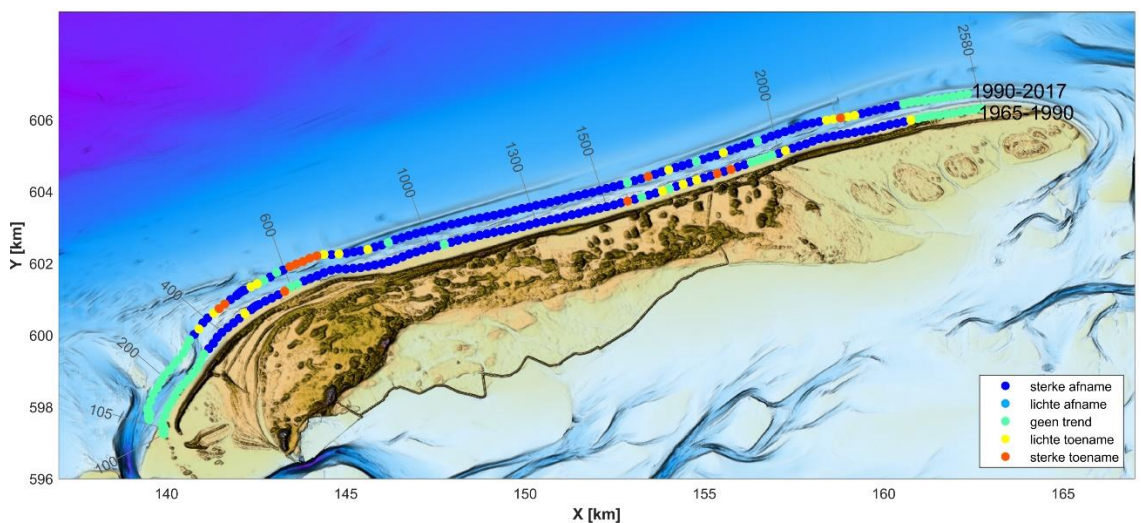
De berekende faalkansen hebben in absolute zin geen betekenis voor de officiële faalkans van de duinwaterkering. Het ontwikkelde probabilistische duinafslagmodel heeft daarnaast geen officiële status binnen het Wettelijk Beoordelingsinstrumentarium (WBI).

Trends in de ontwikkeling van de faalkansen zijn bepaald voor twee perioden: 1965-1990 en 1990-2017. Figuur 7.7 toont de trend in de faalkans van de eerste duinenrij van Terschelling 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 faalkans 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 faalkans 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 faalkans 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 faalkans met een factor 10 minder dan 10 jaar heeft geduurd (oranje).

Voor Terschelling zien we voornamelijk een sterke afname in de faalkans langs de centrale eilandkust, voor beide periodes. Omdat er slechts één vooroeversuppletie heeft plaatsgevonden bij Terschelling is het effect van suppleties op de ontwikkeling van de veiligheid niet te beoordelen. De faalkans veranderen door de tijd en worden beïnvloed door structurele erosie of sedimentatie, door variaties in het optreden van stormen en door het cumulatieve effect van diverse zandsuppleties. Bijvoorbeeld, de oranje zone ten oosten van raai 600 in Figuur 7.7 wordt veroorzaakt door de aanlanding van banken afkomstig van de buitendelta. In de jaarlijkse faalkans is een duidelijke schommeling in de faalkans te zien (hier niet weergegeven), waardoor een algemene trend over de periode 1990-2017 sterk wordt beïnvloed door het net wel/niet aanlanden van een bank.



Figuur 7.7 - Trend in de faalkans van de eerste duinenrij van Terschelling voor de periodes 1965-1990 (onder) en 1990-2017 (boven).

Referenties

- Arens S.M., Löffler M.A.M. en Nuijen E.M. (2007) Evaluatie dynamisch kustbeheer Friese Waddeneilanden. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Noord-Nederland. Arens BSDO RAP2006.04
- Baart, F. et al., 2018. Zeespiegemonitor 2018 - De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust, Deltares report 11202193-000-ZKS-0004.
- Beheerplan Rijkswaterstaat Terschelling 2003 – 2013. Staatsbosbeheer Regio Noord en Rijkswaterstaat Directie Noord-Nederland, oktober 2004. 110202/NA4/2B2/000615/001
- Bruens, A. et al., 2012. Achtergrondrapport Basiskustlijn 2012 – feiten & cijfers ter onderbouwing van de herziening van de Basiskustlijn
- Cheung, K. F., F. Gerritsen, en J. Cleveringa, 2007, Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, The Netherlands., *Journal of Coastal Research* 23(1): 106-118.
- De Groen, F., V. van Zelst, L. van der Valk & B. Arens (2019). Natuurlijk Veilig door Kust- en Zeereep-beheer Deltares rapport 11203683-002-ZKS-0014.
- Deltares (2020): Technisch advies rol en mogelijkheden van buitendelta's voor het kustbeheer; ten behoeve van het beleidsadvies voor Kustgenese 2.0, auteurs Edwin Elias, Ad van der Spek, Zheng Bing Wang en Stuart Pearson; Deltares rapport 1220339-009-ZKS-0006, in opdracht van Rijkswaterstaat WVL, maart 2020.
- Doedens, A. & Houter, J.J., 2015. Geschiedenis van de Wadden - Canon van de Waddeneilanden.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J., Wang, Z.B. en de Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences – Geologie en Mijnbouw*, 91-3.
- Elias, E.P.L., Vergouwen, S., en Kuijper, K., 2016. Beheerbibliotheek Vlieland. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Deltares rapport 1230043-002-ZKS-0003
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment-bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology* 415.
- Elias, E.P.L., A.J.F., Pearson, Van der Spek, 2020. Understanding the morphological processes at Ameland Inlet Kustgenese 2.0 synthesis of the tidal inlet research. Deltares rapport 1220339-008-ZKS-0008
- Grunnet, M.G., Ruessink, B.G., (2005). Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment. *Coastal Engineering* 52, 119 – 137
- Held, S.L.M. den (2012), 'De hydrologische situatie binnen het beïnvloedingsgebied van de drinkwaterwinning op Terschelling. Toetsing aan de Natura 2000 doelstellingen', Vitens, Royal Haskoning, Rotterdam.
- Hijma, M.P., Kooi, H., 2018a. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens, Deltares report 11200538-008-ZKS-0001.

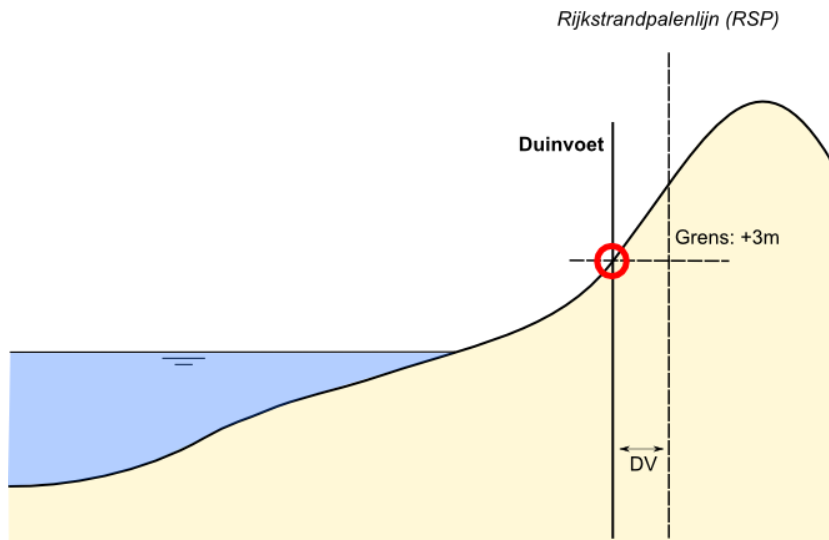
- Hijma, M.P., Kooi, H., 2018b. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2) - Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden, Deltares report 11202190-001-ZKS-0001_v1.0.
- Hijma, M.P., Van Onselen, E., 2019. Bodemdalingsmonitori 2019 - Kustfundament en de getijdenbekkens, Deltares report 11203683-002-ZKS-0017.
- 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
- Hillen, R. et al., 1991. De basiskustlijn, een technisch / morfologische uitwerking,
- Hoekstra, P., Houwman, K.T., Kroon, A., Van Vessem, P., Ruessink, B.G., 1994. The NOURTEC experiment of Terschelling: process-oriented monitoring of a shoreface nourishment (1993–1996). In: Arcilla, A., Stive, M.J.F., Kraus, N.C. (Eds.), Proc. 1st Int. Conf. on Coastal Dynamics '94. ASCE, New York, pp. 402 – 416.
- Israël, C.G., 1998, Morfologische ontwikkeling Amelander Zeegat. Werkdocument RIKZ/OS-98.147x, Rijkswaterstaat RIKZ (Den Haag).
- Israël, C.G. en D.W. Dunsbergen, 1999, Cyclic morphological development of the Ameland Inlet, proceedings of the I.A.H.R Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, Italy, p. 705-714.
- Ijff, S., Leijnse, T. en Maarse, M. (2019a). Regionaal advies Noordsvaarder, Terschelling. Morfologische ontwikkeling en ecologie van de Noordsvaarder en de effecten van een suppletie hierop. Deltares rapport 11202190-000-ZKS-0023
- Ijff, S., Smits, B., van Zelst, V., & Arens, B. (2019b). Natuurlijk Veilig - Landschapsvormende proces-sen; Invloed van suppleties en beheer op dynamiek in de zee­reep. Deltares rapport 11202190-001-ZKS-0012.
- Kok, A. 2006: Aastermiede & Wachthuisplak; veldnamen op Terschelling in duin en polder. Van Gorcum, 198 pp.
- Kooiman, M., 2015. Droge voeten: de kust als waterkering (erfgoed-essay 5). Available at: <http://duinemenmensen.nl/droge-voeten-de-kust-als-waterkering-erfgoed-essay-5/>.
- Leidraad zandige kust (2002). Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft 2002. DWW publicatienr. DWW-2003-046
- Löffler, M.A.M., Nuijen, E.M. (2007). Evaluatie Dynamisch Kustbeheer Friese Waddenei-landen. rapportnummer Arens BSDO RAP2006.04.
- Löffler, M.A.M.; Leeuw, C.C. de; Haaf, M.E. Ten; Verbeek, S.K.; Oost, A.P.; Grootjans, A.P.; Lam-merts, E.J. & Haring, R.M.K. (2008) Eilanden natuurlijk. Natuurlijke dynamiek en veerkracht op de Waddeneilanden. Het tij geleerd (samenwerkingsverband), ISBN 9789070322304.

- Meijer, J., Vriens, G. & Lammerts, E. J., 2016. Natura 2000-beheerplan Terschelling (4).
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2012. Basiskustlijn 2012. Herziening Basiskustlijn.,
- Ministerie van Infrastructuur en Milieu, 2017. Legger Waterwet Verruiming primaire waterkering Terschelling. 14 februari 2017. RWS-2016/48170
- Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 2018. Basiskustlijn 2017, Herziening van de ligging van de basiskustlijn.
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2003. Basiskustlijn 2001 - Evaluatie ligging Basiskustlijn,
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1996. Kustbalans 1995 - de tweede kustnota. Directoraat Generaal Rijkswaterstaat april 1996
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 2000. 3e Kustnota: Traditie, Trends en Toekomst. Directoraat Generaal Rijkswaterstaat december 2000
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1993. De Basiskustlijn, Norm voor Dynamisch Handhaven,
- Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1990. Kustverdediging na 1990, beleidskeuze voor de kustlijnorg.,
- Mulder, J., 2000. Zandverliezen in het Nederlandse kuststelsel Advies voor Dynamische Handhaven in de 21e eeuw.
- Oost, A.P. 1995: Dynamics and sedimentary developments of the Dutch Wadden Sea with a special emphasis on the Frisian Inlet : a study of the barrier islands, ebb-tidal deltas, inlets and drainage basins. PhD thesis, Geologica Ultraiectina, volume 126, pp. 1 – 455.
- POK, 1997. Dynamisch kustbeheer: Kustzone westelijk Terschelling. Een advies over het kustbeheer van paal 0 tot paal 8 op Terschelling. Provinciaal Overlegorgaan Kust Friesland, projectgroep westelijk Terschelling. September 1997
- POK, 1998. Dynamisch kustbeheer: midden en oostelijk Terschelling. Een advies over het kustbeheer van paal 8 tot paal 26 op Terschelling. Provinciaal Overlegorgaan Kust Friesland, projectgroep Terschelling. Mei 1998
- Oost, A. en Cleveringa, J., 2017. Morfologie Kombergingsgebied Borndiep. KPP 2017 BO03 Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden Borndiep. Deltares rapport 11200521-000
- Oost, A., Cleveringa, J. en Taal, M., 2019. Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019. Deltares rapport 11203669-000-ZKS-0006
- Taal, M. en Rommel, M., (2020). Meerjarenprogramma Beheer en Onderhoud Kust 2020-2024. De kennisbasis voor beleid en beheer van de Nederlandse kust. Rapport Deltares en Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.
- Ruessink, B.G., Kroon, A., 1994. The behaviour of a multiple barsystem in the neashore zone of Terschelling, the Netherlands: 1965–1993. Mar. Geol. 121, 187 – 197.
- Schoorl H., 1999: De Convexe Kustboog . bijdragen tot de kennis van het westelijk Waddengebied en de eilanden Texel, Vlieland en Terschelling. Deel I Het westelijk Waddengebied en het eiland Texel tot circa 1550. Piro-la 187 pp.

- Schoorl H., 2000: De Convexe Kustboog . bijdragen tot de kennis van het westelijk Waddengebied en de eilanden Texel, Vlieland en Terschelling. Deel IV TERSCHELLING. Pirola 187 pp.
- Spanhoff, R., Biegel, E.J., Van de Graaff, J., Hoekstra, P., 1997. Shoreface nourishment at Terschelling, the Netherlands: feeder berm or breaker berm? In: Thornton, E.B. (Ed.), Proc. 3rd Int. Conf. on Coastal Dynamics '97. ASCE, New York, pp. 863 – 872.
- Stein R. (2005). Effectiviteit van vooroeversuppleties langs de Waddenkust. Aanzet tot ontwerprichtlijnen voor het ontwerp van vooroeversuppleties. Alkyon, Emmeloord.
- Tanczos, I.C., Aarninkhof, S.G.J., Weck, A.W.v.d., 2000. Ruimte voor de zandrivier. Report Z3200, WL|Delft Hydraulics.
- Van der Spek, A.J.F. 1994: Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. PhD Dissertation, Utrecht University, 191 pp.
- van der Spek, A. J. F., en H. H. S. Noorbergen, 1992, Morphodynamica van intergetijdegebieden. Rapport Beleidscommissie Remote Sensing, Delft.
- Van der Weck (1995). Vooronderzoek naar alternatieven voor de vaarroute naar Terschelling. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijkswaterstaat, Directie Noord-Nederland (RWS, NN)
- Vos, P. & S. de Vries 2013: 2e generatie palaeogeografische kaarten van Nederland (versie 2.0). Deltares, Utrecht. Op 1 september 2015 gedownload van www.archeologieinnederland.nl.
- Vos P., H. Weerts, J. Bazelman, B. Hoogendoorn, M. van der Meulen, 2011: Atlas van Nederland in het Holoceen; landschap en bewoning vanaf de laatste ijstijd tot nu. Uitgeverij Bert Bakker, 89 pp. Arens, S.M.,

A.2 Duinvoet

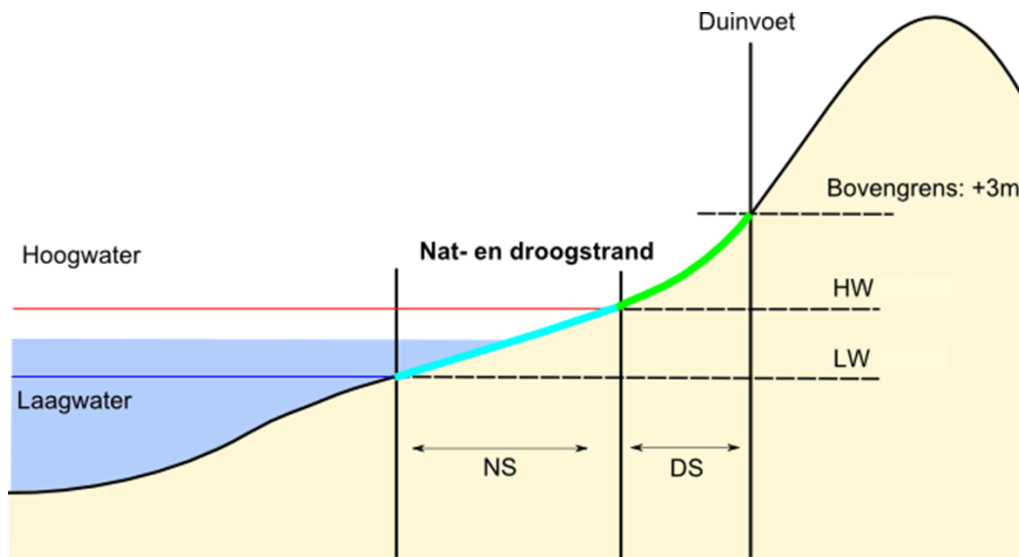
De duinvoet (DV in FiguurApx 2) is de overgang van het droge strand naar de eerste duinenrij. Deze wordt bepaald als de positie van het snijpunt van het profiel met de +3 m NAP lijn, ten opzichte van RSP. Dit snijpunt hoeft in de realiteit niet altijd overeen te komen met de daadwerkelijke overgang van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



FiguurApx 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 FiguurApx 3.



FiguurApx 3 - Rekenmethodiek voor de bepaling van de strandbreedte, natte strandbreedte (NS) in blauw en droge strandbreedte (DS) in groen.

- Baart, F. et al., 2018. Zeespiegemonitor 2018 - De stand van zaken rond de zeespiegelstijging langs de Nederlandse kust, Deltares report 11202193-000-ZKS-0004.
- Hijma, M.P., Kooi, H., 2018a. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens, Deltares report 11200538-008-ZKS-0001.
- Hijma, M.P., Kooi, H., 2018b. Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2) - Een update, case IJmuiden en kwantificering onzekerheden, Deltares report 11202190-001-ZKS-0001_v1.0.
- Hijma, M.P., Van Onselen, E., 2019. Bodemdalingsmonitor 2019 - Kustfundament en de getijdenbekkens, Deltares report 11203683-002-ZKS-0017.