

Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie



Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie

Auteur(s)

Anne de Beer
Nienke Vermeer
Edwin Elias
Julia Löhr

Morfologie van de eilandkoppen van het Zeegat van het Vlie

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	F. Brils
Referenties	-
Trefwoorden	Morfologie, Zeegat van het Vlie, buitendelta, eilandkoppen, bekken, Vlieland, Terschelling

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	27-08-2024
Projectnummer	11210366-004
Document ID	11210366-004-ZKS-0001
Pagina's	126
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

Anne de Beer		
Nienke Vermeer		
Edwin Elias		
Julia Löhr		

Samenvatting

Binnen het deelprogramma 'Systeemkennis Zeegaten' van het KPP B&O Kust programma focust deze studie op de kennisontwikkeling van het zeegat van het Vlie en de aangrenzende zandige eilandkoppen van Vlieland en Terschelling. Door een integrale benadering, waarbij zowel de Noordzeekust, de eilandkoppen als het bekken worden betrokken, wordt een completer beeld van de morfologie verkregen. Dit draagt bij aan een optimaal beheer van de eilandkoppen en hun omgeving. In deze studie wordt een overzicht gegeven van de morfologische ontwikkelingen rondom de eilandkoppen van het Vlie. Er is gebruik gemaakt van grootschalige volume- en trendanalyses op basis van gedetailleerde bodemdata van het bekken en de buitendelta, aangevuld met detailanalyses van bodem- en satellietdata rondom de eilandkoppen en ondersteund door hydrodynamische modellering.

Verschillende tijd- en ruimteschalen worden in deze studie beschouwd. Het hoogste schaalniveau betreft het bekken en de buitendelta. Onder invloed van golven en getij verplaatst de buitendelta zich landwaarts en neemt af in volume, waarbij vooral het volume op de diepe vooroever en aan de rand van de buitendelta afneemt. Een deel van dit materiaal wordt zeewaarts verplaatst, een deel in de richting van het bekken. Door dit landwaartse transport kunnen op het buitendeltaplatform aanlandingsbanken en hoge, centrale banken ontstaan en kan het bekken in volume toenemen. De afsluiting van de Zuiderzee (1932) heeft langdurige gevolgen, waaronder de heroriëntatie van getijgeulen en de verplaatsing van wantijen naar het noordoosten, wat resulteert in een afname van het oppervlakte van het Vlie-bekken. Ook het getijprisma door het zeegat neemt hierdoor enigszins af.

De ontwikkelingen op de schaal van het bekken en buitendelta vormen de randvoorwaarden voor de dynamiek van de eilandkoppen. Een van de belangrijkste uitdagingen is de structurele erosie van zowel Vlieland Noordoost als het Havenstrand. De erosie bij Vlieland Noordoost wordt veroorzaakt door de ligging van vloedgeultjes dicht langs de kust. Hoewel suppleties zijn uitgevoerd met als doel deze geultjes (gedeeltelijk) te dichten, heeft dit het probleem niet opgelost. Een systeemsuppletie zou een mogelijke oplossing kunnen zijn. De structurele erosie van het Havenstrand wordt veroorzaakt door de ligging van de Vliesloot vlak voor de kust. Door de afname van het getijprisma wordt de Vlielanderbalg geleidelijk afgestoten als geul, waardoor de stroming zich meer concentreert in de Vliesloot, die steeds dichterbij het Havenstrand komt te liggen. Er zijn geen aanwijzingen dat de erosie hier in de nabije toekomst zal afnemen.

Belangrijkste vraagstukken voor Rijkswaterstaat in het beheer van de kop van Terschelling zijn: (1) hoe om te gaan met de erosie van de Noordsvaarder en (2) de dynamiek rondom de vaargeulen naar de haven van West-Terschelling. Bij de overgang naar de centrale eilandkust speelt de aanlanding van banken een rol, wat de ligging van de kustlijn variabel maakt. De verbinding tussen Boomkensdiep en Schuitengat zorgt voor een relatief sterke getijstroming door het Boomkensdiep, wat leidt tot structurele erosie van de Noordsvaarder. In het verleden liep de vaarroute Harlingen-Terschelling via de Vliestroom naar het Schuitengat. Door drempelvorming in het Schuitengat werd de vaarroute in de jaren negentig verlegd naar de Slenk. Momenteel verandert de oriëntatie van de aansluiting van de Slenk op het Schuitengat waardoor de Slenk een bochtiger verloop krijgt. De bank Engelschhoek vormt een scheiding tussen het Boomkensdiep/Schuitengat en de Vliestroom. Hoewel Engelschhoek naar het zuiden verplaatst, lijkt deze bank op korte termijn niet te verdwijnen omdat verwacht wordt dat hij in de toekomst wordt gevoed door een nieuwe bank. Sinds 2016 heeft het Schuitengat weer een verbinding met de Vliestroom via de Doorsteek.

Dit gebied is echter zeer dynamisch, waardoor de toekomstige ontwikkelingen moeilijk te voorspellen zijn. De Doorsteek lijkt geen betrouwbare vaarroute te worden.

De beschrijving en inzichten uit deze studie geven een beeld van de ontwikkelingen van de eilandkoppen, onder invloed van ontwikkelingen op de buitendelta en in het bekken. Het wordt aanbevolen om de ontwikkeling van het drempelcomplex en de veranderingen rond de aansluiting tussen Slenk en Schuitengat nader te onderzoeken.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	9
1.1	Achtergrond	9
1.2	Probleemstelling & doelstelling	9
1.3	Opbouw van het onderzoek	10
1.4	Opbouw van de rapportage	11
2	Een overzicht van het huidige Zeegat van het Vlie	12
2.1	De ligging van de dominante geulen en platen	12
2.2	Debieten door het zeegat (Elias, 2021b)	13
2.3	Een overzicht van ingrepen	14
2.3.1	Kustverdediging Vlieland	14
2.3.2	Afsluiting van de Zuiderzee (Elias, 2021b)	15
2.3.3	Zandsuppleties, baggeren en storten	16
2.3.3.1	Suppleties	16
2.3.3.2	Baggeren en storten	17
3	Data en Methode	19
3.1	Inleiding	19
3.2	Beschikbare bodemdata	19
3.2.1	Vaklodingen (Elias 2021b)	19
3.2.2	Kustmetingen (JarKus en LiDAR)	20
3.3	Methodiek	21
3.3.1	Data analyse	21
3.3.1.1	Grootschalige volumeanalyse	21
3.3.1.2	Detailanalyses van de eilandkoppen	22
3.3.2	Hydrodynamische modellering	22
4	Grootschalige morfologische ontwikkeling van bekken en buitendelta	24
4.1	Inleiding	24
4.2	Hydrodynamica in het zeegat	24
4.3	Morfologische ontwikkeling buitendelta en zeegat	26
4.3.1	Overzicht grootschalige veranderingen	26
4.3.2	Volumeontwikkeling	30
4.4	Morfologische ontwikkeling bekken	31
4.4.1	Volumeontwikkeling	31
4.4.2	Omvang van het bekken	35
4.5	Samenvatting	36
5	Morfologische ontwikkeling eilandkop Vlieland	38

5.1	Inleiding	38
5.2	Overzicht van de eilandkop	38
5.3	Hydrodynamica rondom eilandkop	39
5.4	Morfologie rondom eilandkop	42
5.4.1	Introductie	42
5.4.2	Vlieland Noordoost (raai 4700 – 5095)	42
5.4.3	Vlieland Oostkop (raai 5095 – 5400)	45
5.4.4	Havenstrand (raai 5400 – 5460)	50
5.5	Samenvatting	57
6	Morfologische ontwikkeling eilandkop Terschelling	58
6.1	Inleiding	58
6.2	Overzicht van de eilandkop	58
6.3	Hydrodynamica rondom eilandkop	59
6.4	Morfologie rondom eilandkop	63
6.4.1	Introductie	63
6.4.2	Centrale eilandkust en aanlandingsbanken	63
6.4.3	Noordsvaarder & Boomkensdiep	67
6.4.4	Engelschhoek	70
6.4.5	Drempelgebied en Doorsteek	74
6.4.6	Slenk en Schuitengat	78
6.5	Samenvatting	82
7	Conceptueel morfologisch model	83
7.1	Inleiding	83
7.2	Schaal 1: Westelijke Waddenzee	83
7.3	Schaal 2: Bekken & buitendelta	84
7.4	Schaal 3: eilandkoppen	85
7.4.1	Eilandkop Vlieland	85
7.4.2	Eilandkop Terschelling	86
8	Conclusies en aanbevelingen	88
8.1	Conclusies	88
8.2	Aanbevelingen	89
9	Referenties	90
A	Bodemdata	93
A.1	Hydrografische Kaarten	93
A.2	Vaklodingen	104
A.3	LiDAR	106
B	Resultaten hydrodynamische modellering	116
B.1	Stromingspatronen tijdens eb rondom Vlieland	116

B.2	Stromingspatronen tijdens eb rondom Terschelling	117
B.3	Verandering piekdebieten Terschelling	118
C	Jarkus profielen Vlieland	119
D	Doorstroomoppervlakte Vliesloot	121
E	Engelschoek	125

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het onderzoeksprogramma SITO-PS B&O Kust worden door Deltares kennis en tools ontwikkeld die Rijkswaterstaat ondersteunen bij 1) verkrijgen van inzicht in de ontwikkeling van het zandig kuststelsel en 2) die ondersteunen in het beheer en onderhoud van het zandig kuststelsel. Het deelprogramma 'Systeemkennis Zeegaten' van het SITO-PS B&O Kust programma focust op de kennisontwikkeling van de zeegatsystemen en de aangrenzende zandige eilandkoppen.

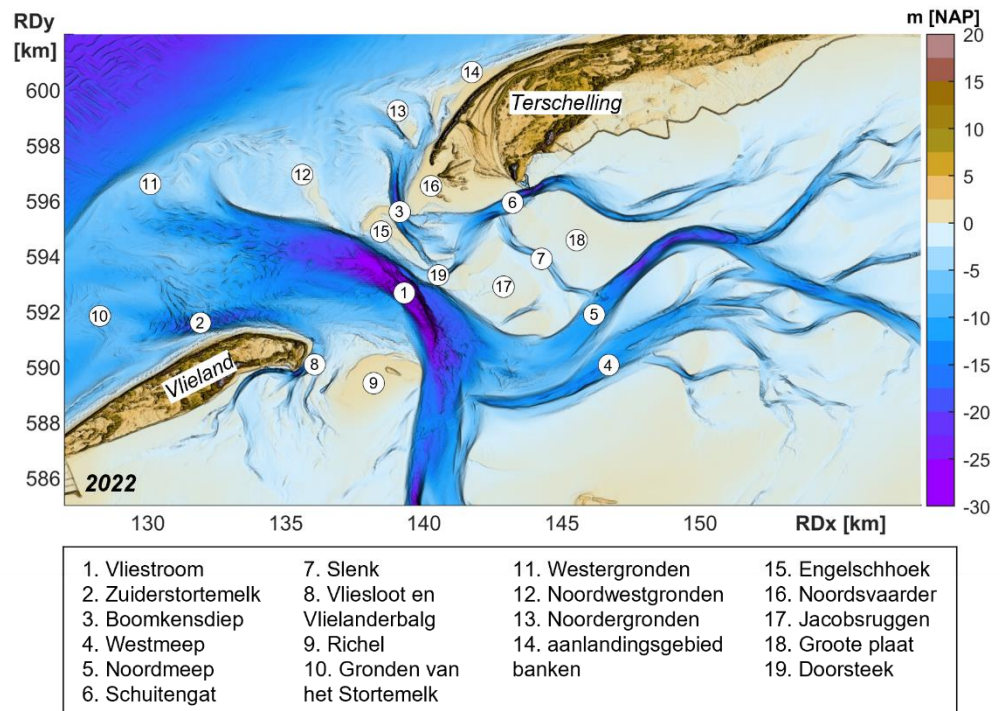
Het gedrag van de eilandkoppen wordt gestuurd door ontwikkelingen vanuit de kustzone, maar ook door ontwikkelingen in de Waddenzee. Tot nu toe zijn de kustzone en Waddenzee vooral afzonderlijk onderzocht, waardoor niet altijd een volledig beeld van de morfodynamiek van de zeegaten werd verkregen. Het is essentieel om de zeegaten integraal te onderzoeken vanuit het perspectief van zowel de Noordzeekust/eilandkoppen als vanuit de Waddenzee. Dit onderzoek is dan ook een samenwerking tussen de onderzoeksprogramma's B&O Kust en SITO-PS B&O Wadden. Het grootschalige onderzoek is voor beide programma's identiek, maar de uiteindelijk focus wordt op de vraagstukken van de twee programma's afgestemd. Voor het Kust en Zeegaten onderzoek ligt de focus op de eilandkoppen, zodat hier een optimaal beheer kan worden uitgevoerd. Binnen deze gezamenlijke filosofie wordt het Zeegat van het Vlie als eerste beschouwd.

1.2 Probleemstelling & doelstelling

In het Zeegat van het Vlie spelen vraagstukken met betrekking tot beheer van de aanliggende kustlijnen en de vaarroutes. Kustlijnhandhavingsproblematiek speelt voornamelijk aan de noord en noordoostzijde van Vlieland (zie Figuur 1-1 voor een overzicht van het studiegebied). De gehele eilandkop van Vlieland is aan kusterosie onderhevig. In het verleden leidde dit tot harde kustverdedigingsmaatregelen, zoals de aanleg van strandhoofden. Nu wordt met frequent terugkerende zandsuppleties de kustlijn gehandhaafd. Een actueel probleem rondom kustlijnhandhaving speelt bij het Havenstrand, waar recentelijk nog een oeverval is opgetreden. Vaargeulproblematiek naar de haven van Vlieland is hier niet aan de orde.

De eilandkop van Terschelling is in het verleden sterk uitgebouwd door aanlanding van de Noordsvaarder. Daarna is de eilandkop gaan terugtrekken. Lokaal betekent dit een sterke teruggang van de kustlijn. Tot op heden zijn er nog geen suppleties nodig geweest, maar dit kan in de toekomst mogelijk wel noodzakelijk zijn. Naast terugtrekking van de kustlijn is er ook vaargeulproblematiek rondom de eilandkop. Drempelvorming in het Schuitengat heeft ervoor gezorgd dat de vaarroute tussen Harlingen en Terschelling in de jaren negentig is verlegd naar de Slenk.

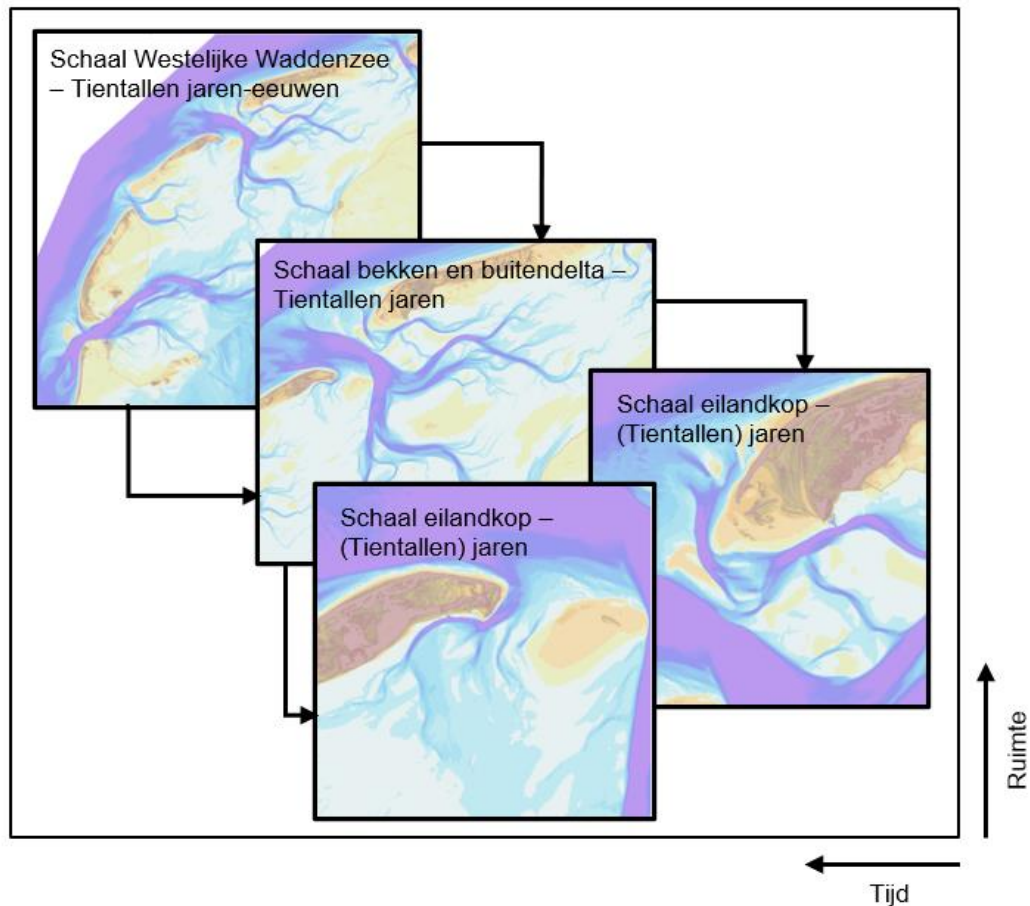
Met meer inzicht in de morfologische processen verwacht Rijkswaterstaat een succesvoller combinatie van kust- en vaargeulbeheer te kunnen uitvoeren. Het doel van dit onderzoek is dan ook om de morfodynamiek van beide eilandkoppen op een globaal niveau te begrijpen en te vatten in conceptuele denkmodellen.



Figuur 1-1: Overzicht van het studiegebied.

1.3 Opbouw van het onderzoek

Dit onderzoek is opgebouwd aan de hand van verschillende schaalniveaus, oftewel de schaalcascade. De grootste schaal is die van de westelijke Waddenzee. De ontwikkelingen op deze schaal scheppen het kader en de randvoorwaarden voor de ontwikkeling van het bekken en de buitendelta. Hiertoe wordt op hoofdlijnen en op basis van literatuur de belangrijkste ontwikkelingen op deze schaal geschetst. De relevante ontwikkelingen in het bekken en op de buitendelta worden beschreven en bestaan uit grootschalige volumeveranderingen en veranderingen in de ligging van hoofdgeulen en platen. Dit heeft vervolgens weer effect op de kleinste schaal, die van de eilandkoppen. Hier wordt gefocust op de recente ontwikkeling (sinds 1985), aangezien deze tijdsschaal het meest inzicht geeft in toekomstige ontwikkelingen. Voor elke schaal is een conceptueel model ontwikkeld, gebaseerd op bestaande kennis en literatuur, grootschalige (volume)analyses en detailanalyses rondom de eilandkoppen.



Figuur 1-2: Overzicht van de drie schaalniveaus van het onderzoek.

1.4 Opbouw van de rapportage

In dit rapport wordt toegewerkt naar conceptuele modellen van de recente ontwikkeling van de eilandkoppen. Hiertoe wordt in Hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van het huidige zeegat. In Hoofdstuk 3 wordt de gebruikte data en methode beschreven. Hoofdstuk 4 beschrijft de grootschalige morfologische ontwikkelingen op de schaal van het bekken en de buitendelta van het Vlie. Hoofdstuk 5 en 6 gaan in op de gedetailleerde processen rondom de eilandkoppen van respectievelijk Vlieland en Terschelling. Hoofdstuk 7 vat voorgaande samen in conceptuele denkmodellen van de verschillende schaalniveaus. In Hoofdstuk 8 worden tenslotte de conclusies en aanbevelingen gegeven.

2 Een overzicht van het huidige Zeegat van het Vlie

2.1 De ligging van de dominante geulen en platen

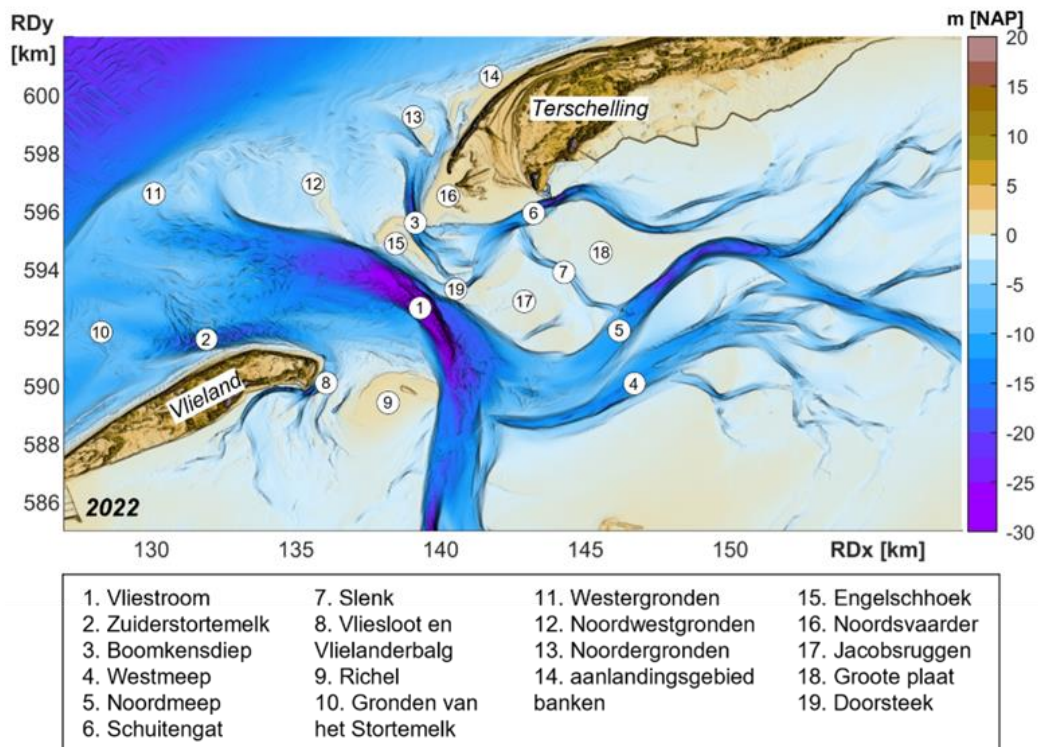
Het Zeegat van het Vlie is vanuit het westen gerekend het derde zeegat in de Waddenzee. Het zeegat ligt ingeklemd tussen de eilanden Vlieland en Terschelling (Figuur 2-1). In het bekken is de komberging van het zeegat verbonden met het bekken van het Eierlandse Gat, maar ook met het bekken van het Zeegat van Texel (Marsdiep).

De 2022 bodem wordt gekenmerkt door een enkele hoofdgeul, de Vliestroom, in de keel van het zeegat (Figuur 2-1, [1]). Deze geul heeft een NW-ZO oriëntatie met een noordwestelijke uitstroom de buitendelta op. In het bekken vertakt de geul in een zuidelijke tak (Vliestroom) en een oostelijke vertakking die bestaat uit de Westmeep en Noordmeep [4,5].

Langs de eilandkop van Terschelling strekt zich een kleinere geul uit, het Boomkensdiep [3]. Het Boomkensdiep gaat in het bekken over in het Schuitengat [6]. Het Boomkensdiep/Schuitengat wordt door een ondiepe zandplaat gescheiden van de Vliestroom (Engelschoek, [15]). Dit is ook de reden dat Schuitengat sinds 1996 niet meer de toegangsgemaal tot de haven van Terschelling vormt. De toegang tot de haven verloopt tegenwoordig via de Slenk [7]. De Slenk verbindt het Schuitengat met de Noordmeep [5] en vormt een scheiding tussen het westelijk gelegen plaatgebied van de Jacobsruggen [17] en de oostelijk gelegen plaat Groote Plaat [18]. De eilandkop van Terschelling bestaat uit een breed strand, ontstaan door de aanlanding van de grote bank Noordsvaarder [16].

Langs de eilandstaart van Vlieland loopt het Zuiderstortemelk [2]. In het bekken gaat deze over in de Vliesloot en Vlielandbalg [8], welke ingeklemd liggen tussen Vlieland en de grote plaat Richel [9]. De Vliesloot/Vlielandbalg vormen de toegang tot de haven van Oost-Vlieland.

De buitendelta van het Zeegat van het Vlie heeft een omvang van ongeveer 8 km in zeewaartse richting en 22 km in langsrichting. Het merendeel van het plaatoppervlak en sedimentvolume bevindt zich ten noorden van de Vliestroom in de Noordwestgronden [12] en Noordergronden [13], die zich ver langs de kust van Terschelling uitstrekken en rond km 5-6 op de kust van Terschelling aanlanden [14]. Het zuidwestelijke gedeelte van de buitendelta is relatief diep. Hier bevinden zich de kleinere bankcomplexen van de Gronden van het Stortemelk [10] en de Westergonden [11].



Figuur 2-1: Een overzicht van het Zeegat van het Vlie met ligging van de geulen en platen op basis van de gecombineerde 2022 (buitenzijde) en 2016 bodemopname van het bekken.

2.2 Debieten door het zeegat (Elias, 2021b)

Door Rijkswaterstaat zijn in het verleden debietmetingen uitgevoerd in het Zeegat van het Vlie. De meest recente rapportage is die van Hut (2004), waarin metingen opgenomen uit 2002 worden beschreven. In deze studie zijn de gemeten debieten omgerekend naar een gemiddeld getij en vergeleken met eerdere studies (samengevat in Tabel 2-1). In 2002 ligt het gemiddelde vloeddebiet op 798 miljoen m³ en het ebdebiet op 890 miljoen m³. De gemeten eb- en vloeddebieten liggen in de range van eerdere metingen uit de jaren '70. In tegenstelling tot de oudere metingen geeft de 2002 meting een netto uitstroming van 92 miljoen m³. Uit het meetverslag blijkt dat er tijdens de metingen een matige krachtige wind uit het noordoosten oprad. Deze windrichting zou een mogelijke oorzaak van de netto uitstroming kunnen zijn. Het belang van wind op de residuele stromingen in de Waddenzee wordt duidelijk weergegeven in Duran-Matute et al. (2014) en Van Weerdenburg (2019).

Tabel 2-1: Overzicht van gemeten of gemiddelde vloed-, eb- en residuele debieten.

Geul	Jaar	Q_{vloed} (10 ⁶ m ³)	Q_{eb} (10 ⁶ m ³)	Q_{net} (10 ⁶ m ³)
Vliestroom (totale keel vh Zeegat)	1971	939	911	28
	1971	886	844	42
	1976	1033	972	61
	2002*	798	890	-92
Vliestroom (centrale deel geul)	1978	650	790	-140
Zuiderstortemelk	1978	200	100	100
Boomkensdiep	1978	195	140	55

* debiet is omgerekend naar gemiddeld debiet volgens Van Sijp (1989) methode.

Visser et al. (1986) geeft een nadere uitwerking van de meetcampagne die in 1976 is uitgevoerd in het Zeegat van het Vlie. In deze meetcampagne zijn de eb- en vloeddebieten bepaald door snelheidsmeters in raaien van de buitendelta te plaatsen en de geuldoorsnede te meten. Deze metingen wijken qua methode iets af van de andere metingen, maar geven wel veel inzicht in de onderlinge verdeling van de debieten over de verschillende geulen. Op basis van deze metingen kan geconcludeerd worden dat in de keel van het zeegat de eb- en vloeddebieten vrijwel gelijk zijn. Op de buitendelta is de Vliestroom dan duidelijk ebgedomineerd en de twee nevengeulen, het Boomkensdiep en de Zuiderstortemelk, zijn vloedgedomineerd. Het Boomkensdiep was voor afsluiting van de Zuiderzee de hoofdgeul, maar in 1976 was deze geul al veranderd in een nevengeul met een debiet dat veel kleiner is dan dat van de Vliestroom.

Tabel 2-2: Overzicht van gemeten vloed-, eb- en residuele debieten op basis van de 1976 meetcampagne.

Geul	Jaar	Q_{vloed} ($10^6 m^3$)	Q_{eb} ($10^6 m^3$)	Q_{net} ($10^6 m^3$)
Vliestroom (totale keel vh Zeegat)	1976	970	991	21
Vliestroom (centrale deel geul)	1976	794	965	159
Zuiderstortemelk	1976	238	112	100
Boomkensdiep	1976	254	140	-124
Schuitengat	1976	96	106	-10
Vliesloot	1976	118	130	-12

2.3 Een overzicht van ingrepen

2.3.1 Kustverdediging Vlieland

De kustverdediging van Vlieland staat uitgebreid beschreven in de Beheerbibliotheek van Vlieland (Quataert, 2021) en in de rapporten van Elias (2021a en b). Deze laatste rapportages zijn gebruikt voor onderstaande samenvatting.

Vóór 1850 ging de kust van Vlieland snel achteruit. De erosiesnelheid lag daarbij rond de 20 m/jaar. Deze kusterosie resulteerde in de aanleg van een hele rij strandhoofden en vrijwel het gehele eiland ten noorden van de Vliehors wordt nu beschermd (Figuur 2-2). Het merendeel, 53 van de 64 strandhoofden, is aangelegd in de periode 1854-1885 (Rakhorst, 1984). De eerste strandhoofden werden aangelegd nabij raai 4300, waarna deze oostelijk werden uitgebreid. In de periode 1957-1959 zijn dan nog strandhoofden aangelegd tussen raaien 4100 en 4300. De laatste twee korte dammen zijn in 1995 aangelegd om de Noordoosthoek van het eiland te beschermen.

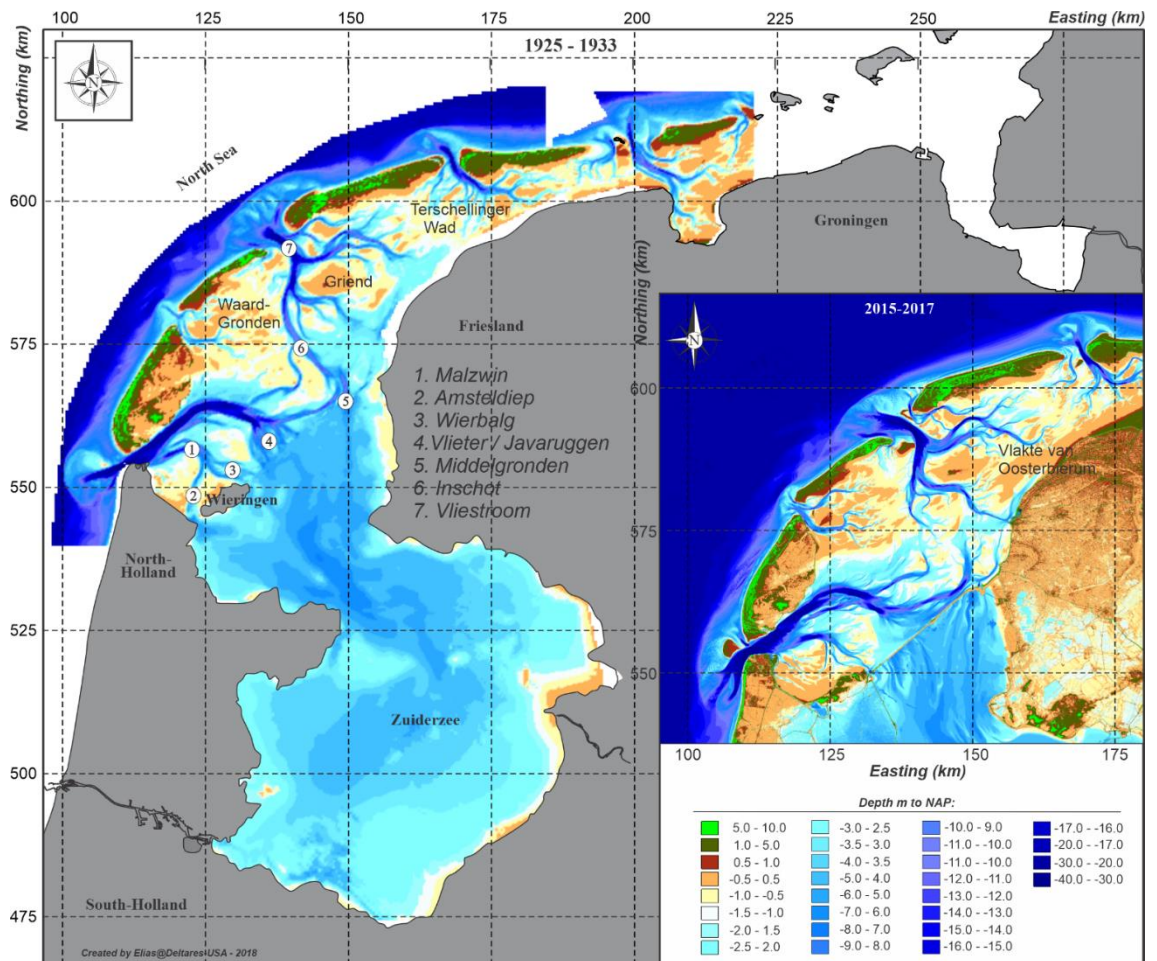
De strandhoofden hebben ervoor gezorgd dat de kustachteruitgang van de eilandkust sterk is afgenomen of zelfs gestopt (Walhout, 1998; Rakhorst, 1984; Verhagen en van Rossum, 1990). Verhagen en Van Rossum (1990) vatten het effect van de strandhoofden als volgt samen: (1) de hoofden hebben een stabiliserende invloed gehad op het kustgedrag, (2) het met hoofden versterkte deel van de kust steekt als een soort bolwerk in zee en (3) er is sterke lij-erosie opgetreden, die door nieuwe hoofden gecompenseerd moest worden.



Figuur 2-2: Boven: ligging van de strekdammen aan de hand van een kaart uit Visser (1946), met toegevoegd locatie hoofden C-F. Onder: Impressie van de strekdammen van Vlieland nabij de NO punt (linksboven en -onder), centrale eilandkust (rechtsboven) en overgang naar de Vliehors (rechtsonder). Foto's: <https://beeldbank.rws.nl>, Rijkswaterstaat. Overgenomen uit Elias 2021b.

2.3.2 Afsluiting van de Zuiderzee (Elias, 2021b)

De meest ingrijpende verandering in het kombergingsgebied van het zeegat van het Vlie is de afsluiting van de Zuiderzee die werd voltooid in 1932 (Thijsse, 1972) (Figuur 2-3). Voor aanleg van de Afsluitdijk was de Vliestroom via de geulen Inschot en Middelgronden rechtstreeks verbonden met de Zuiderzee. Voordat het Marsdiep gevormd werd (rond de 12e eeuw AD) vormde de Vliestroom zelfs de enige verbinding van de Zuiderzee met de Noordzee. Na de vorming ervan wordt het Marsdiep steeds belangrijker en wordt de verbinding van de Vliestroom met de Zuiderzee minder belangrijk.



Figuur 2-3: Representatieve bodems voor de Westelijke Waddenzee net voor de afsluiting van de Zuiderzee (1926, met data van 1925-1933) en voor de huidige situatie (bodemdata 2015-2017). Overgenomen uit Elias (2021b).

De afsluiting van de Zuiderzee bestaat eigenlijk uit twee fasen. Tussen 1920 en 1925 werd de Amsteldiepdijk, met een lengte van 2,5 km, aangelegd tussen Noord-Holland en Wieringen. Deze afsluiting heeft de meeste invloed op het naastgelegen zeegat van Texel. De Afsluitdijk met een lengte van 32 km werd vervolgens in 5 jaar (1927-1932) tussen Wieringen en de kust van Friesland aangelegd. Vóór de afsluiting besloeg het gecombineerde bekken, Westelijke Waddenzee en de Zuiderzee, een oppervlak van rond de 4000 km² en een lengte van 130 km. De afsluiting reduceerde het bekkenoppervlak tot zo'n 1400 km². Het bekken van het Marsdiep is met 710 km² iets groter dan het bekken van het Vlie (660 km²). De ingrijpende reductie in bekkengrootte had tot gevolg dat de getijkarakteristieken in het overgebleven bekken (de Westelijke Waddenzee) sterk veranderden; van een lopende golf naar een meer staand karakter, waardoor grote morfologische veranderingen optraden (Elias et al. 2003).

2.3.3 Zandsuppleties, baggeren en storten

2.3.3.1 Suppleties

Sinds 1995 is er veelvuldig gesuppleerd langs de eilandkust van Vlieland (Tabel 2-3). De suppleties concentreren zich op twee gebieden. Vele kleine suppleties zijn uitgevoerd net ten noorden van de haven van Vlieland (Havenstrand). Door de ligging van de geul, direct langs de kust is het hier vrijwel niet mogelijk om grote hoeveelheden aan te brengen.

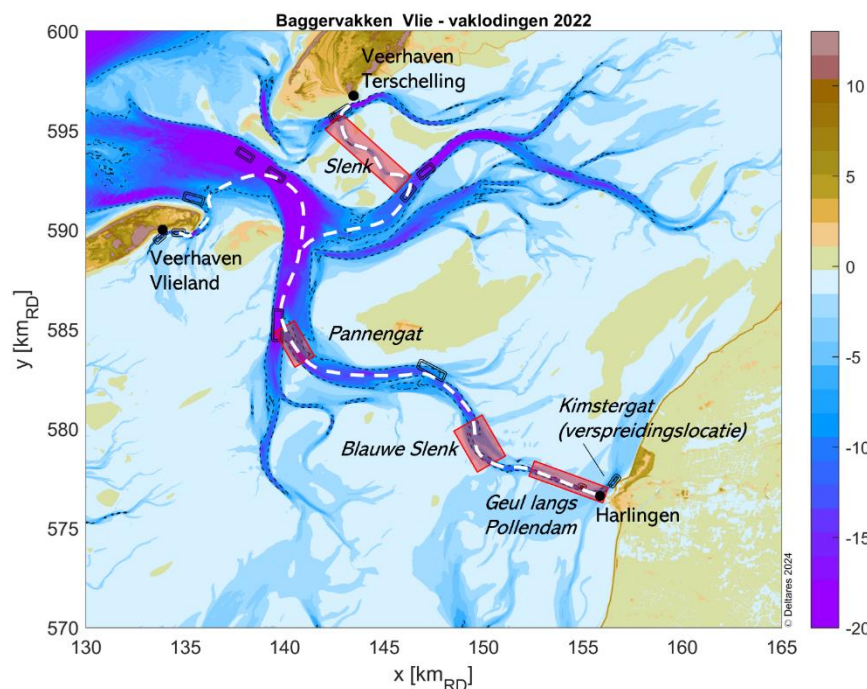
Hierdoor moeten er veelvuldig kleine suppleties worden aangebracht. Het tweede gebied ligt tussen km 46 en 51. Daar is sinds 1997 via vooroever- en strandsuppleties meer dan 8 miljoen m³ zand aangebracht. Naast deze suppleties is er ook eenmalig, in 2017, een grote geulwandsuppletie uitgevoerd, waarbij bijna 1,5 miljoen m³ zand op de zuidelijke geulwand van het Zuiderstortemelk is aangebracht. Op Terschelling is tot op heden slechts één vooroeversuppletie van 2 miljoen m³ uitgevoerd, in 1993. Deze suppletie werd als pilot uitgevoerd langs de centrale eilandkust.

Tabel 2-3. Overzicht suppleties uitgevoerd op Vlieland, gebaseerd op de suppletiedatabase van Rijkswaterstaat t/m december 2023.

	Jaar	Raai (km)		Type suppletie	Volume (m ³)
Noordoosthoek	1995	53.70	54.40	strand-duinsuppletie	80.000
Noordoosthoek	1995	53.70	54.40	strand-duinsuppletie	111.000
Noordzeestrand	1997	46.72	48.44	strandsuppletie	279.621
Havenstrand	1999	54.75	54.85	anders	0
Vlieland-oost	2001	48.90	50.10	strandsuppletie	499.579
Vlieland-oost	2001	46.00	48.80	vooroeversuppletie	831.892
Havenstrand	2001	54.55	54.85	strandsuppletie	20.478
Havenstrand	2005	54.60	54.85	strandsuppletie	20.000
Oost	2005	48.60	50.20	vooroeversuppletie	1.008.032
Havenstrand	2007	54.60	54.85	duinverzwaring	30.000
Havenstrand	2009	54.60	54.85	strandsuppletie	20.000
Oost	2009	47.00	50.00	vooroeversuppletie	1.780.870
Havenstrand	2013	54.60	54.80	strandsuppletie	20.000
Oost	2013	46.63	50.05	strandsuppletie	1.000.000
Vlieland-Stortemelk	2017	51.10	53.60	geulwandsuppletie	1.467.000
Depot Havenstrand	2018	54.10	54.20	strandsuppletie	20.000
Vlieland Havenstrand	2018	54.40	54.80	strandsuppletie	20.000
Vlieland oost	2018	46.63	50.59	strandsuppletie	1.020.000
Vlieland midden	2021	43.07	46.09	vooroeversuppletie	1.600.000
Vlieland Oost en Havenstrand	2023	46.27	54.80	strandsuppletie	1.521.087
				Totaal:	11.349.559

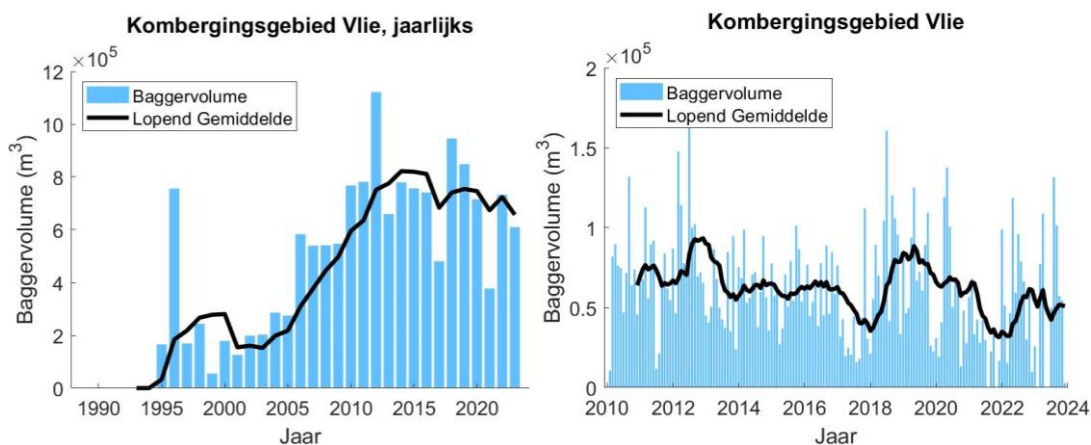
2.3.3.2 Baggeren en storten

Deze sectie bevat een samenvatting van de informatie verschaft in Quataert et al. (2024). In het Vlie vindt er baggeronderhoud plaats in de Slenk, de geul langs Pollendam, de Blauwe Slenk, en het Pannengat (Figuur 2-4). De Slenk wordt op diepte gehouden voor de veerboot naar Terschelling (streefdiepte -5,0m NAP). De geul langs Pollendam, de Blauwe Slenk, en het Pannengat vormt de verbinding tussen haven van Harlingen, Noordzee en eilanden (streefdiepte -7,5m NAP). Er zijn meerdere verspreidingsvakken in het Vlie (zwarte boxen in Figuur 2-4), waarbij het meeste baggerspecie wordt verspreid in de locaties Kimstergat, Blauwe Slenk en Schuitengat 1-2.



Figuur 2-4: Overzichtskaart van het Vlie met de actuele baggerlocaties en de belangrijkste havens. De officiële verspreidingsvakken zijn aangegeven met zwarte lijnen. De geulen waar actueel daadwerkelijk baggeronderhoud plaatsvindt zijn aangegeven in rood, de veerroute met een witte stippellijn.

Het jaarlijkse baggervolume uitgevoerd door Rijkswaterstaat in het Vlie bekken is toegenomen naar gemiddeld 800.000 m³/jaar in 2010 (Figuur 2-5). Ruim de helft van het baggervolume komt uit de Blauwe Slenk. De Slenk en de vaargeul langs de Pollendam zijn de andere locaties waar significant wordt gebaggerd.



Figuur 2-5: Jaarlijks baggervolume 1989-2023 (linker figuur) en maandelijks baggervolume 2010-2024 (rechter figuur) van Rijkswaterstaat in bekken Vlie, excl. havens, incl. ploegen (bron: jaarrapportage Rijkswaterstaat 2023).

3 Data en Methode

3.1 Inleiding

Om tot de conceptuele denkmodellen voor de verschillende schaalniveaus te komen, wordt bodemhoogte data geanalyseerd op verschillende schaalniveaus. Aanvullend aan data analyse wordt numerieke modellering ingezet om inzicht te krijgen in de (verandering in) grootschalige stromingspatronen. Hoofdstuk 3.2 geeft een overzicht van de beschikbare bodemdata. Hoofdstuk 3.3 beschrijft de gehanteerde methodieken op beknopte wijze.

3.2 Beschikbare bodemdata

3.2.1 Vaklodingen (Elias 2021b)

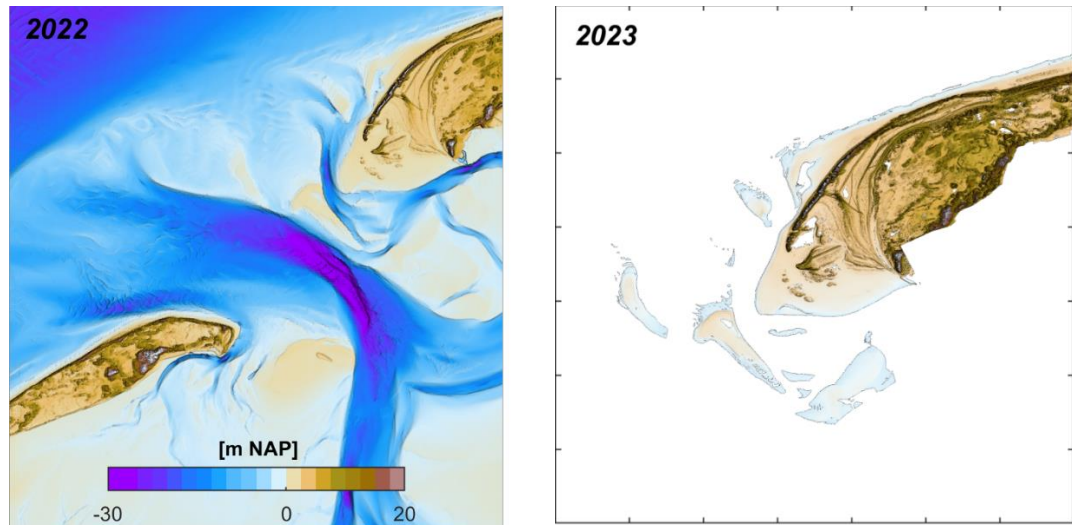
Deze studie maakt gebruik van bodemdata die digitaal beschikbaar zijn bij Rijkswaterstaat. Een uitgebreide inventarisatie van de bij RWS centraal gearchiveerde meetdata is gemaakt door De Kruif (2001). Dit bevat een overzicht van alle bodemdata aanwezig bij Rijkswaterstaat over de periode 1925-2000 met een accent op de periode 1965-2000. In het algemeen geldt dat Rijkswaterstaat vanaf 1985 de bodemdata digitaal heeft ingewonnen en opgeslagen. Deze metingen worden uitgevoerd met een single-beam echosounder. Er wordt in een vast raster van raaien gevaren. Na inwinning van de dieptelodingen worden complete kaarten opgebouwd. Vóór 1996 werd dit gedaan door de lodingen aan te vullen met de waterpassingen. Sinds 1996 worden de lodingen aangevuld met LiDAR metingen van de droogvallende platen in de Waddenzee en met Jarkus-metingen van het droge strand en de duinen langs de Noordzeekust. Meer over de Jarkus-metingen volgt in Hoofdstuk 3.2.2. De opgevolde datasets worden met behulp van het programma Digipol (Digipol, 1997) geïnterpoleerd naar de hoekpunten van een 20x20 m rooster en vervolgens opgeslagen als vaklodingen kaartbladen. Vaklodingen worden niet jaarlijks ingewonnen, maar worden gefaseerd uitgevoerd. In de Waddenzee wordt, van west naar oost, jaarlijks één bekken ingemeten. Elke zes jaar is er dan een volledige opname van de Waddenzee. Op de buitendelta is de dynamiek van de geulen en platen groter en daarom wordt deze in 3-jaarlijks interval opgenomen. De data zijn op te vragen bij de Helpdesk Water van Rijkswaterstaat (<https://www.helpdeskwater.nl>). Deltares maakt via het *Open-Earth* initiatief de data vrij en makkelijk toegankelijk:

<http://opendap.deltares.nl/thredds/catalog/opendap/rijkswaterstaat/catalog.html>.

De data vóór 1985 zijn alleen beschikbaar als analoge kaartbladen van de voormalige Adviesdienst Hoorn. In het kader van een grootschalig onderzoek naar de sedimentatie en erosie van de Waddenzee zijn een aantal van de analoge kaartbladen gedigitaliseerd en min-of-meer dekkende gemaakt voor de periode 1925-1985. De onderliggende data zijn daarbij zorgvuldig terug berekend naar een 250x250 m rooster. In de roostercellen met voldoende resolutie (meetpunten) is hiervoor het meest representatieve punt gekozen. In gebieden met lage resolutie is daarvoor een interpolatie vanuit de omliggende punten uitgevoerd. De gemaakte fout in verticale hoogte door omrekening naar het 250x250 m rooster wordt hierbij geschat op ongeveer 20 tot 30 cm. Zie het rapport van Glim et al. (1988) voor details.

In deze studie wordt vooral gebruik gemaakt van de recente (sinds 1985) en hoge resolutie (20x20m) bodemkaarten. In 1988, 1992, 1998, 2004, 2010, 2016 en 2022 zijn zowel het bekken van het Vlie als de buitendelta ingemeten. Deze jaren zijn dus gebruikt voor de analyses. Uit de volumeanalyse van Elias (2019) blijkt dat de vaklodingen van 1988 een grote afwijking vertoont, deze bodemkaart wordt hier daarom niet verder gebruikt.

De vaklodingen zijn aangevuld met data van andere kustmetingen (Jarkus en LiDAR zie paragraaf 3.2.2) en AHN data om zo tot samengestelde bodemkaarten te komen die zowel de bekkens als de kustzone beslaan. In Figuur 3-1 is deze samengestelde bodemkaart voor 2022 rond het Zeegat van het Vlie getoond, voor de overige jaren wordt verwezen naar Bijlage A.1.



Figuur 3-1: Overzicht van de samengestelde bodemkaart (op basis van de vaklodingen voor 2022) rondom het Zeegat van het Vlie (links). Een voorbeeld van een kusthoogtemeting van West-Terschelling voor het jaar 2023 (rechts). Zie Appendix A.3 voor een overzicht van alle LiDAR metingen.

3.2.2 Kustmetingen (Jarkus en LiDAR)

Naast de vaklodingen worden er gedetailleerde metingen van de eilandkusten gemaakt. De kustmetingen beslaan zowel het natte deel (dieptemetingen) als het droge strand en de duinen (hoogtemetingen). De lodingen worden uitgevoerd op specifieke raaien die loodrecht op de kust staan. Deze raaien hebben een tussenafstand van ongeveer 200-250 m en een lengte van 800-1200 m vanaf de RijksStrandPalen (RSP-lijn). In totaal kent de Nederlandse kust 2000 raaien. Ze worden sinds 1964 jaarlijks ingemeten, vandaar de naam Jarkus (Jaarlijkse Kust). Sinds 2017 worden de Jarkusraaien bij de zeegaten zo ingemeten, dat de hele keel van het zeegat is opgenomen. De data opgenomen vóór 2017 bevatten alleen de kustzone van de eilanden (inclusief eilandkoppen). De Jarkusmetingen worden opgeslagen als raaien, maar ook als rooster met 20 m resolutie. De geulen direct om de eilandkop worden grotendeels opgenomen, maar de buitendelta en de binnenzijde van de eilandkop niet.

Het natte deel van de Jarkusraai wordt met een single-beam echo-sounder (zelfregistrerend echolood) opgenomen. Het droge deel van het strand en de droge delen van de Waddenzee worden sinds 1996 vanuit een vliegtuig met laseraltimetrie (LiDAR) ingewonnen. Na analyse van de resultaten wordt een Digitaal Terrein Model (DTM) verkregen. De DTM wordt verwerkt in de Jarkusmetingen maar wordt ook in 5 m rasterresolutie gearchiveerd. Iedere DTM bevat het droogvallende strand tot een diepte van ongeveer -1,0 m NAP en minimaal de eerste duinenrijen. Bij de eilandkoppen bestaat wordt soms ook de gehele eilandkop opgeslagen (zoals te zien in Figuur 3-1).

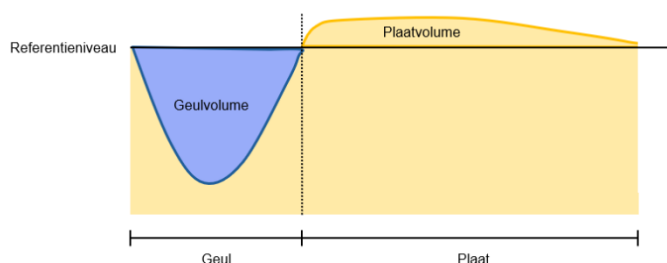
3.3 Methodiek

3.3.1 Data analyse

In deze studie heeft de focus gelegen op de analyse van bodemhoogte data. Conform de schaalcascade (Figuur 1-2) is de data geanalyseerd op verschillende ruimtelijke schalen. Vooral de recente, hoge resolutie bodemdata (sinds 1992, 20x20m) is gebruikt, gebaseerd op de vaklodingen, Jarkus en LiDAR. Hiermee wordt inzicht verkregen in de recente ontwikkelingen van het bekken en de buitendelta. De ontwikkelingen op de langere termijn en na de afsluiting van de Zuiderzee zijn reeds beschreven in eerdere studies (e.g. Elias et al., 2012; Wang et al. 2018).

3.3.1.1 Grootschalige volumeanalyse

Op het schaalniveau van het bekken is een grootschalige volumeanalyse uitgevoerd. De volumebalans gebruikt een vast referentieniveau als basis. De referentieniveaus worden zo gekozen dat deze verschillende morfologische elementen (geulen, platen) goed beschrijven. De volumes worden vervolgens bepaald t.o.v. dit referentieniveau. Dit geeft inzicht in het sedimentvolume van platen, gelegen boven het referentieniveau, of het geulvolume, gelegen onder het referentieniveau (Figuur 3-2).



Figuur 3-2: Principe schets van de bepaling van sediment-, water- en actieve volumes.

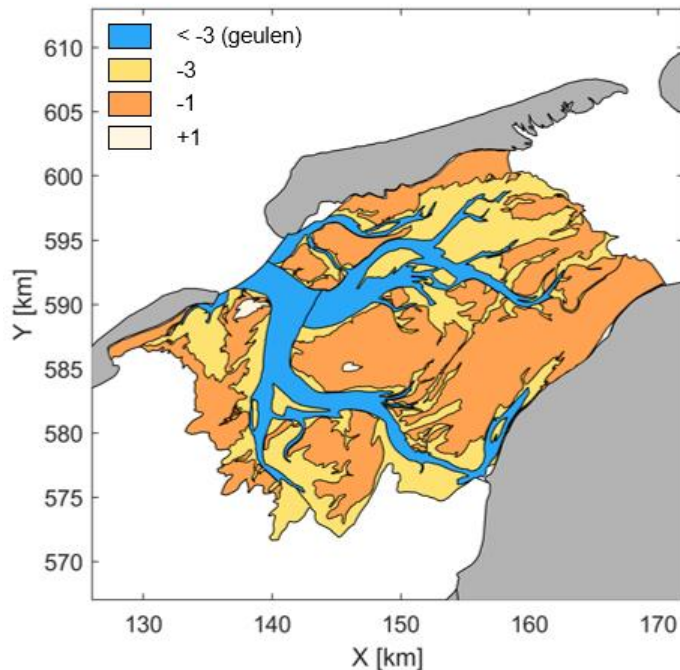
De referentieniveaus worden ook gebruikt om de ligging van verschillende morfologische elementen af te bakenen middels polygonen (zie Figuur 3-3). De ligging van deze morfologische elementen kan vervolgens over de tijd gevolgd worden en informatie over volume en oppervlakte van de elementen kan worden verkregen. De combinatie van volume en oppervlakte geeft informatie over de sedimentdikte boven een bepaald referentieniveau. In deze studie zijn de dieptecontouren NAP -3 m, NAP -1 m en NAP +1 m gekozen als referentieniveau:

- De dieptecontour NAP -3 m maakt onderscheid tussen geulen en (ondiepe) platen;
- De NAP -1 m dieptecontour maakt onderscheid tussen ondiepe en droogvallende platen (bij benadering ligging van Gemiddeld Laag Water, GLW);
- De NAP +1 m contour omvat de permanent droog liggende platen.

N.B. deze methode houdt geen rekening met de ruimtelijke variatie in getijslag en daarmee de variatie in ligging van Laag Water en Hoog Water, of de variatie daarin over de tijd.

De samengestelde bodemkaarten voor de Westelijke Waddenzee zijn de basis voor de volumeanalyse. Voor een uitgebreide beschrijving van de methode wordt verwezen naar Quataert et al. (2024).

Eerder is al door Elias (2024) een volumeanalyse van de buitendelta uitgevoerd voor de periode 1987-2022. De resultaten van deze analyse worden in dit rapport samengevat, dit om de link tussen het grootschalige gedrag van het bekken en de buitendelta te kunnen leggen.



Figuur 3-3: Overzicht van de verschillende dieptecontouren waar de volumes voor zijn bepaald (voor het jaar 2022).

3.3.1.2 Detailanalyses van de eilandkoppen

Naast de grootschalige analyse van de bodemhoogtekaarten zijn deze ook in detail geanalyseerd voor het gebied rondom de eilandkoppen en de relevante geulen en platen. Hiervoor zijn zowel de vaklodingen, als Jarkus data en LiDAR data gebruikt. Daarnaast is in deze studie gebruik gemaakt van satellietdata. Dit kan goed gebruikt worden om de ontwikkeling van droogliggende platen te volgen, met een hogere tijdsresolutie dan de vaklodingen. De python toolkit CoastSat is gebruikt, welke Landsat en Sentinel beelden kan analyseren. Daarnaast is PlanetScope gebruikt, wat de mogelijkheid biedt om satellietbeelden met hoge tijds- en ruimteresolutie te beschouwen. Voor de gehanteerde methode wordt verwezen naar Löhre (2024).

3.3.2 Hydrodynamische modellering

Aanvullend op de data analyse, is hydrodynamische modellering uitgevoerd om inzicht te krijgen in grootschalige stromingspatronen. Eerder is de hydrodynamica in het Vlie al geanalyseerd door Grasmeijer et al. (2022) door middel van een modelstudie. Hierbij zijn voor vier verschillende historische bodems, uit 1976, 1991, 2003 en 2015, stromingen en debieten in de westelijke Waddenzee bepaald. Let op: de jaartallen om de modelsimulaties mee aan te duiden wijken af van de jaartallen van de vaklodingen van het Vlie. Dit is enkel in naamgeving. De modelsimulatie van 1991 is gebaseerd op de vaklodingen van 1992, de modelsimulatie van 2003 op de vaklodingen van 2004 en de modelsimulatie van 2015 op de vaklodingen van 2016. In deze studie is het model gebruikt door Grasmeijer et al. (2022) als basis gebruikt en aangevuld met de meest actuele bodem uit 2022. Op deze manier kunnen trends in de hydrodynamica in het bekken van het Vlie worden bepaald.

Het gebruikte model is het 2D hydrodynamische Dutch Continental Shelf Model in Delft3D – Flexible Mesh (2D DCSM-FM 100m). Het model heeft een horizontale resolutie van 200m langs de Nederlandse kust en 100m in de Waddenzee. Voor een volledige omschrijving van het model wordt verwezen naar Zijl & Groenenboom (2020). Om de effecten van de bodem uit 2022 te kunnen vergelijken met de oude modelresultaten zijn de simulatieperiode, forcering, rekenrooster en uitvoerpunten identiek gehouden aan Grasmeijer et al. (2022).

Als simulatieperiode wordt het jaar 2017 gebruikt. In Grasmeijer et al. (2022) zijn de waterstanden voor 2017 gevalideerd. De getij-amplitude wordt zowel bij West-Terschelling als bij Harlingen licht overschat door het model (ordegrootte centimeters). Bij West-Terschelling is de overschatting echter iets groter dan bij Harlingen, waardoor de gradiënt tussen de getijslag bij West-Terschelling en Harlingen (van enkele centimeters) in het model 30% kleiner is dan in werkelijkheid. Dit kan het verhang in waterstand over het bekken, en dus de stroomsnelheden beïnvloeden. Daarnaast is het gebruikte rekenrooster met een resolutie van 100m te grof om de stroming in de smallere geulen (zoals bijvoorbeeld de Slenk of de Geul langs Pollendam) goed te kunnen beschrijven, omdat deze geulen zijn geschematiseerd middels een enkele of een paar roostercellen. Hierdoor is het model minder geschikt voor detailanalyse van specifieke geulen. Desondanks heeft het model wel meerwaarde om inzicht te krijgen in de werking van het kombergingsgebied op systeemniveau en om de trends gevonden in Grasmeijer et al. (2022) te kunnen updaten met de nieuwe bodem.

De modelsimulaties zijn gebruikt om inzicht te krijgen in trends in grootschalige stromingspatronen. Zo zijn er voor verschillende doorsnedes in het model getijvolumes en piekdebieten berekend. Het getijprisma is gedefinieerd als de totale hoeveelheid water die per eb- of vloedperiode door de doorsnede stroomt (in m^3). Het piekdebiet is de maximale instantane debiet (m^3/s) voor een eb- of vloedperiode. De getijprisma's en piekdebieten zijn bepaald voor ieder getij en vervolgens gemiddeld over alle getijperiodes in de simulatieperiode (1 januari – 31 december 2017).

4 Grootschalige morfologische ontwikkeling van bekken en buitendelta

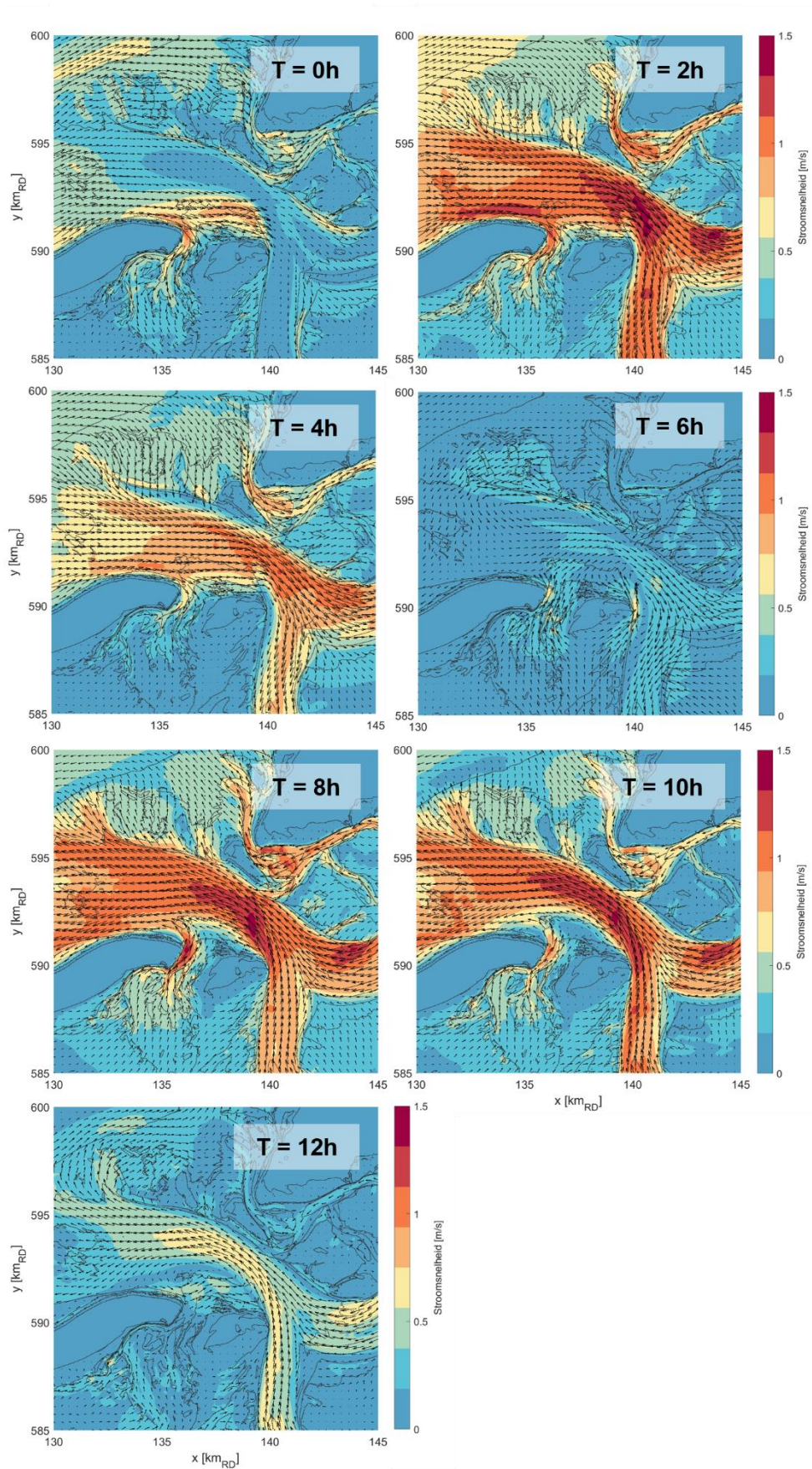
4.1 Inleiding

De grootschalige morfologische ontwikkeling op zowel de buitendelta als in het bekken worden in dit hoofdstuk beschreven; aandacht wordt besteed aan de morfologische verandering, maar ook aan de volumeontwikkeling van bekken en buitendelta. Dit schetst het kader en grootschalige beeld voor de detailanalyses in Hoofdstuk 5 en Hoofdstuk 6. De hydrodynamica in het zeegat wordt beschreven in Hoofdstuk 4.2. De ontwikkeling van de buitendelta wordt beschreven in Hoofdstuk 4.3, de ontwikkeling van het bekken in Hoofdstuk 4.4.

4.2 Hydrodynamica in het zeegat

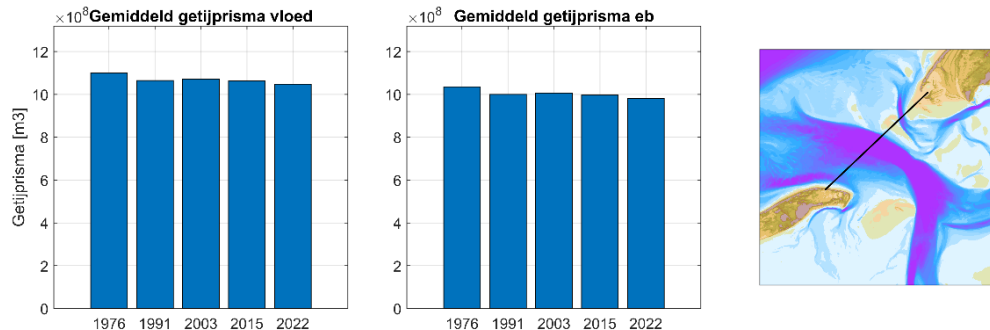
Als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee zijn de getijkarakteristieken in het overgebleven bekken (de Westelijke Waddenzee) sterk veranderd; van een lopende golf naar een meer staand karakter. Nabij het Zeegat van het Vlie (meetlocatie Vlieland Haven) nam de getijslag met 30 cm toe. Rond 1900 lag de getijslag rond de 1,60 m. Tussen 1900 en 1920 nam deze langzaam af naar een waarde van 1,48 m. Na de afsluiting neemt de getijslag dan toe tot 1,80 m om vervolgens verder te stijgen tot een maximale waarde van 1,90 m rond 1980. De huidige getijslag ligt op ongeveer 1,85 m. Op basis van hydrodynamische modellering wordt geschat dat het getijprisma na afsluiting 14% hoger ligt dan het prisma voor afsluiting (Vroom et al. 2012). Deze modellering laat ook zien dat de faseverschillen in het getij niet wezenlijk veranderen.

Met behulp van modelsimulaties (H. 3.3.2) wordt inzicht verkregen in de hydrodynamica in het zeegat en bekken over de periode 1978-2022. Figuur 4-1 toont de getijdestroming door het zeegat gedurende een gemiddeld getij voor de bodem van 2022. De vloedstroming begint door het Zuiderstortemelk en de Vliesloot en om Richel heen het bekken in te stromen. Vervolgens stroomt het water door de Vliestroom, over de buitendelta en door Boomkensdiep verder het bekken in. Kentering van de stroming vindt ook eerst plaats in de Vliesloot. In de laatste fase van de ebstroming, vindt door de Vliestroom nog uitstroming plaats, terwijl de stroomsnelheden in de Vliesloot heel klein zijn.

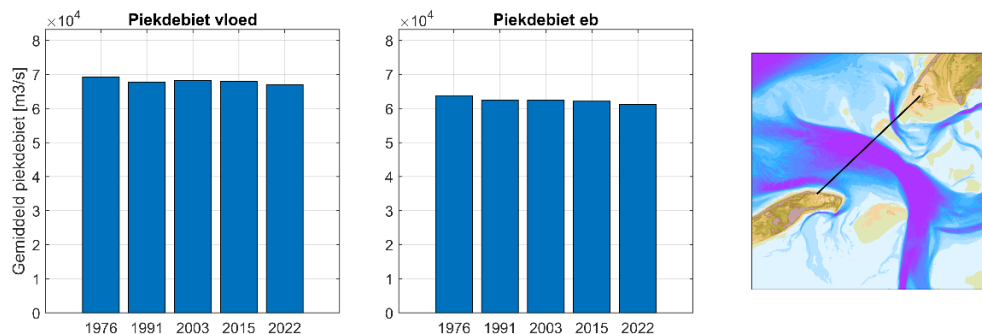


Figuur 4-1: Stromingspatronen door het zeegat gedurende een gemiddeld getij (om de 2 uur) voor de 2022 bodem.

Op basis van modelsimulaties met de verschillende bodems tussen 1976 en 2022 kan inzicht verkregen worden in veranderingen in de hydrodynamica over de tijd. Het totale getijprisma door het zeegat neemt licht af (Figuur 4-2), zowel tijdens eb als tijdens vloed. Dit werd al geconcludeerd door Grasmeyer et al. (2022) en deze trend lijkt zich ook met de nieuwste bodem door te zetten. De afname tussen 1976 en 2022 is 5% voor zowel vloed als eb. Gedurende alle jaren is het getijprisma tijdens vloed groter dan tijdens eb (Figuur 4-3), dit in tegenstelling tot de meest recente debietmetingen uit 2002 waar het ebprisma groter is (Hoofdstuk 2.2). Bij de metingen van 1976 was het getijprisma tijdens vloed groter.



Figuur 4-2: Gemiddeld getijprisma tijdens vloed en eb door de keel van het zeegat, op basis van modelsimulaties.



Figuur 4-3: Piekdebiet tijdens vloed en eb door de keel van het zeegat, op basis van modelsimulaties.

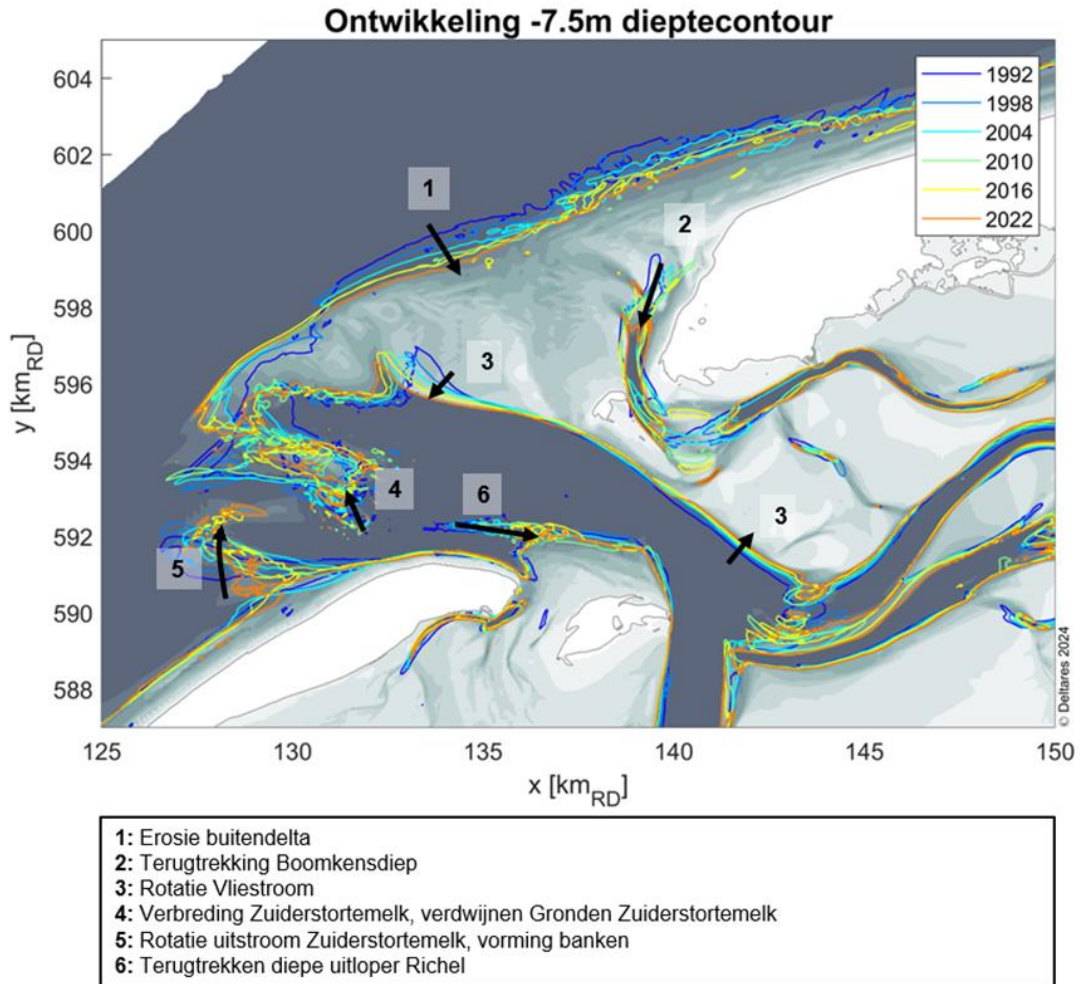
4.3 Morfologische ontwikkeling buitendelta en zeegat

4.3.1 Overzicht grootschalige veranderingen

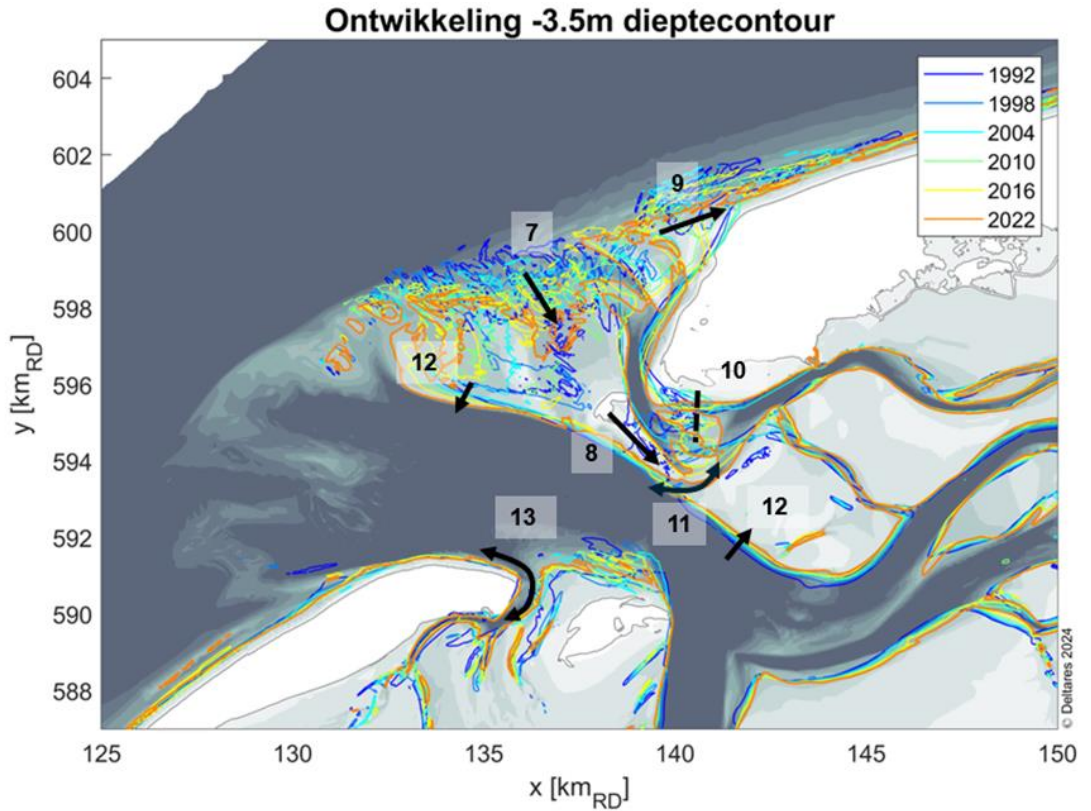
Een overzicht van de grootschalige veranderingen op de buitendelta en in het zeegat worden getoond in Figuur 4-4 en Figuur 4-5, middels NAP -7,5 m en NAP -3,5 m dieptecontourlijnen opgenomen tussen 1992 en 2022. Bevindingen van Elias (2021b) worden herhaald en aangevuld met de laatste bodemkaart uit 2022:

- Onder invloed van golven en getij wordt het noordelijke deel van de buitendelta opgeruimd en verplaatst richting het zeegat [1]. Dit is duidelijk te zien in de contourlijnen op het NAP -7,5 m niveau;
- De banken van de Noordwestgronden verplaatsen landwaarts en zorgen er daarmee voor dat de uitstroom van Boomkensdiep zich terugtrekt [2,7]. Dit lijkt in de meest recente bodem door te zetten. Boomkensdiep blijft verder dicht om de eilandkop van Terschelling en de Noordsvaarder heen liggen;

- Kleinschalige bankaanlandingen, in tegenstelling tot de grootschalige bankaanlanding van de Noordsvaarder, vinden nog plaats op de eilandkust van Terschelling (positie: rond km 5-6) [9]. Deze banken landen aanvankelijk (tot 2000) aan met een herhalingstijd van 30-40 jaar. Recentelijk ligt de herhalingstijd rond de 10-15 jaar en is de vorm van de bank veranderd van een kustlangse naar kustdwarse bank;
- Engelschoek, een uitloper van de banken van de Noordwestgronden, migreert het zeegat in en zorgt voor een scheiding van het Schuitengat en Vliestroom [8]. Daarmee heeft het Schuitengat geen verbinding meer met Vliestroom sinds 1991. In recente jaren (2015) is wederom een verbinding ontstaan, de Doorsteek [11]. Het drempelgebied tussen Boomkensdiep en Schuitengat is zeer dynamisch;
- De Vliestroom is de dominante geul op de buitendelta. De noordelijke geulwand (aan de kant van Terschelling) vertoont een rotatie tegen de klok in [3, 12]. Vooral de geulwand ter hoogte van de plaat Jacobsruggen verplaatst richting het noordoosten (zie ook Figuur 4-7). De geulwand aan de zijde van Vlieland vertoont geen duidelijke trend;
- Het Zuiderstortemelk laat een zeewaartse vergroting zien [4]. De Gronden van het Zuiderstortemelk, gelegen tussen het Zuiderstortemelk en Vliestroom in, verdwijnen hierbij grotendeels. Een directe verbinding tussen de ebstream van de Vliestroom en die van het Zuiderstortemelk lijkt te vormen (Figuur 4-6). Het zeewaartse gedeelte van het Zuiderstortemelk roteert daarnaast met de klok mee [5]. Door de uitbochtiging kan de geul lokaal meer in de kust gedrukt worden, dat is ook zichtbaar in de contourlijnen. Rond de uitstroom vormen zich drempels en banken (Figuur 4-6), waardoor er tussen het centrale deel van het Zuiderstortemelk en de uitstroom de buitendelta op ondieptes ontstaan;
- Er is een directe verbinding tussen het Zuiderstortemelk en de Vliesloot, de Vliesloot blijft dicht om de eilandkop van Vlieland heen liggen [13]. De diep gelegen uitloper van Richel lijkt zich in de richting van het bekken terug te trekken [6].

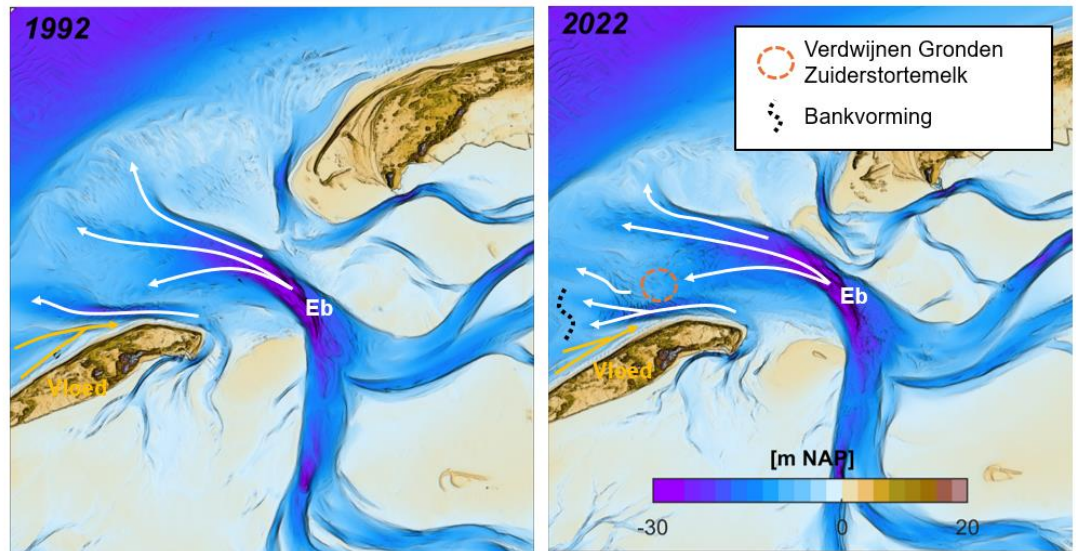


Figuur 4-4: Overzicht van de ontwikkeling van de buitendelta, op basis van de contourlijnen op NAP -7,5 m.

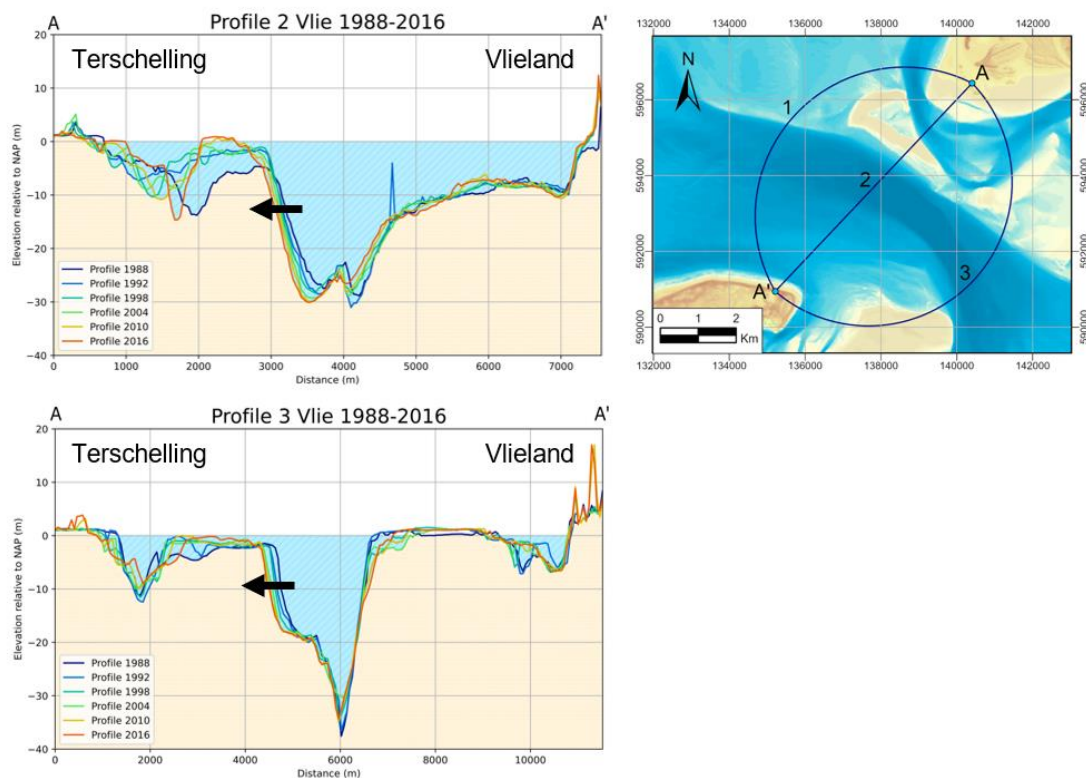


- 7: Landwaartse verplaatsing banken
- 8: Migratie Engelschoek
- 9: Bankaanlanding
- 10: Dynamisch drempelgebied
- 11: Vorming Doorsteek
- 12: Rotatie Vliestroom
- 13: Directe verbinding Zuiderstortemelk - Vliesloot

Figuur 4-5: Overzicht van de ontwikkeling van de buitendelta, op basis van de contourlijnen op NAP -3,5 m.



Figuur 4-6: Conceptuele weergave van de stromings- en transportpatronen tijdens eb en vloed.



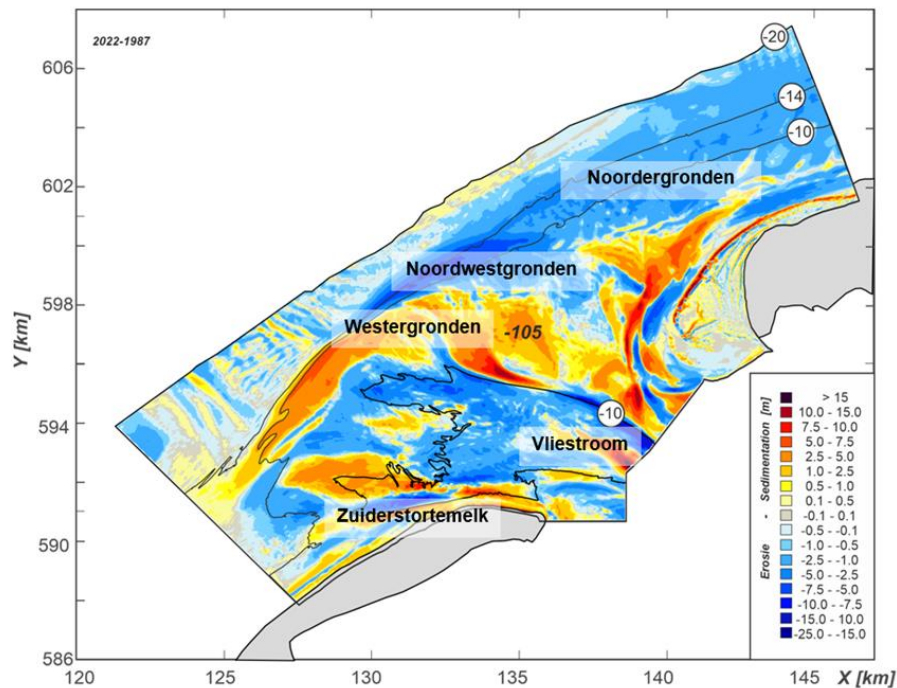
Figuur 4-7: Ontwikkeling van het zeegat op twee doorsnedes door de keel (2 en 3).

4.3.2 Volumeontwikkeling

De volumeontwikkeling van de buitendelta wordt beschreven in Elias (2024). Hier wordt een korte samenvatting gegeven. In de periode tussen 1987 en 2020 is het volume van het gehele kustvak van de buitendelta afgenomen met 89 miljoen m^3 , oftewel een gemiddelde afname van 2,7 miljoen m^3 /jaar. Deze afname wordt vooral veroorzaakt door een grote afname aan de zeezijde van de buitendelta en door verdieping van de uitstroom van de Vliestroom (zie Figuur 4-8).

De actieve buitendelta vertoont een duidelijke tweedeling in gedrag. De zeewaartse rand, de zone tussen de NAP -10 m en -6 m contouren, neemt sterk in volume af (37 miljoen m^3). Het buitendeltaplatform van de Wester- en Noordwestergronden, gedefinieerd als de zone tussen de NAP -6 tot -1 m contouren neemt juist met 22,5 miljoen m^3 in volume toe. Deze toename gebeurt met name in de grote bankgebieden, die bestaan uit de aanlandingsbanken en centraal gelegen hogere bank op de Westergronden (o.a. Engelschoek). De centrale bank vertoont een sterke groei in omvang en volume van 28 miljoen m^3 .

De aanliggende eilandkusten zijn afgebakend door de zeewaartse ligging van de NAP -1m contour tot de landwaartse grens van de actieve zone. De eilandkusten van Vlieland en Terschelling vertonen beiden een kleine toename in volume van 2 en 1 miljoen m^3 respectievelijk.



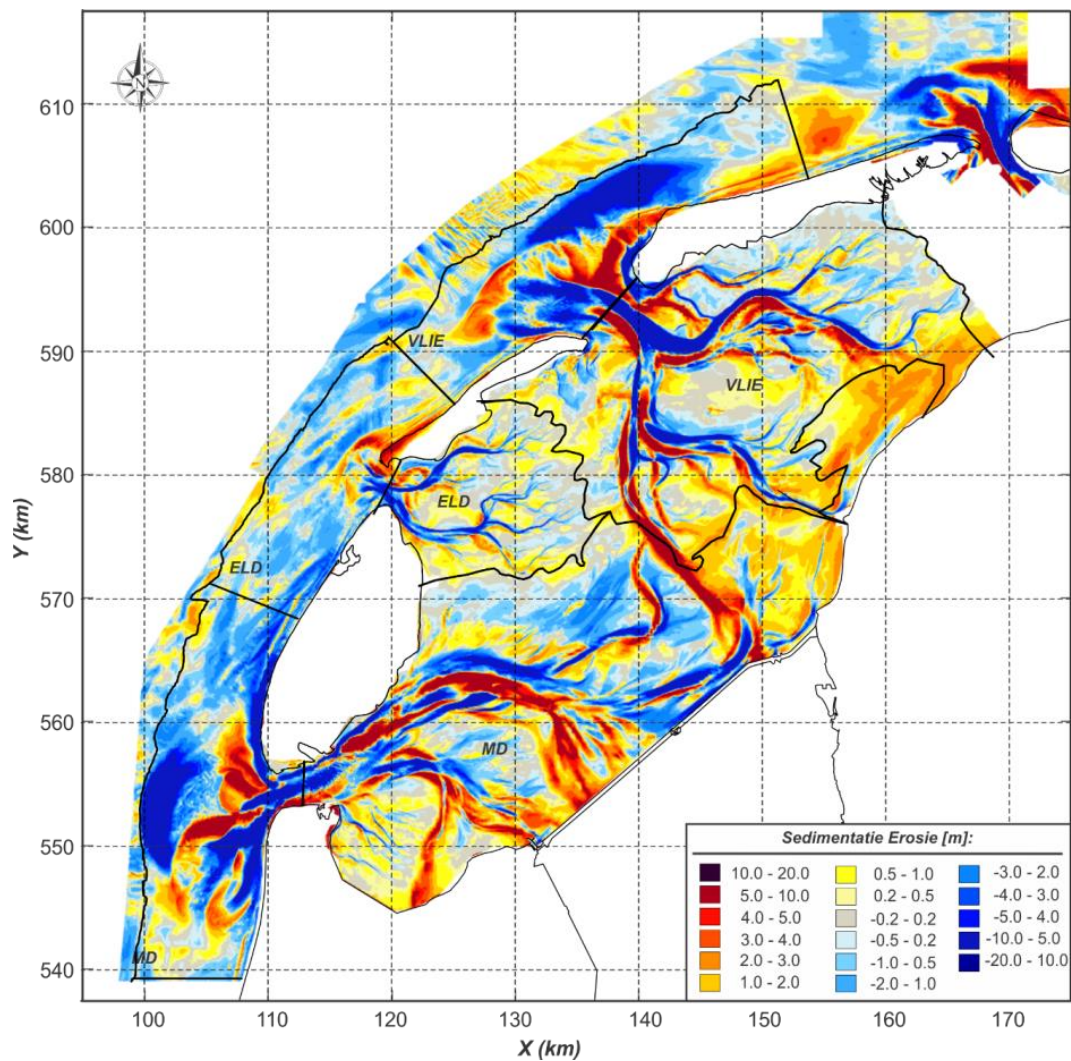
Figuur 4-8: De opgetreden sedimentatie-erosie tussen 1987 en 2020 (contouren zijn op basis van de 2020 bodem). Overgenomen uit Elias (2024).

4.4 Morfologische ontwikkeling bekken

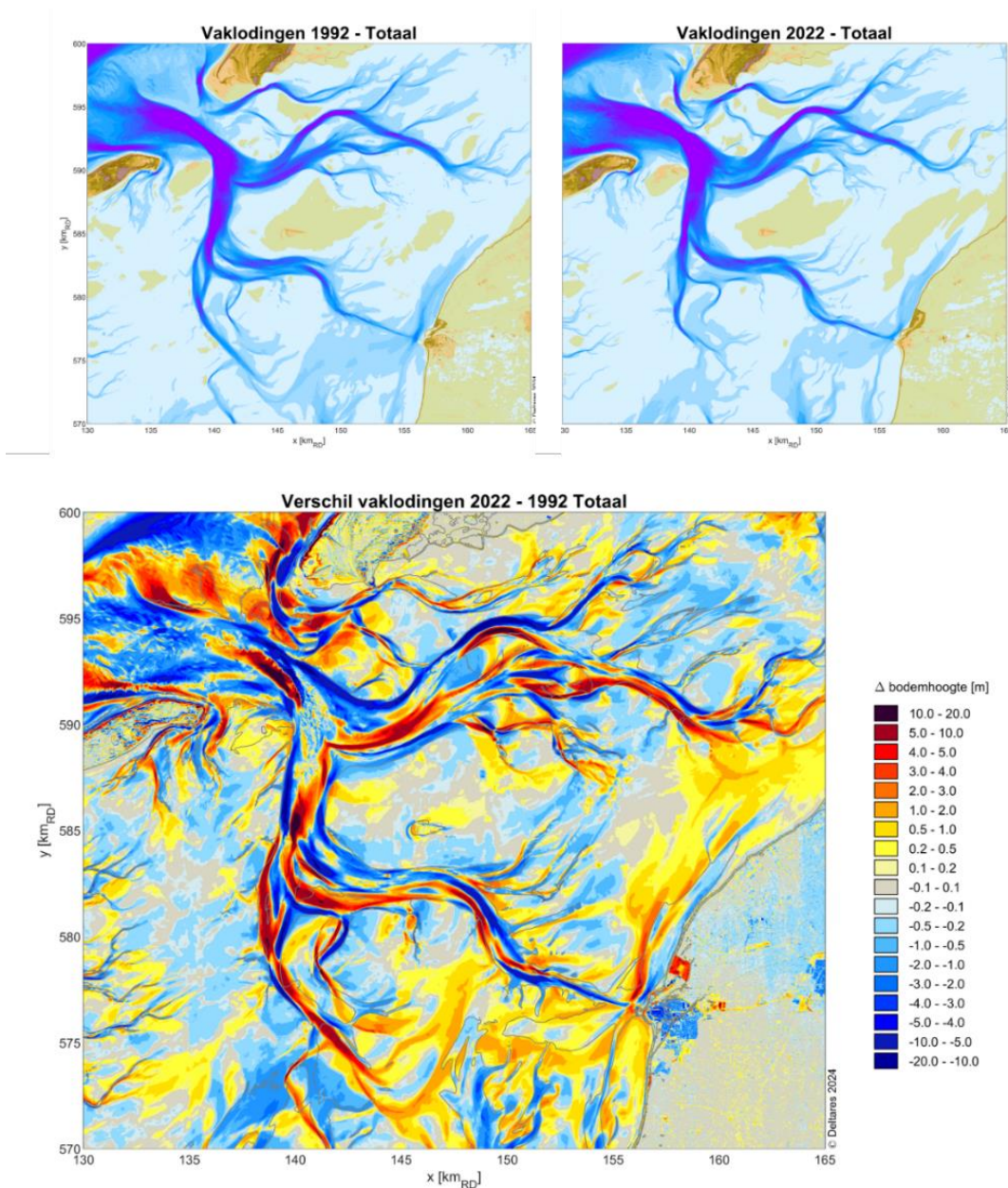
4.4.1 Volumeontwikkeling

Sinds de afsluiting van de Zuiderzee is er sprake van netto sedimentatie in het bekken van het Vlie (Elias, 2021b). Na afsluiting van de Zuiderzee blijft over het algemeen het geulenpatroon behouden maar verzandden de afgesloten geulen (Middelgronden en Inschot) en vindt er veel sedimentatie plaats langs de kust van Friesland (Vlakte van Oosterbierum en Ballastplaat) (Figuur 4-9). Terwijl de zuidelijke uitstroom van de Vliestroom verzandt, lijkt juist de noordelijke tak (Westmeep, Noordmeep en Zuidmeep) zich verder oostelijk, richting het Terschellinger Wad uit te strekken. De sedimentatie was de eerste jaren na de afsluiting het sterkst met een netto sedimentimport van 2,3 miljoen m³/jaar over de periode 1933 – 2015 (Elias, 2019).

De laatste decennia is de sedimentatie minder sterk, al importeert het bekken nog steeds sediment (1,43 miljoen m³/jaar voor de periode 1991 – 2015; Elias, 2019). Circa een kwart van dit geïmporteerde sediment bestaat uit slib en de slibgehalten nemen toe (Colina Alonso, 2020). Deze sedimentatie vindt vooral plaats langs de Friese vastelandskust. De plaatgebieden voor de kust, zoals de Vlakte van Oosterbierum en de Ballastplaat, zijn de laatste decennia sterk uitgebreid en verhoogd (zie Figuur 4-10 voor de sedimentatie-erosiepatronen tussen 1992-2022). De plaatgebieden die tegen het wad aanliggen vertonen een erosieve trend. Sedimentatie is waar te nemen op de platen vlakbij de keel, zoals Richel, Jacobsruggen en Engelschhoek.



Figuur 4-9: Sedimentatie-erosiepatronen van de Westelijke Waddenzee na afsluiting van de Zuiderzee (1933-2015).

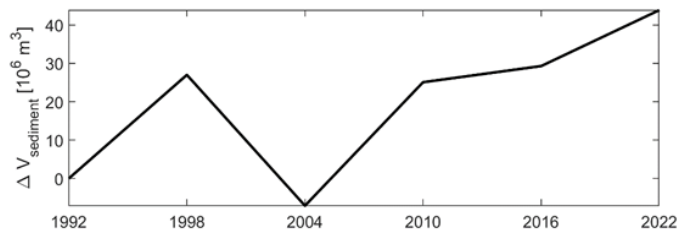


Figuur 4-10: Boven: Bodemligging van het Vlie uit 1992 en 2022 naast elkaar. Onder: het verschil tussen de bodemliggingen in 2022 en 1992. Blauwe gebieden laten erosie zien, oranje/rode gebieden sedimentatie.

Inzicht in de recente volumeontwikkeling van het bekken is verkregen middels een volumeanalyse op basis van recente bodemkaarten (1992-2022). Voor een uitgebreide beschrijving van de resultaten wordt verwezen naar Quataert et al. (2024). Hier wordt een samenvatting gegeven.

In de periode 1992-2022 nam het volume van het bekken toe met 44 miljoen m^3 , oftewel 1,46 miljoen m^3 /jaar (Figuur 4-11). Ter referentie, in de periode 1987-2020 nam de buitendelta af in volume met 89 miljoen m^3 of 2,7 miljoen m^3 /jaar (Elias, 2024, Hoofdstuk 4.3.2). Een deel van het verlies van de buitendelta is waarschijnlijk het bekken in getransporteerd. Door verschuiving van het wantij in noordoostelijke richting wordt het oppervlakte van het bekken kleiner. Ook het plaat- en geulareaal neemt af in oppervlakte binnen het kleiner wordende bekken, het aandeel van platen en geulen binnen het bekken blijft echter nagenoeg gelijk: ca. 82% platen en 18% geulen, waarbij de NAP -3 m contour wordt gehanteerd als scheiding tussen geulen en platen.

Ca. 50% van het bekken bestaat uit droogvallende platen (> NAP -1 m). Op de schaal van het bekken neemt het geulvolume af (of: opvulling vindt plaats in de geulen) en de gemiddelde plaathoogte neemt toe. Echter, op het niveau van individuele platen speelt verschillend gedrag.

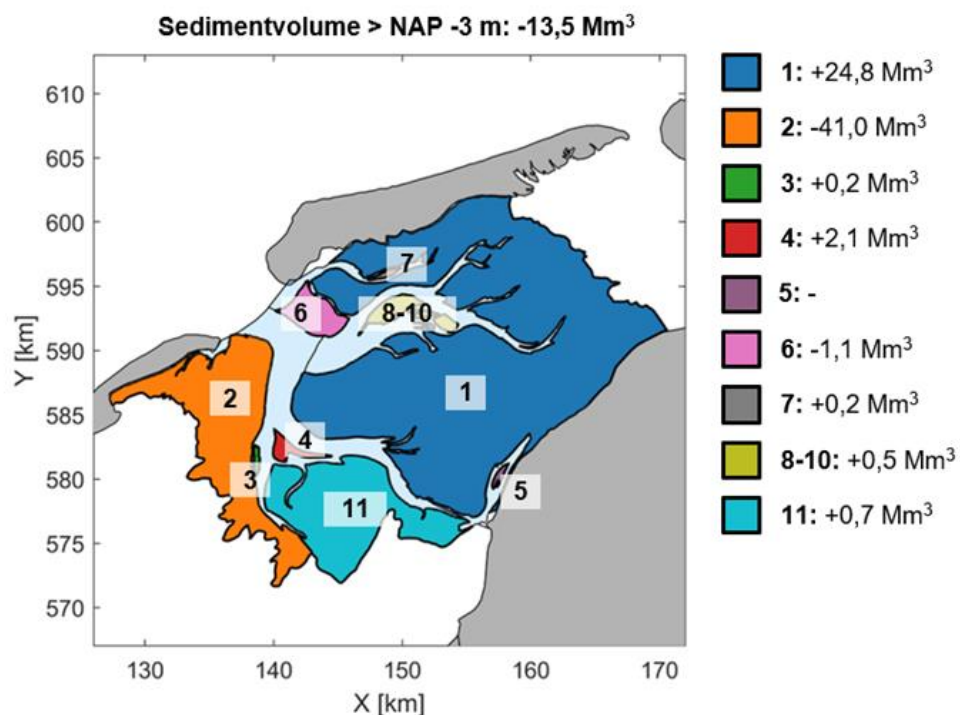


Figuur 4-11: Ontwikkeling sedimentvolume van het bekken over de periode 1992-2022.

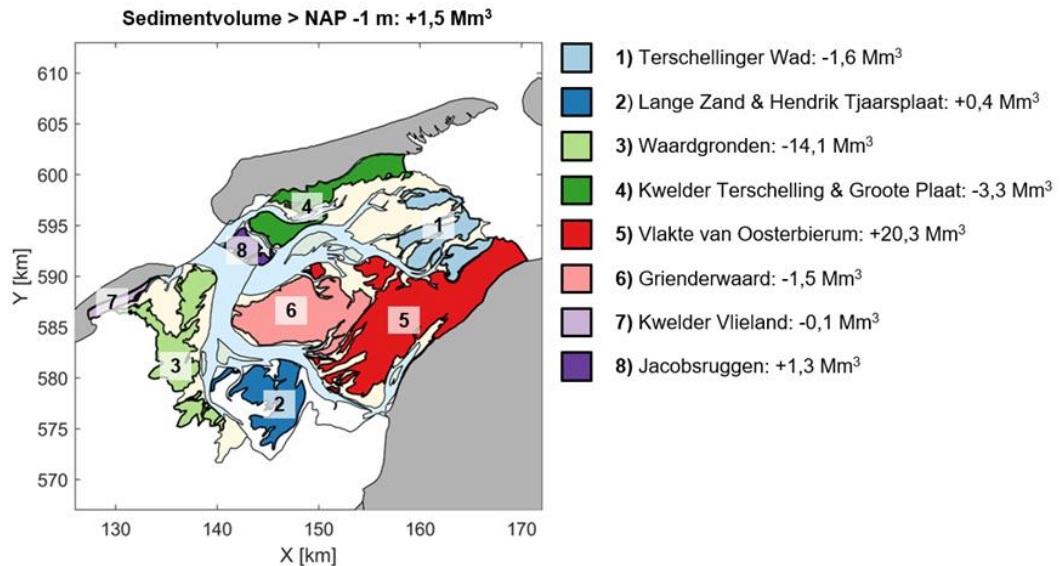
De droogvallende platen binnen het bekken zijn onder te verdelen in drie zones: langs de vastelandskust, centraal in het bekken en langs de eilandkusten. De platen langs de vastelandskust nemen toe in sedimentvolume met 20,8 miljoen m³ tussen 1992 en 2022, ze groeien ook in hoogte. De platen centraal in het bekken verliezen sediment (-17,2 miljoen m³) en nemen af in hoogte.

Specifiek voor platen vlakbij het zeegat is het volgende gedrag waarneembaar:

- Jacobsruggen: door de verplaatsing van de Vliestroom richting Terschelling neemt het oppervlakte en sedimentvolume van de Jacobsruggen af. Tegelijkertijd vindt groei in de hoogte plaats, waardoor het sedimentvolume van het droogvallende plaatdeel toeneemt met 1,3 miljoen m³;
- Richel: de droogliggende plaat Richel groeit zowel in sedimentvolume, oppervlakte en hoogte. Het sedimentvolume boven NAP +1 m groeit in de periode 1992-2022 met 0,4 miljoen m³.



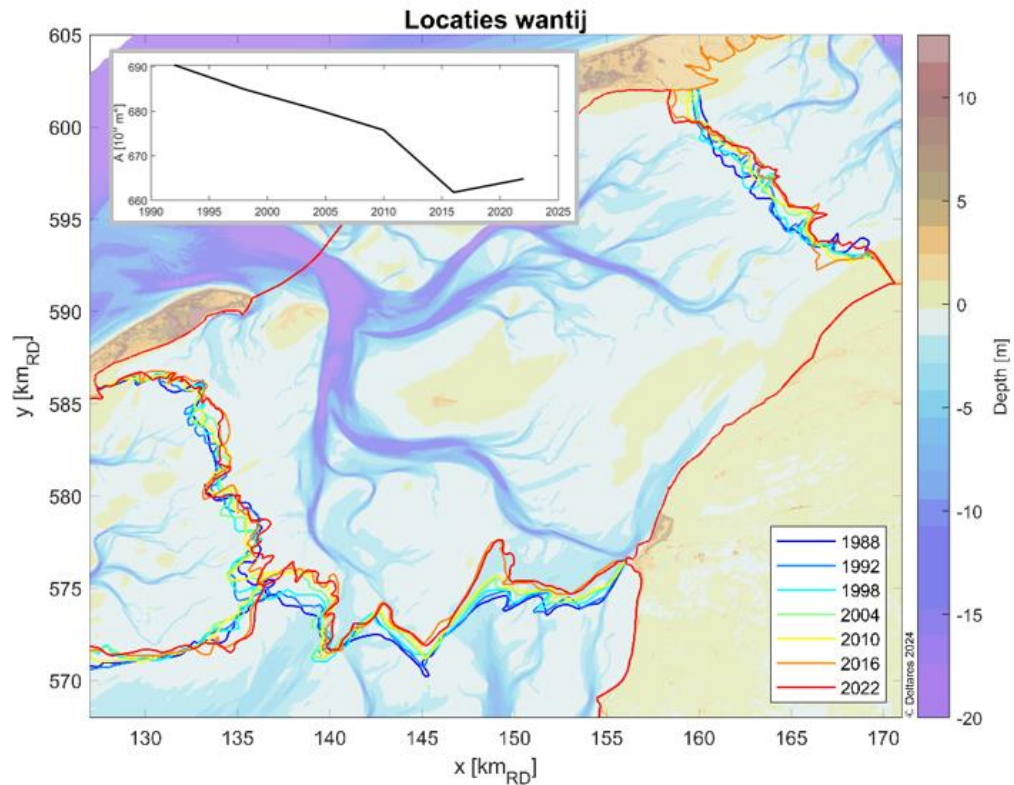
Figuur 4-12: Samenvatting verandering plaatvolume > NAP -3 m en het geulvolume < NAP -3 m tussen 1992 en 2022.



Figuur 4-13: Samenvatting verandering plaatvolume > NAP -1 m tussen 1992 en 2022.

4.4.2 Omvang van het bekken

De begrenzing van het bekken wordt gevormd door het morfologisch wantij. De ligging van dit morfologisch wantij is bepaald voor de recente bodemkaarten en vertoont een verplaatsing richting het noordoosten, zie Figuur 4-14. Over de tijd breidt het kombergingsgebied van het Eierlandse Gat en Marsdiep uit. Ook het wantij tussen het Vlie en het Borndiep verschuift naar het noordoosten, al is de verschuiving daar kleiner. Met deze verschuiving van het wantij neemt het kombergingsgebied van het Vlie tussen 1992 en 2022 af met 25,6 km² (oftewel 3,6% ten opzichte van 1992), zie Tabel 4-1. De afname van het kombergingsoppervlakte vertoont een vrij constante afnemende trend. De dalende trend lijkt sinds 2015 af te nemen, maar dit moet bevestigd worden door toekomstige data. De afname van het kombergingsgebied is in lijn met het afnemende getijprisma door de keel.



Figuur 4-14: Ligging van het morfologisch wantij voor de jaren 1992-2022 en de afname van het kombergingsgebied (Wagenaar, 2024).

Tabel 4-1: Ontwikkeling oppervlakte van het bekken.

	Oppervlakte bekken [km ²]
1992	690,4
1998	685,0
2004	680,6
2019	675,8
2016	661,8
2022	664,8

4.5 Samenvatting

De belangrijkste bevindingen uit dit hoofdstuk zijn:

- De buitendelta wordt landwaarts verplaatst, waarbij veel volumeafname plaatsvindt op de diepe vooroever en rand van de buitendelta. Dit is nog een reactie op het afsluiten van de Zuiderzee;
- Desondanks groeien er nog steeds kleinschalige aanlandingsbanken en hoge, centrale banken in het zeegat. De oriëntatie van de aanlandingsbanken is veranderd van kustlangs naar kustdwars. Een voorbeeld van een hoge, centrale bank is Engelschhoek, die het bekken in migreert;
- Door een heroriëntatie van de getijstrooming als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee, zijn de wantijen in noordoostelijke richting verschoven. Hierdoor neemt het oppervlakte van het bekken af. Ook het getijprisma door het zeegat neemt nog licht af;

- Het sedimentvolume in het bekken neemt toe. Gemiddeld gezien vullen de geulen zich op. Sedimentatie vindt plaats op de platen langs de vastelandskust en op enkele platen rondom het zeegat. De platen centraal in het bekken eroderen voornamelijk.

5 Morfologische ontwikkeling eilandkop Vlieland

5.1 Inleiding

De eilandkop van Vlieland wordt gekenmerkt door structurele erosie, door de aanwezigheid van geulen vlak langs de eilandkust. Door de aanleg van strandhoofden en het uitvoeren van suppleties is deze erosie grotendeels ondervangen. Op twee locaties spelen er specifieke problemen:

- Structurele erosie bij Vlieland Noordoost, waar het Zuiderstortemelk overgaat naar de centrale eilandkust;
- Erosie van het Havenstrand, waar in 2023 nog een strandval is opgetreden.

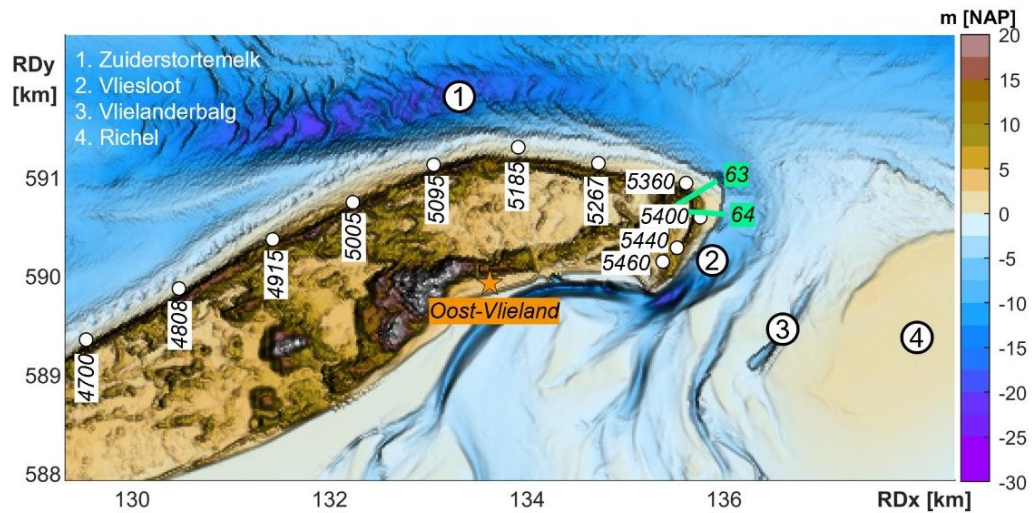
Dit hoofdstuk beschrijft de hydrodynamica (Hoofdstuk 5.3) en morfologie (Hoofdstuk 5.4) rondom de eilandkop voor de periode 1992-2022. De morfologische ontwikkeling wordt besproken aan de hand van drie secties van de eilandkop: Vlieland Noordoost, Vlieland Oostkop en Vlieland Havenstrand.

5.2 Overzicht van de eilandkop

De eilandkop van Vlieland grenst aan de geulen Zuiderstortemelk en Vliesloot (Figuur 5-1). Deze geulen bepalen in grote mate de kustlijnontwikkeling in het noordoosten van Vlieland. De Vliesloot heeft zich in de afgelopen twee eeuwen ingegraven in keileemlagen en ligt daardoor nu vrij stabiel, maar zorgt wel voor hoge stroomsnelheden dicht onder de kust. Door duinafslag toegeleverd zand wordt afgevoerd door de geul, maar er is weinig natuurlijke aanvoer van zand naar het duin. De zeereep heeft zich in het verleden daarom landwaarts verplaatst.

Vanaf 1854 zijn er daarom 64 strandhoofden aangelegd om de erosie tegen te gaan. Deze liggen vanaf raai 4100 richting het oosten. In 1995 zijn de laatste twee strekdammen gebouwd, strekdam 63 en 64 (zie Figuur 5-1 voor ligging) in 1995. Deze strandhoofden houden de stroming op afstand van de kust, waardoor de doorgaande erosie en terugtrekking van de kustlijn is gestopt. Er is echter nog steeds opwoeling van zand door golven, welk zand vervolgens door de geul wordt afgevoerd. Aanvoer van zand wordt verzorgd door de kustlangse aanvoer van zand, vooral bij strekdam 63 en 64 is zichtbaar dat veel zand wordt gevangen. Lokaal zijn de dammen dus heel efficiënt.

Ten zuiden van deze strekdammen, langs de oostkust van Vlieland, treedt nog steeds erosie op. Er is waarschijnlijk onvoldoende aanvoer van zand helemaal richting het Havenstrand. Hier is de kustlijn moeilijk te handhaven met suppleties, omdat reguliere suppleties niet mogelijk zijn. Het Havenstrand wordt periodiek aangevuld door per as zand aan te voeren. Suppleties van reguliere omvang zijn hier niet mogelijk door de beperkte beschikbare ruimte, het strand grenst aan de diepe getijdengeul de Vliesloot. In 2023 heeft hier, tijdens de uitvoering van een strandsuppletie, een strandval plaatsgevonden: er is toen een gedeelte van het Havenstrand in de stroomgeul verdwenen. Hierbij is ook de duinvoet met inbegrip van een bestorting beschadigd geraakt. Ook in december 2022 had er al autonoom een strandval plaatsgevonden.



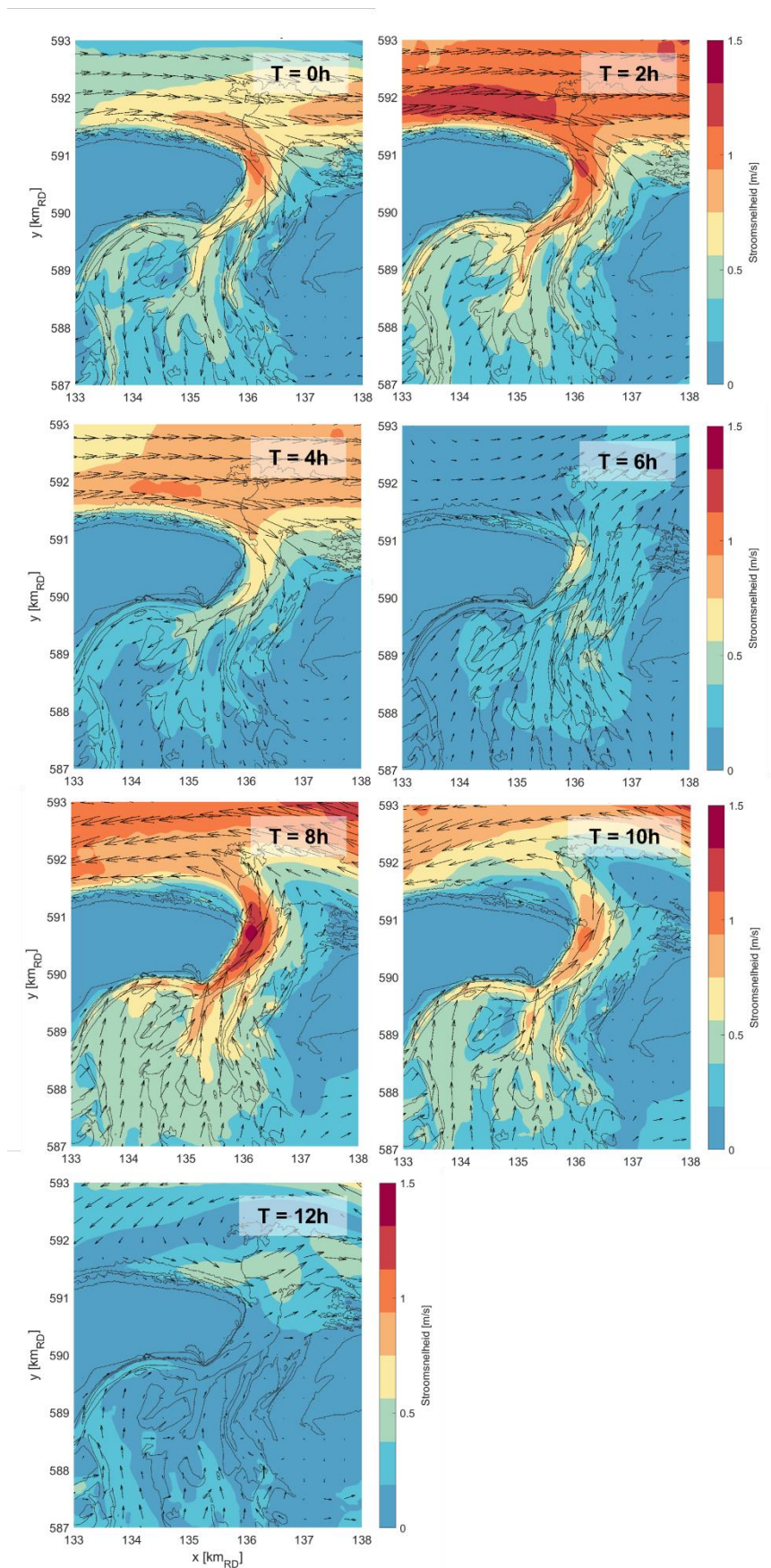
Figuur 5-1: Oostkop van Vlieland op basis van de gecombineerde Vaklodingen, Jarkus, LiDAR en AHN data. De ligging van enkele jarkusraaien, strekdam 63 en 64, Oost-Vlieland en de belangrijkste geulen en platen is weergegeven.

5.3 Hydrodynamica rondom eilandkop

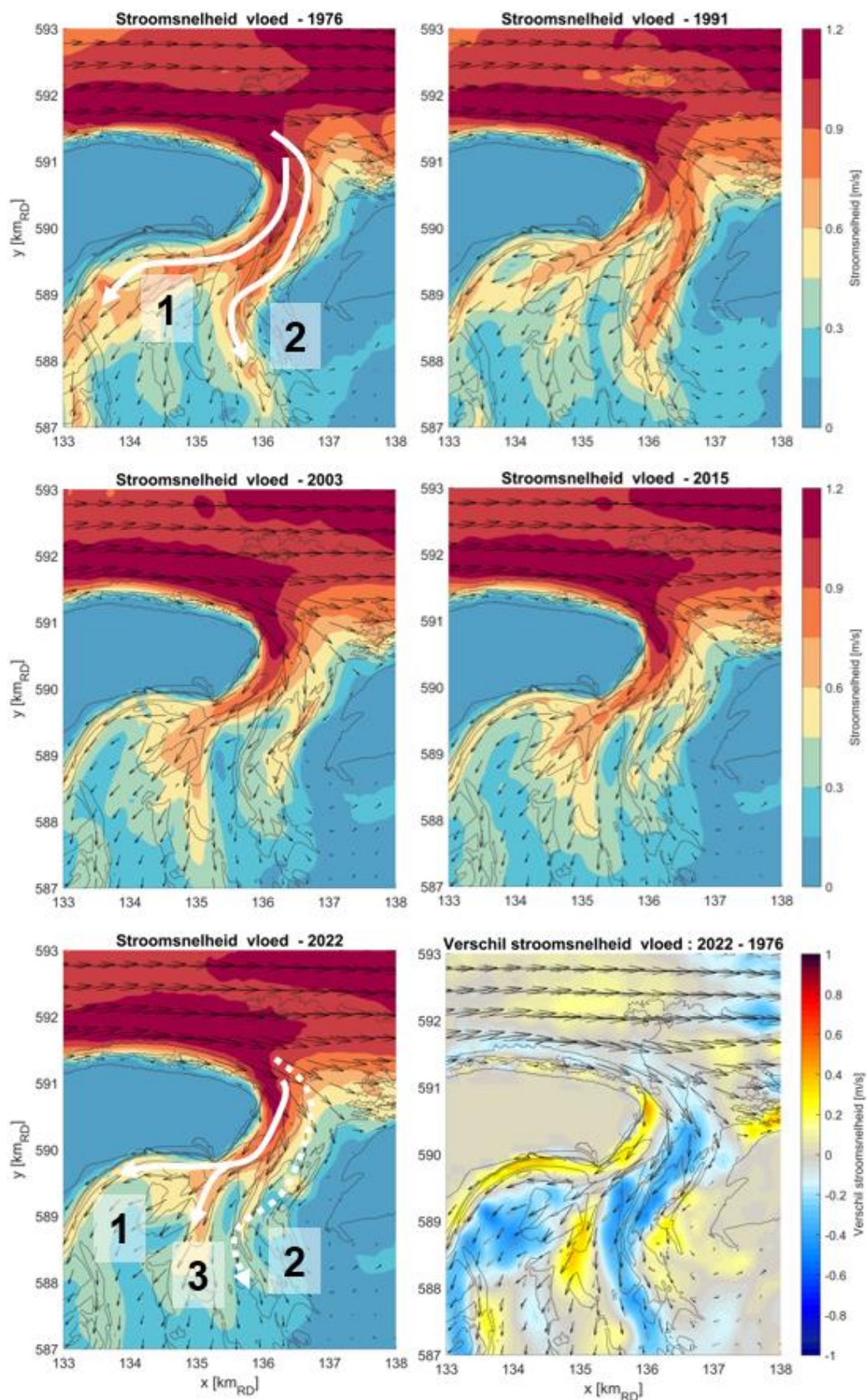
Met behulp van modelsimulaties kan inzicht verkregen worden in de hydrodynamica rondom de eilandkop en de veranderingen daarin over de tijd. Figuur 5-2 toont de stromingspatronen gedurende een gemiddeld getij rondom de eilandkop voor de bodem van 2022. De vloedstroming stroomt van west naar oost rond de eilandkop het bekken in, tijdens eb in omgekeerde richting. Er lijkt geen duidelijk faseverschil te zijn tussen de geulen rondom de eilandkop.

Figuur 5-3 toont voor de modelsimulaties van de verschillende jaren de stromingspatronen tijdens vloed (voor eb zie Bijlage B.1). In het verleden bestonden er in het bekken duidelijk twee geulen, de Vliesloot en de Vlielandbalg. De Vlielandbalg had toen een directe connectie met het Zuiderstortemelk. Tussen 1976 en 2022 is de stroming door deze geul verminderd. De stroomsnelheden in de Vliesloot lijken licht toe te nemen, vooral ten westen van het Havenstrand en tussen het Havenstrand en de oostkop. De toename van de stroomsnelheid is groter tijdens vloed dan tijdens eb (Bijlage B.1).

Met het verminderen van de stroming door de Vlielandbalg lijkt het alsof er een nieuwe, zuidelijk georiënteerde stroming ontstaat vanuit de Vliesloot, welke westelijker aansluit op de Vliesloot dan de originele Vlielandbalg. Er vormt echter geen nieuwe, directe verbinding vanaf het Zuiderstortemelk. Het verminderen van de stroming door de Vlielandbalg is consistent met het verminderen van het getijprisma en debieten tussen de eilandkop van Vlieland en Richel. Door het verminderen van het debiet, concentreert het resterende debiet zich meer in een enkele geul (Vliesloot). Hier kunnen de stroomsnelheden vervolgens licht toenemen.

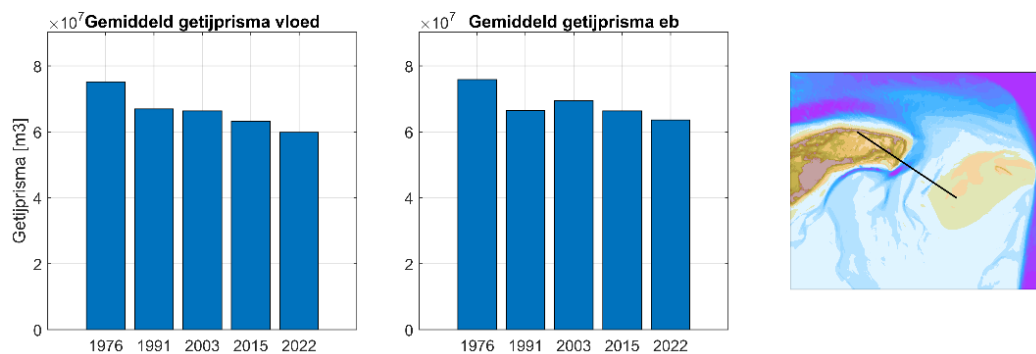


Figuur 5-2: Stromingspatronen rondom de eilandkop gedurende een gemiddeld getij om de 2 uur voor de 2022 bodem.

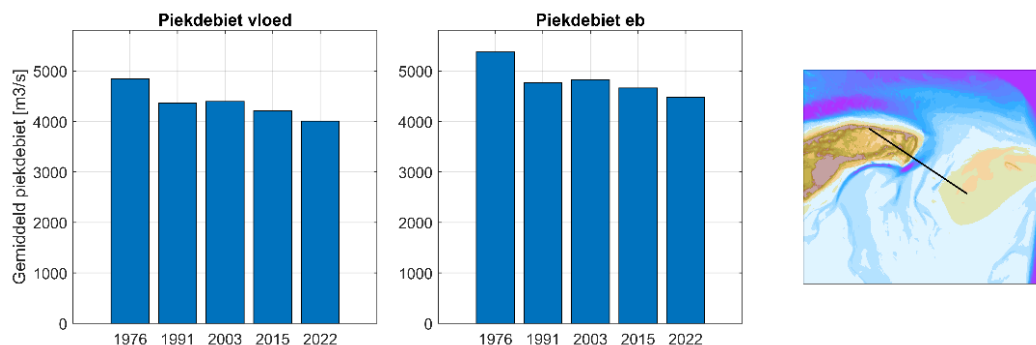


Figuur 5-3: Stromingspatronen rondom eilandkop tijdens vloed voor de modelsimulaties van 1976 – 2022.

Figuur 5-4 toont het gemiddelde getijprisma bij vloed en eb wat tussen de eilandkop van Vlieland en Richel door het bekken in stroomt (volgens modelberekeningen). Dit getijprisma door Vliesloot en Vlielandbalg is zowel tijdens eb als vloed afgenomen sinds 1976. Het gemiddelde getijprisma tijdens eb neemt met 16% af, het gemiddelde getijprisma tijdens vloed met 20%. Waar in 1976 het getijprisma door de Vliesloot en de Vlielandbalg tijdens vloed en eb nog erg vergelijkbaar was, was in 2022 het getijprisma volgens modelsimulaties tijdens eb licht groter dan tijdens vloed (Figuur 5-4). Ten opzichte van het verschil in getijprisma door het gehele zeegat (Hoofdstuk 4.3), is de afname door de Vliesloot/Vlielandbalg respectievelijk 22 en 30% van de afname door het gehele zeegat voor eb en vloed. Ook de piekdebieten tijdens eb en vloed nemen af (Figuur 5-5), met 17%. Interessant is dat de Waardgronden verdiepen, terwijl volgens de modelberekeningen het getijprisma afneemt. Het is nog onduidelijk hoe dit precies komt.



Figuur 5-4: Verandering van het gemiddeld getijprisma tijdens vloed en eb door de Vliesloot en Vlielandbalg



Figuur 5-5: Verandering van het piekdebiet tijdens vloed en eb door de Vliesloot en Vlielandbalg.

5.4 Morfologie rondom eilandkop

5.4.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt de morfologische ontwikkeling rondom de eilandkop besproken. Hierbij worden de volgende onderdelen van de kust behandeld:

- Vlieland Noordoost (raai 4700-5095);
- Vlieland Oostkop (raai 5095-5400);
- Vlieland Havenstrand (raai 5400-5460).

5.4.2 Vlieland Noordoost (raai 4700 – 5095)

Elias (2021a) beschrijft de morfologische ontwikkeling van Vlieland Noordoost (raai 4700-5095) en de dominante processen in detail. Hier wordt een samenvatting gegeven. Dit stuk kust is de overgangszone van de centrale eilandkust naar het getij gedomineerde zeegat.

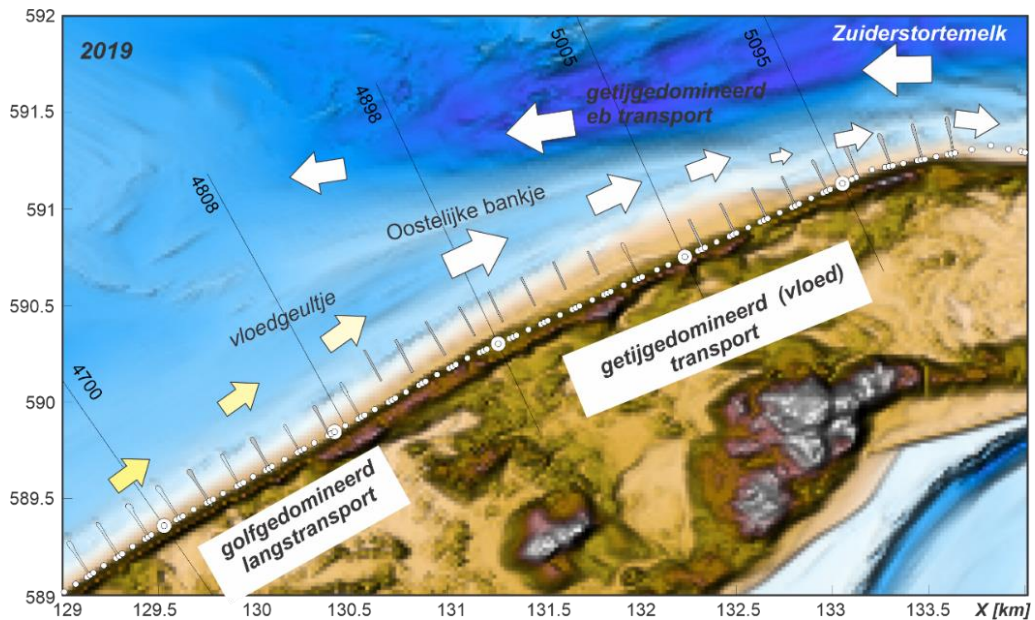
Structurele erosie treedt op, wat wordt ondervangen met suppleties. Langs een deel van dit traject ligt de momentane kustlijn (MKL) landwaarts van de basiskustlijn (BKL), en is ook de trend landwaarts gericht (Rijkswaterstaat, 2024).

De kusterosie is gerelateerd aan de vloedstroming die tussen de ebstroom in het Zuiderstortemelk en de kust wordt geperst (Figuur 5-6). Afhankelijk van de exacte ligging van de geulen en bankjes rond het Zuiderstortemelk treden er versnellingen en vertragingen van de stromingen op, wat resulteert in gebieden met sedimentatie of erosie, en daarmee in terugtrekking of uitbouw van de kustlijn (erosie tussen raai 4700 en 4988, uitbouw tussen raai 5005 en 5095). De erosie wordt sinds 1997 bestreden met zandsuppleties. Met een vooroeversuppletie in 2009 is het vloedgeultje dichtgezet. Met het dichtzetten van het geultje verdwijnt de vloedstroming echter niet, en na de suppletie zijn nieuwe kustlangse vloedgeultjes ontstaan tussen het Zuiderstortemelk en de kust in. De vooroeversuppletie van 2005 heeft hier waarschijnlijk aan bijgedragen: door deze suppletie is een brekerbank zeewaarts verschoven waardoor ruimte ontstond voor de vorming van een vloedgeultje. Ook deze nieuwe geultjes veroorzaken erosie van de naastliggende kustlijn. De locaties zijn enigszins verschoven, maar de problematiek blijft bestaan: de stroming neigt terug naar de oude loop gegaan zolang de ruimte daartoe bestaat. Ook strandsuppleties in 2013 en 2018 hebben niet geholpen: deze hebben het geultje niet volledig dichtgezet, waardoor het zand snel kustlangs werd afgevoerd.

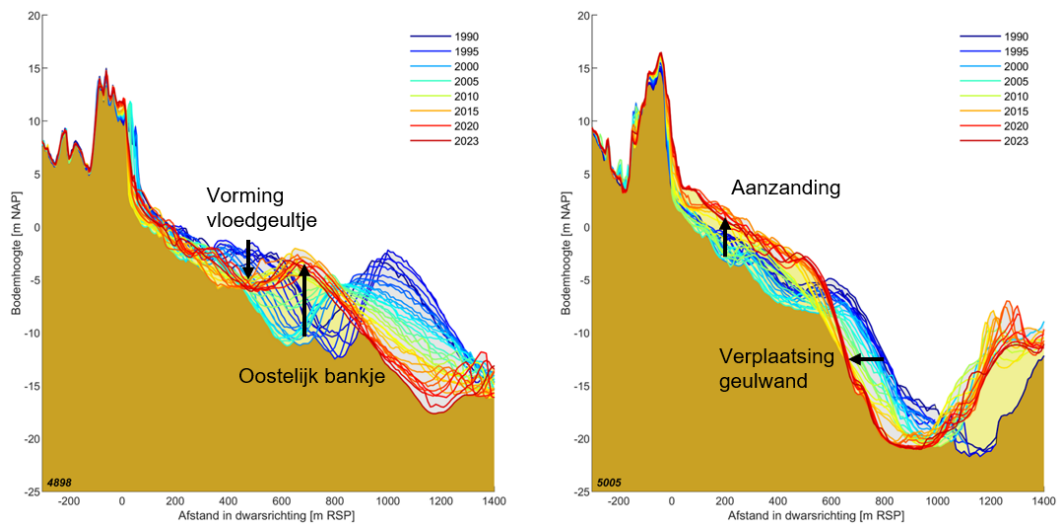
De erosie wordt versterkt tussen raai 4808 en 5005 door de vorming van een nieuw bankje langs het Zuiderstortemelk (aangeduid als Oostelijk bankje in Figuur 5-6). Dit bankje ligt schuin op de kust, waardoor het tussenliggende geultje breder is aan de westzijde dan aan de oostzijde. De doorstroomoppervlakte wordt in oostelijk richting dus steeds kleiner, waardoor de stroomsnelheden toenemen. Tussen raai 5005 en 5095 neemt het doorstroomoppervlak dan weer sterk toe, waardoor hier lokaal aanzanding optreedt.

In raai 5005 schuift de geulwand van het Zuiderstortemelk richting de kust. In Figuur 5-8 is de bodemligging in 1992 en 2022 getoond, met een overzicht van de ligging van de banken en het Zuiderstortemelk. De vloedstroming loopt in beide situaties landwaarts van het Oostelijke bankje. Dit Oostelijke bankje sluit in 2022 bij het knikpunt van de eilandkop aan op de kust, waardoor het Zuiderstortemelk hier lokaal naar de kust toe kan verplaatsen.

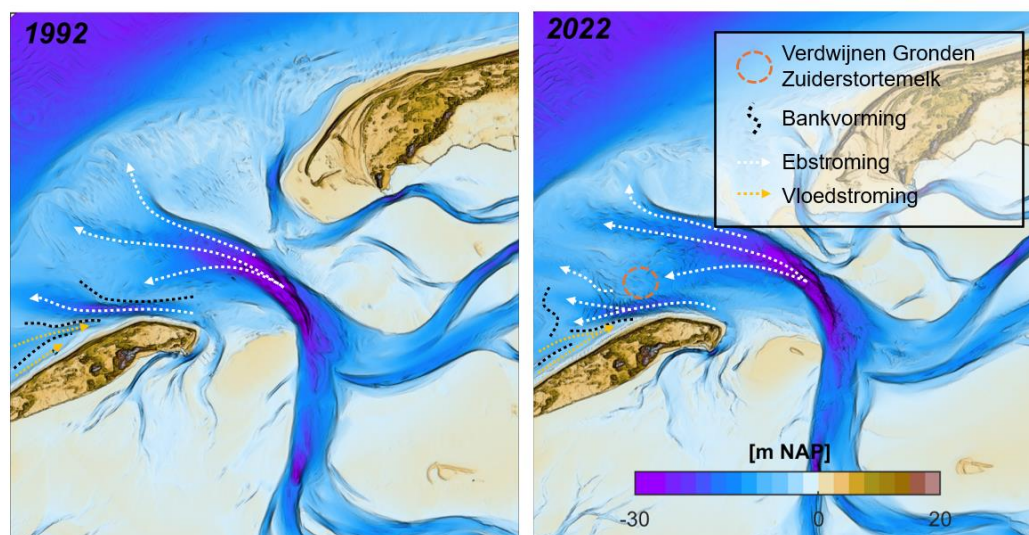
In Elias (2021a) is de optie van een systeemsuppletie in combinatie met een strandsuppletie op deze locatie geëvalueerd (3 en 2 miljoen m³ respectievelijk), die er op gericht is de vloedstroming door het geultje en daarmee de erosie van de strandsuppletie te reduceren. Systeemsuppleties zijn zandsuppleties waarbij invloed wordt uitgeoefend op de natuurlijke hydraulische en morfologische processen om het systeemgedrag verandert. Het doel van een systeemsuppletie is de kustlijn duurzamer, met meer gebruik van de natuurlijke processen, te handhaven.



Figuur 5-6: Overzicht van de dominante processen bij Vlieland Noordoost, overgenomen uit (Elias, 2021).



Figuur 5-7: Overzicht van de ontwikkeling van raai 4898 (links) en raai 5005 (rechts), op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.



Figuur 5-8: Conceptuele weergave van de eb- en vloedstroming in het Zuiderstortemelk en de Vliestroom en morfologische ontwikkeling.

5.4.3 Vlieland Oostkop (raai 5095 – 5400)

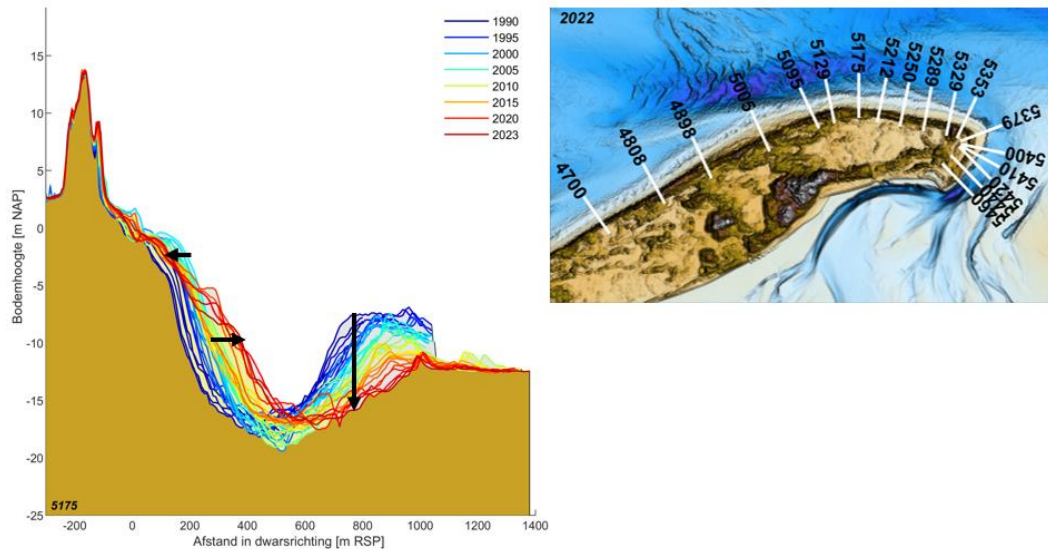
De oostkop van Vlieland wordt gekenmerkt door het ebdominante Zuiderstortemelk en Vliesloot die vlak om de eilandkop heen lopen. Hierdoor is een diepe geul direct langs het strand aanwezig, die efficiënt zand kan afvoeren tijdens eb (Elias, 2021b). De strandhoofden zorgen ervoor dat de geul op zijn plek blijft liggen. In het verleden trad erosie van de eilandkop op, welke is ondervangen door de aanleg van de strandhoofden en het aanbrengen van suppleties. De laatste strekdammen, strekdam 63 en 64, zijn aangelegd in 1995 (zie Figuur 5-1). In 2024 lag de MKL zeewaarts van de BKL en vertoont deze over het algemeen een zeewaartse trend (Rijkswaterstaat, 2024). De meest recente strandsuppleties zijn uitgevoerd in 2018 en 2023, in 2017 is een geulwandsuppletie in het Zuiderstortemelk aangebracht.

In Figuur 5-8 is een conceptuele weergave getoond van de eb- en vloedstroming rondom de oostkop van Vlieland. In 1992 had het Zuiderstortemelk een enkele uitstroom de buitendelta op, met een westelijke oriëntatie. De vloedstroming werd toen tussen het Oostelijk bankje en de kust geperst. In 2022 is de uitstroom van het Zuiderstortemelk in noordoostelijke richting (of: tegen de klok in) geroteerd (zie ook Elias, 2021b). Er hebben zich banken gevormd rondom de zuidelijke uitstromingen. De vloedstroming concentreert zich nog steeds langs de kust, al heeft zich een aansluiting gevormd tussen het Oostelijk bankje en de kust. Hierdoor ligt het Zuiderstortemelk lokaal dichter op de kust (raai 5095, Figuur 5-7).

De ontwikkeling van het Zuiderstortemelk wordt hierna beschreven aan de hand van een aantal representatieve Jarkus-profielen (Figuur 5-9 t/m Figuur 5-12), overige Jarkus-profielen van de oostkop zijn te vinden in Bijlage C. Een conceptuele weergave wordt gegeven in Figuur 5-13.

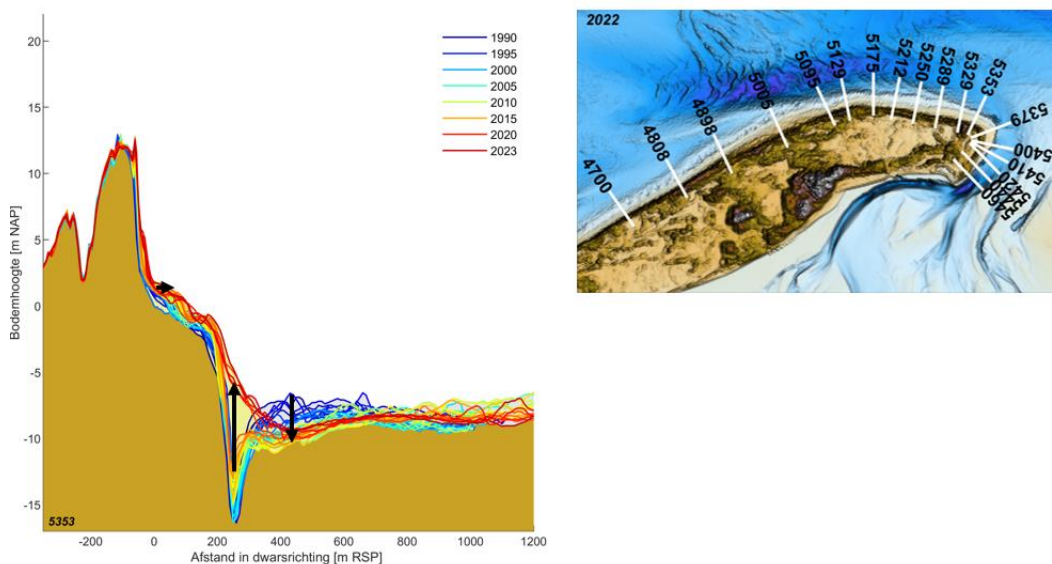
- **Bocht eilandkust naar eilandkop (raai 5129 en 5175, Figuur 5-9):** net om de bocht heeft de geulwand van het Zuiderstortemelk zich in zeewaartse richting uitgebouwd sinds 1990, waarschijnlijk door de aanwezigheid van de strandhoofden. Verdere uitbouw treedt op na 2017, door het aanbrengen van de geulwandsuppletie. Op raai 5129 wordt de geul dieper, op raai 5175 blijft de geuldiepte ongeveer gelijk. De Gronden van het Zuiderstortemelk, welke tussen het Zuiderstortemelk en de Vliestroom inliggen, nemen sterk af in hoogte (ca. 10 m), zie ook Figuur 5-8. Op raai 5175 is ook terugtrekking van

het strand te zien sinds 2005. Dit kan mogelijk komen door de verflauwing van de geulwand of door erosie door golven, de oorzaak is hier echter moeilijk te onderscheiden;



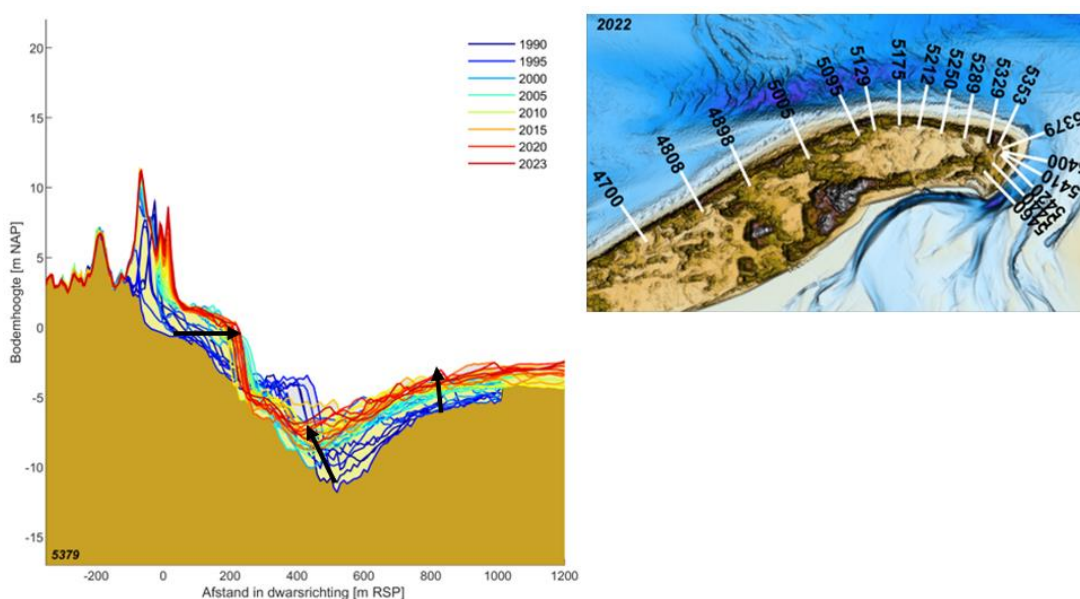
Figuur 5-9: Overzicht van de ontwikkeling van raai 5175, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.

- **Recht stuk eilandkop (raai 5212 – 5353, Figuur 5-10):** ook op dit traject is de geulwandsuppletie duidelijk terug te zien in de Jarkus profielen, net als de hoogteafname van de Gronden van het Zuiderstortemelk. De diepte van de geul laat geen grote verandering zien. Richting het oosten en de kromming in de kop (raai 5353) lag eerst een diepe geul op ca. NAP -15 m. Deze was zich al aan het opvullen, maar is verder opgevuld bij het aanbrengen van de geulwandsuppletie. De suppletie blijft stabiel liggen, waarschijnlijk omdat een natuurlijk proces versterkt wordt;

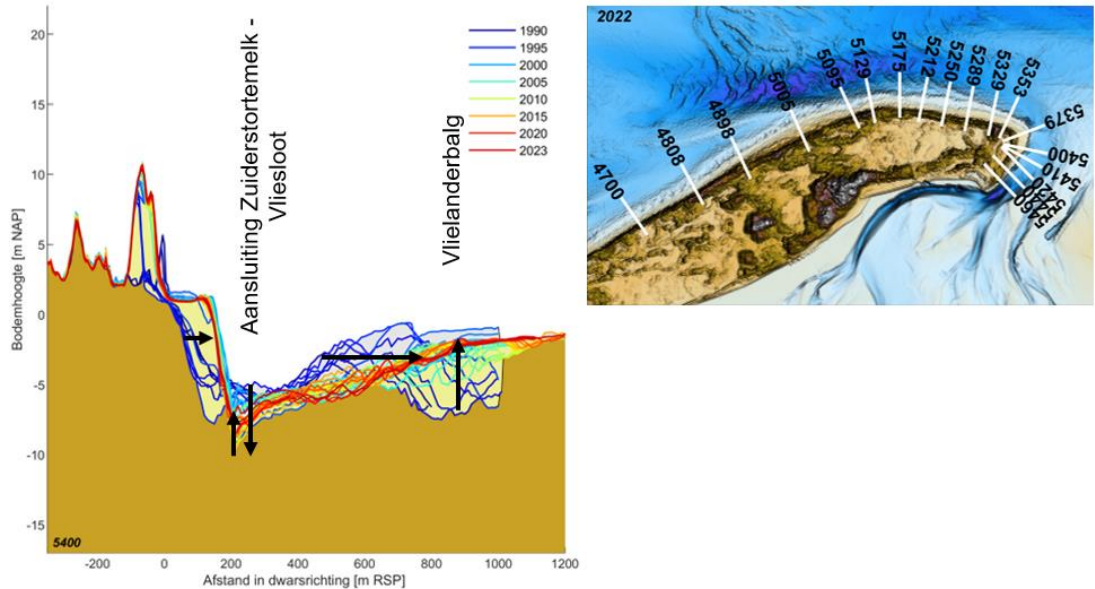


Figuur 5-10: Overzicht van de ontwikkeling van raai 5353, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.

- Rond strekdam 63 en 64 (raai 5379 en 5400, Figuur 5-11 en Figuur 5-12): ter hoogte van strekdam 63 (raai 5379) is de geulwand zeewaarts verschoven door de kustuitbouw als gevolg van aanleg van de strekdammen. De geulwand ligt nu strak tegen het uitgebouwde strand. Sinds 2005 is er weer een lichte verschuiving van de geulwand richting de eilandkust te zien. In 1990 lag het diepste punt van de geul ca. 500 m van de kust met een plateau ertussen op NAP -4 m. Dit plateau is wat verdiept naar NAP -5 m en veel minder breed geworden. Hiermee is het diepste punt van de geul richting de kust verschoven en is de geul veel ondieper geworden (van ca. NAP -13 naar NAP -7 m). De diepe uitlopers van Richel nemen wat toe in hoogte, maar trekken zich wel terug in zuidoostelijke richting (Figuur 5-13, Figuur 5-15). Ook net ten noorden van strekdam 64 (raai 5400) is na een sterke uitbouw van de kust de geulwand richting het zeegat verschoven. Hier gaat het Zuiderstortemelk over in de Vliesloot. Waar in 1992 de Zuiderstortemelk nog vooral overging in de Vlielanderbalg en er een drempel lag tussen Zuiderstortemelk/Vlielanderbalg en Vliesloot (zie Figuur 5-13), begint de Vlielanderbalg zich tussen 1992 en 1998 snel op te vullen. De verbinding tussen Zuiderstortemelk en Vliesloot wordt dieper en de stroming gaat nu vooral door deze verbinding. Tot ongeveer 2015 neemt de diepte van de geul hier toe, sindsdien is een lichte afname te zien.

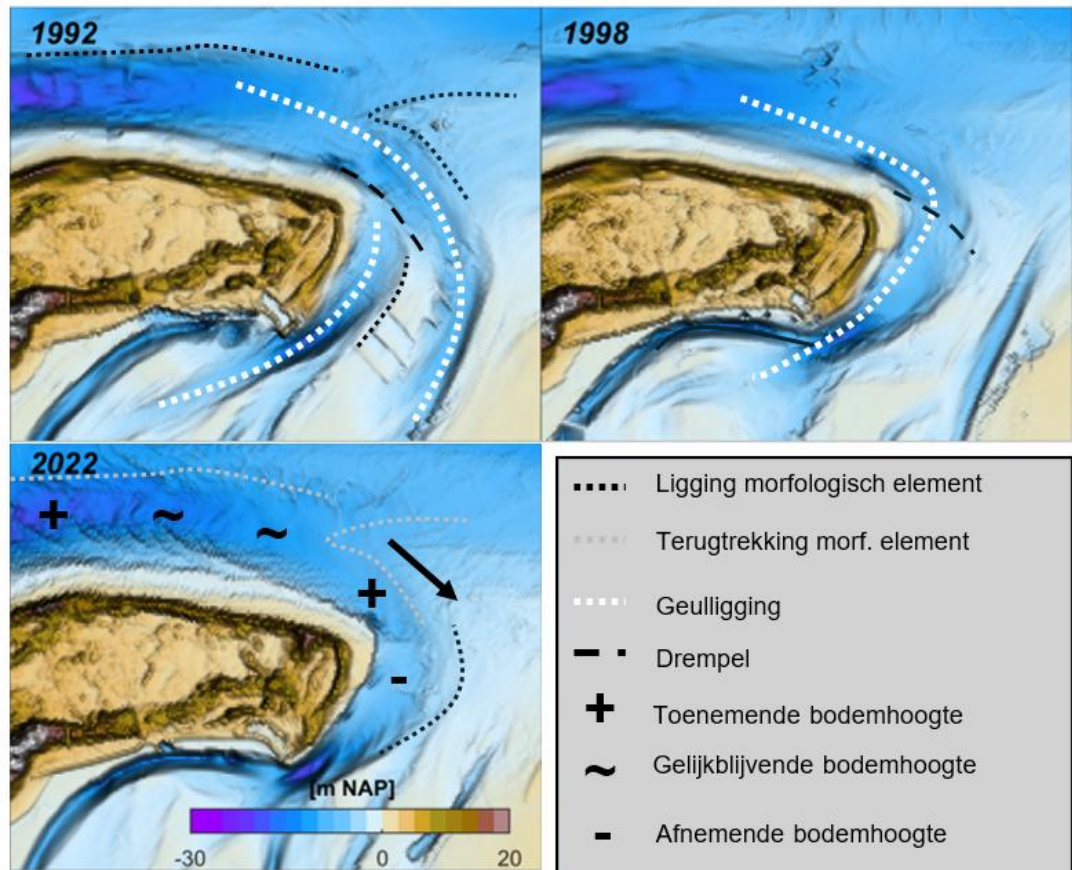


Figuur 5-11: Overzicht van de ontwikkeling van raai 5379, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.



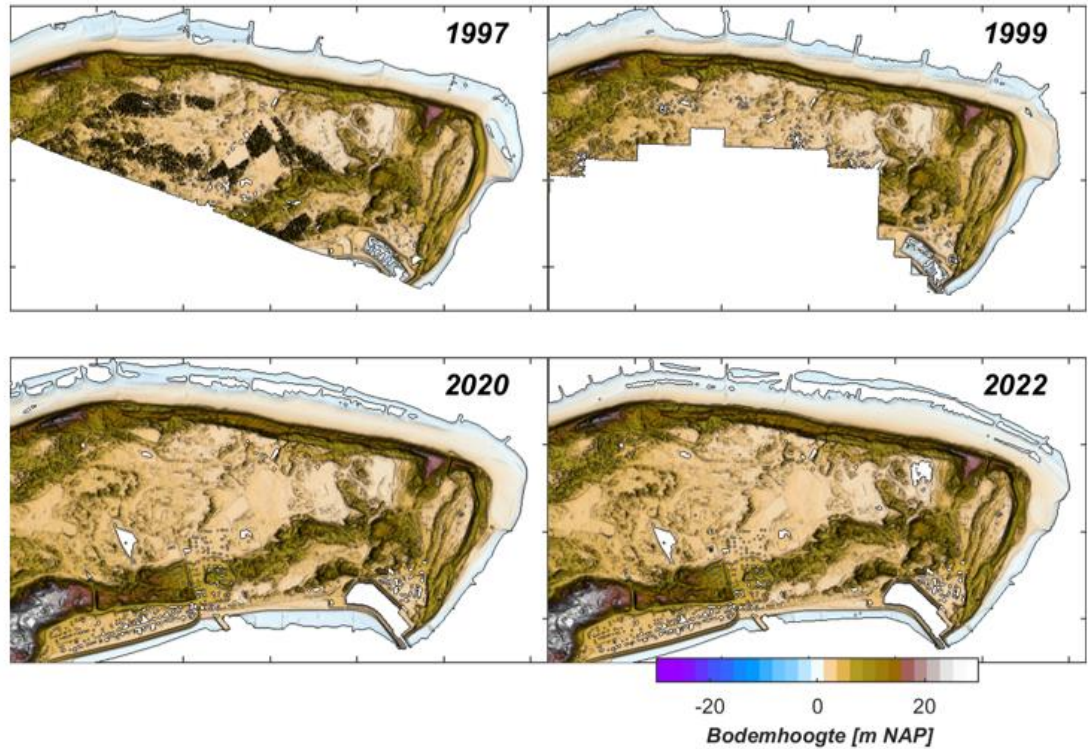
Figuur 5-12: Overzicht van de ontwikkeling van raai 5400, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.

Deze (ontwikkelingen in de) geulligging komen ook terug in de stromingspatronen tijdens eb en vloed (Figuur 5-3). De vloedstroming ligt strak langs de kust en komt door het opvullen van de Vlielanderbalg ter hoogte van strekdam 63 en 64 dicht op de kust te liggen, waar de stroomsnelheden toenemen. De ebstroming loopt wat verder van de kust af.

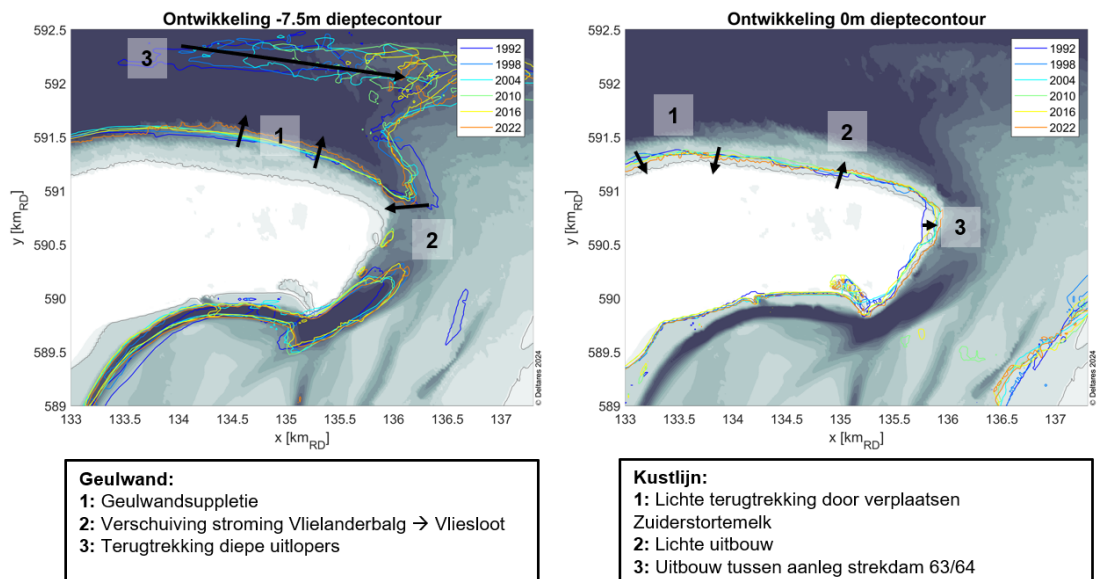


Figuur 5-13: Overzicht van de processen rondom de eilandkop van Vlieland.

In Figuur 5-14 zijn enkele LIDAR beelden getoond tussen 1997 en 2022. De ligging van de strekdammen is goed te zien. Tussen strekdam 63 en 64 is een sterke uitbouw van de kust te zien, als gevolg van de aanleg van de dammen en strandsuppleties in 2018 (strandsuppletie van 2023 is hierin nog niet te zien). Ook langs het rechte stuk van de eilandkop vindt uitbouw van het strand plaats, voornamelijk aan oostelijke zijde. Figuur 5-15 toont de NAP 0m-contourlijn: de uitbouw van de kust tussen strekdam 63 en 64 komt duidelijk naar voren, net als de lichte uitbouw ten westen daarvan. In de bocht van de eilandkust naar de eilandkop, waar het Zuiderstortemelk lokaal dichter op de kust ligt, trekt de kustlijn zich wat terug. Over het algemeen is de ligging van de kustlijn vrij stabiel, door de aanwezigheid van de strandhoofden en de aangebrachte suppleties. Dit blijkt ook uit de Jarkus-profielen: variatie in de kustligging, maar geen structurele erosie. Door de aanwezigheid van de strandhoofden kan het Zuiderstortemelk zich ook niet verder richting de kust verplaatsen.



Figuur 5-14: LiDAR data rondom de eilandkop van Vlieland voor de jaren 1997, 1999, 2020 en 2022.

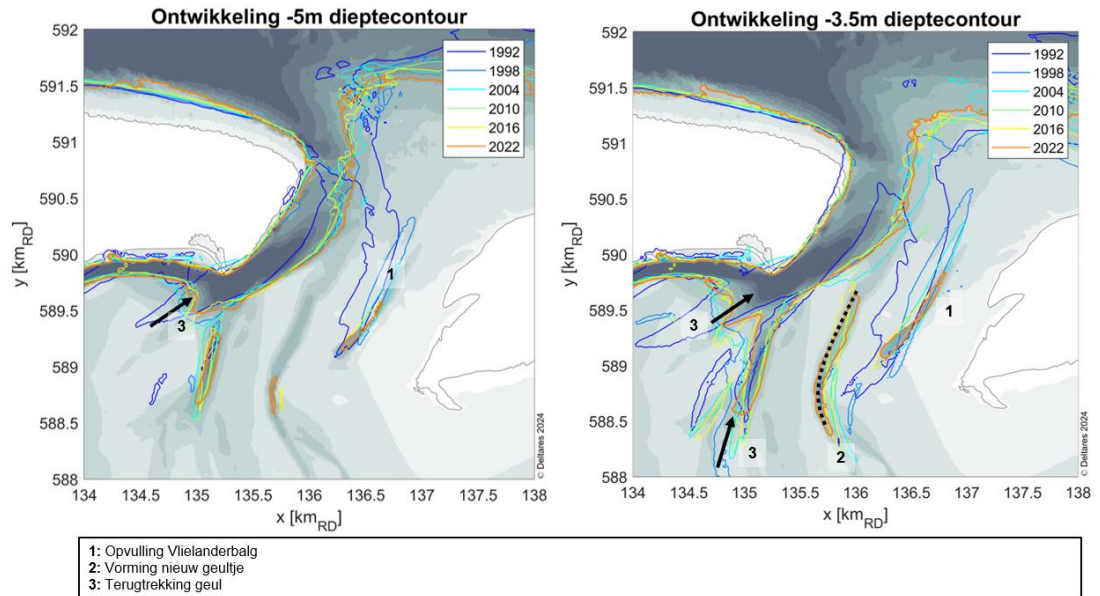


Figuur 5-15: Contourlijnen op NAP -7,5 m en NAP 0 m.

5.4.4 Havenstrand (raai 5400 – 5460)

Dit stuk van de eilandkust wordt gekenmerkt door de ligging van de Vliesloot langs de eilandkust en het optreden van structurele erosie bij het Havenstrand. Ten zuiden van strekdam 64 liggen nog drie korte dammen, met ten zuiden daarvan het Havenstrand en de havenhoofden. Deze drie dammen zijn aangelegd om de lij-erosie van strekdam 63 en 64 (Figuur 5-1) tegen te gaan. Net ten zuiden van strekdam 64 ligt de MKL zeewaarts van de BKL (Rijkswaterstaat, 2024), maar is wel een landwaartse trend zichtbaar. Ter hoogte van het Havenstrand ligt de MKL landwaarts van de BKL met een landwaarts gerichte trend.

Figuur 5-16 toont de ligging van de NAP -5 m en NAP -3,5 m contourlijnen tussen 1988 en 2022. De ontwikkeling van de contourlijnen bevestigt het beeld wat eerder werd geschetst op basis van de hydrodynamische modelsimulaties: waar in het verleden in het bekken twee dominante geulen waren (Vliesloot en Vlielandbalg), is dat veranderd naar een systeem waar de Vliesloot dominant is. In de contourlijnen is te zien dat de Vlielandbalg zich aan het opvullen is en dat deze geen directe verbinding meer maakt met het Zuiderstortemelk (zie ook Figuur 5-13).

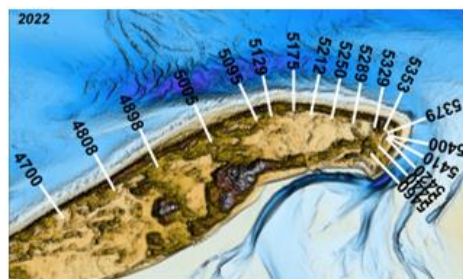
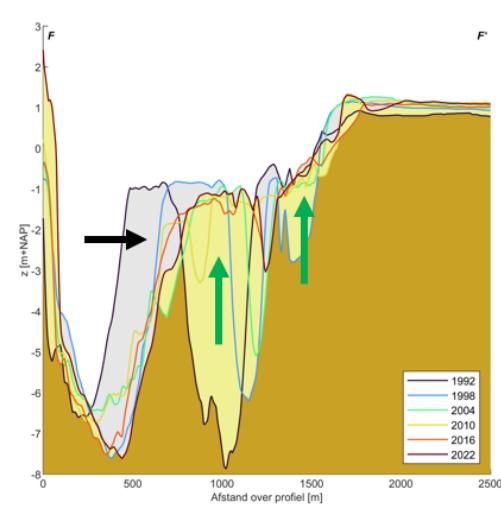
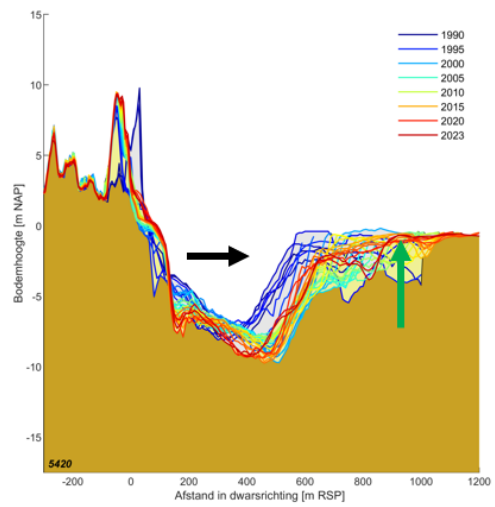
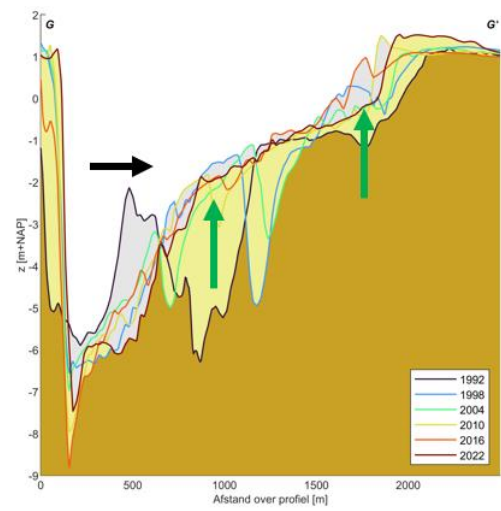
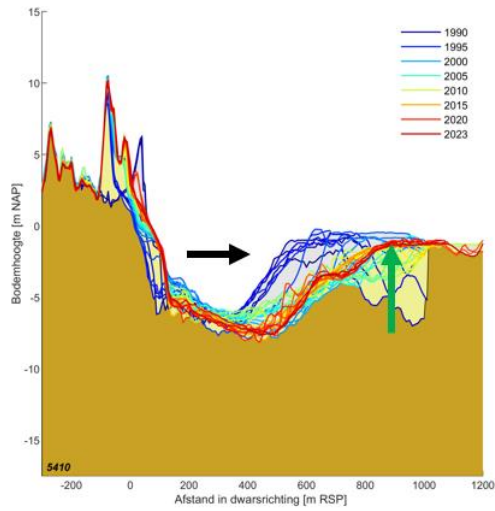


Figuur 5-16: Overzicht van de morfologische ontwikkelingen rondom Vliesloot en Vlielandbalg, op basis van de NAP -5 m en NAP -3,5 m contourlijn van de vaklodingen.

De Vliesloot loopt strak om de eilandkop heen. Uit de resultaten van de hydrodynamische modelsimulaties blijkt dat de stroomsnelheden rondom de eilandkop licht toenemen (Figuur 5-3). Dit lijkt vooral het geval te zijn ten westen van het Havenstrand en tussen het Havenstrand en de oostkop. Dit kan verklaard worden door het afnemen van het getijprisma tussen de eilandkop en Richel en het opvullen van de Vlielandbalg; hierdoor zou het resterende debiet zich kunnen concentreren in de Vliesloot. In 1992 (modelsimulatie 1991) was er ten zuidwesten van de Haven nog een geultje zichtbaar met zuidwestelijke oriëntatie, deze heeft zich sindsdien teruggetrokken en is vrijwel verdwenen. De uitstroom in zuidelijke richting ten zuiden van de Haven blijft wel bestaan, maar is zich aan het terugtrekken. Ten westen van de Vlielandbalg is een nieuw geultje ontstaan met zuidelijke oriëntatie, maar dit is geen doorgaande geul met verbinding met het Zuiderstortemelk.

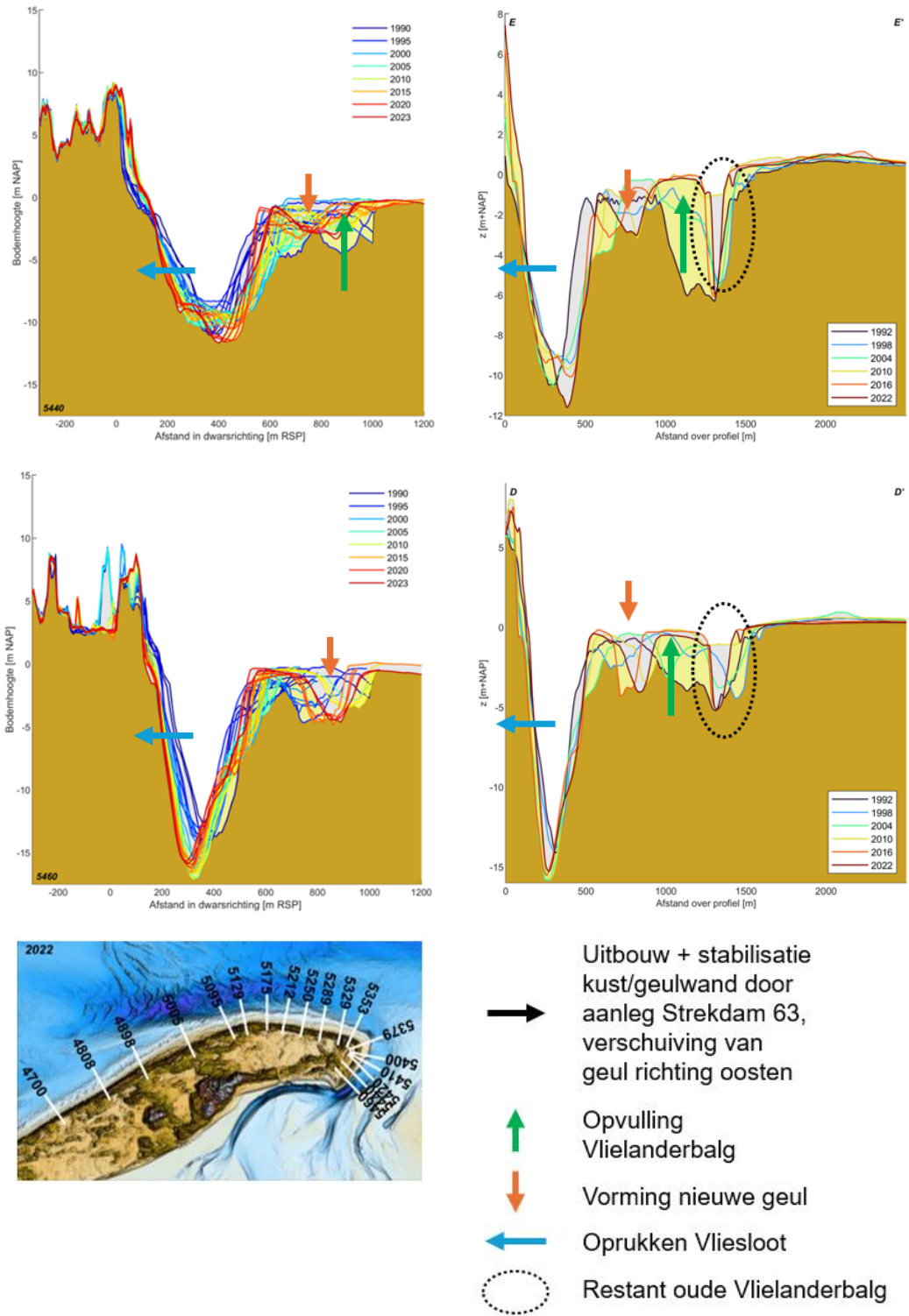
De ontwikkeling van de geulen en platen is ook te zien in verschillende profielen rondom de eilandkop, op basis van Jarkus en vaklodingen data (Figuur 5-17 en Figuur 5-18). Net ten zuiden van strekdam 64 heeft de landwaartse geulwand van de Vliesloot zich gestabiliseerd sinds 1995 door kustuitbouw als gevolg van strekdam 63/64. De geul is verschoven richting het zeegat en dieper geworden (raai 5410 en 5420). Opvulling van de Vlielandbalg is zichtbaar. Ter hoogte van het Havenstrand (raai 5440 en 5460) is de geul richting de kust verplaatst, is de geulwand steiler geworden en is de geul dieper geworden. In raai 5460 treedt sinds 2010 weer wat verondieping op. In alle profielen is de opvulling van Vlielandbalg zichtbaar, met in profiel C en D de vorming van het nieuwe, zuidelijk georiënteerde geultje en de restanten van de Vlielandbalg.

De opvulling van de Vlielandbalg gaat niet gepaard met een verplaatsing van de plaat Richel richting de eilandkust. De ligging van Richel is vrij stabiel (Figuur 5-19). Het droogliggende deel van Richel ($> \text{NAP} +1 \text{ m}$) groeit in oppervlakte, sedimentvolume en hoogte, maar deze uitbreiding treedt op in zuidoostelijke richting. Richel lijkt dus niet als geheel richting de eilandkop van Vlieland te verplaatsen.

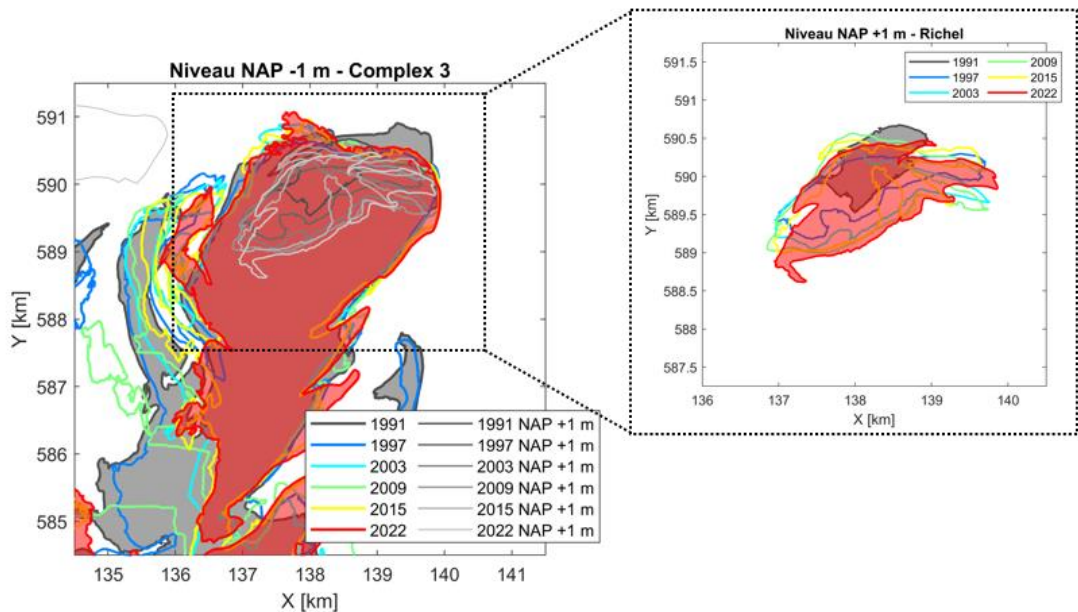


-  Uitbouw + stabilisatie kust/geulwand door aanleg Stredam 63, verschuiving van geul richting oosten
-  Opvulling Vlielandbalg
-  Vorming nieuwe geul
-  Oprukken Vliesloot
-  Restant oude Vlielandbalg

Figuur 5-17: : Overzicht ontwikkeling raai 5410 (G, boven), raai 5420 (F, onder) op basis van Jarkus-data voor de periode 1990-2023 (links) en Vaklodingen data voor de periode 1992-2022 (rechts). Let op: de horizontale as voor de Jarkus- en Vaklodingen profielen verschilt.

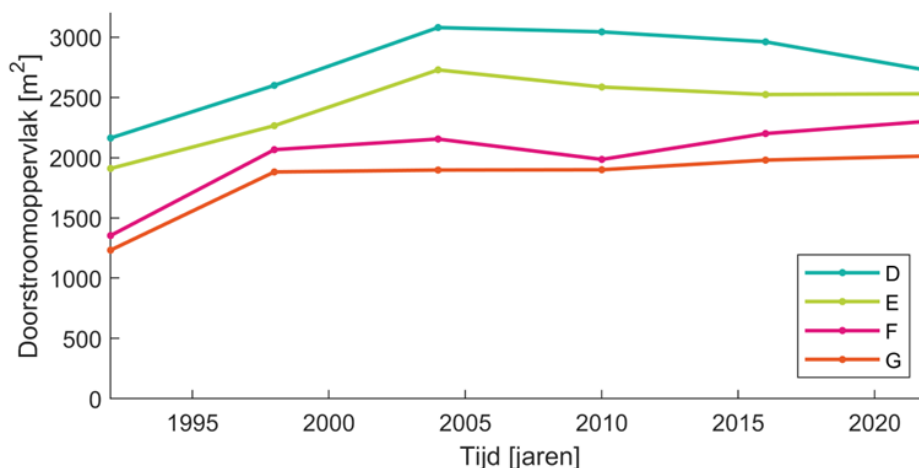


Figuur 5-18: Overzicht ontwikkeling raai 5440 (E, boven) en raai 5460 (D, onder) op basis van Jarkus-data voor de periode 1990-2023 (links) en Vaklodingen data voor de periode 1992-2022 (rechts). Let op: de horizontale as voor de Jarkus- en Vaklodingen profielen verschilt. Let op: de horizontale as voor de Jarkus- en Vaklodingen profielen verschilt.



Figuur 5-19: Ligging van Richel, op basis van de NAP -1 m contourlijn (droogvallend deel) en de NAP +1 m contourlijn (droogliggend deel).

Met de ontwikkelingen in het geulenstelsel rondom de eilandkop verandert ook het doorstroomoppervlakte van de Vliesloot (Figuur 5-20 en Bijlage D). Het doorstroomoppervlakte is bepaald op basis van de vaklodingen data. De doorsnedes hier getoond (D-G) komen overeen met de doorsnedes uit Figuur 5-17 en Figuur 5-18. Tussen 1992 en 1998/2004 neemt het doorstroomoppervlakte toe in alle vier de doorsnedes. Voor profiel D, gelegen ter hoogte van het Havenstrand, komt dat door verdieping en verbreding van de geul, voor profiel E, F en G door verbreding van de geul. Tussen 1998 en 2022 neemt het doorstroomoppervlakte op profiel F en G heel licht toe, voornamelijk door verdieping van de geul. Het doorstroomoppervlakte voor profiel D en E neemt sinds 2004 af door het ondieper worden van de geul bij D en een versmalling bij E. Over de gehele periode was het doorstroomoppervlakte het grootst bij het Havenstrand (D) en het kleinst bij de aansluiting Zuiderstortemelk-Vliesloot (G). Het teruglopen van het doorstroomoppervlakte bij het Havenstrand sinds 2004 (D) kan terug worden gezien in een toename van de stroomsnelheden (H. 5.3).



Figuur 5-20: Ontwikkeling van het doorstroomoppervlakte (onder de -2.2 m) op basis van vaklodingen data door doorsnede G (verlengde raai 5410), F (verlengde raai 5420), E (verlengde raai 5440) en D (verlengde raai 5460).

De ontwikkelingen van de geulen rondom dit stuk van de eilandkop en de uitgevoerde ingrepen werken door in de ontwikkeling van de kust. Aan de hand van vier raaien wordt deze besproken (Figuur 5-14, Figuur 5-15, Figuur 5-17 en Figuur 5-18):

- Ten zuiden van strekdam 64 (raai 5410/G en raai 5420/F): na aanleg van strekdammen 63 en 64 heeft de kust zich snel uitgebouwd en is de geulwand richting het zeegat opgeschoven (ca. 100 m). De ligging van de geulwand is sindsdien redelijk stabiel. In eerste instantie vond op het strand lij-erosie plaats van strekdam 64. Daarna heeft het strand zich geleidelijk uitgebouwd, ondersteund door onder andere een strand-duinsuppletie in 1995 (ongeveer tegelijk met de aanleg van de strekdammen) en strandsuppleties in 2018 en 2023;
- Ten noorden van het Havenstrand (5440/E): de geulwand verplaatst hier richting de kust (tussen NAP -2 m en -9 m, ca. 100 m tussen 1992 en 2022) en wordt steiler. Het diepste punt van de geul verplaatst juist wat naar buiten en wordt dieper (ca. 1 m tussen 1992 en 2022). Na aanleg van de dammen en een strand-duinsuppletie heeft de strandzone zich uitgebouwd, net als de duinen. Net als de geulwand wordt ook het lage deel van het strand steiler (ca. tussen NAP 0 m en NAP -2 m);
- Havenstrand (raai 5460 / D): de geulwand verplaatst zich hier richting de kust (ca. 100 m sinds 1992) en wordt steiler. Ook het diepste punt van de geul verplaatst richting de kust en de geul wordt wat dieper (ca. 1-2 m). Sinds 1990 treedt structurele erosie van het strand op. Het strand wordt daarnaast steiler. In de Jarkus-profielen is de strandval van december 2022 te zien.

Door de aanleg van strekdam 63 en 64 is de eilandkust ten zuiden daarvan uitgebouwd en gestabiliseerd (raai 5410 en 5420). Er is daardoor ook meer ruimte voor suppleties. De Vliesloot ligt echter strak tegen het strand aan en kan efficiënt zand afvoeren tijdens eb. Door de aanwezigheid van de dammen zal de Vliesloot ook strak tegen de kust aan blijven liggen in de toekomst. Hierdoor zal dit stuk van de kust erosiegevoelig blijven. Net ten noorden van het Havenstrand (raai 5440) heeft het strand zich uitgebouwd door aanwezigheid van de dammen en suppleties, maar de Vliesloot beweegt zich hier richting de kust. De hogere stroomsnelheden dichtbij de kust zullen in de toekomst ook zorgen voor erosie. Hetzelfde geldt voor het Havenstrand (raai 5460).

5.5 Samenvatting

De belangrijkste bevindingen uit dit hoofdstuk zijn als volgt:

- **Vlieland Noordoost:** hier treedt structurele erosie op door de ligging van bankjes en vloedgeultjes vlak langs de kust. De vloedstroming wordt als het ware tussen de ebstroming van het Zuiderstortemelk en de kust in geperst. Suppleties met als doel het (gedeeltelijk) dichtzetten van deze geultjes hebben dit niet opgelost, steeds is een nieuw vloedgeultje gevormd;
- **Vlieland Oostkop:** het rechte stuk van de eilandkop kenmerkt zich door een relatief stabiele kustlijnpositie, door de aanwezigheid van de strandhoofden en het aanbrengen van suppleties. Door de geulwandsuppletie uit 2017 is de geulwand van het Zuiderstortemelk richting zee verschoven. Op de kop heeft de kust zich door de aanleg van strekdam 63 en 64 sterk uitgebreid. Waar het Zuiderstortemelk eerst nog een connectie had met de Vlielandbalg, loopt de stroming nu via een directe verbinding tussen het Zuiderstortemelk en de Vliesloot dicht om de kop heen;
- **Vlieland Havenstrand:** als gevolg van het opvullen van de Vlielandbalg en het daarmee concentreren van de stroming in de Vliesloot, komt de Vliesloot steeds dichterbij het strand te liggen. Hierdoor treedt structurele erosie op bij het Havenstrand en is er weinig ruimte voor suppleties.

6 Morfologische ontwikkeling eilandkop Terschelling

6.1 Inleiding

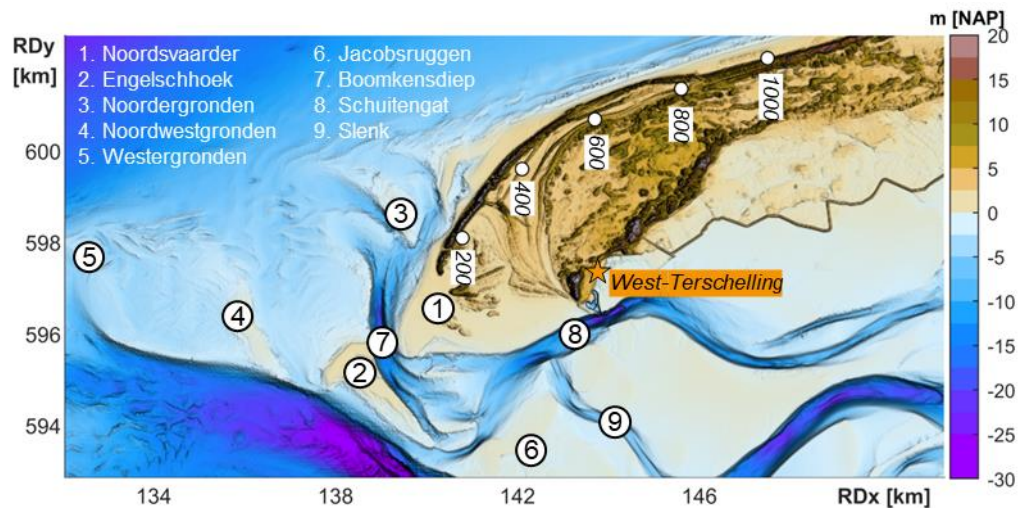
De eilandkop van Terschelling wordt gekenmerkt door structurele erosie van de Noordsvaarder door de aanwezigheid van geulen vlak langs de eilandkust. Er zijn lokaal nog geen suppleties nodig geweest voor kustlijnhandhaving, bij voortgaande erosie kan dit wellicht in de toekomst veranderen. De uitdaging rondom deze eilandkop is op dit moment vooral de vaargeulen naar de haven van West-Terschelling, die door grote geul- en plaatdynamiek in het gebied aan verandering onderhevig zijn. Daarnaast zorgt de structurele erosie van de Noordsvaarder voor een lokale overschrijding van de BKL.

Dit hoofdstuk beschrijft de hydrodynamica (Hoofdstuk 6.3) en morfologie (Hoofdstuk 6.4) rondom de eilandkop voor de periode 1992-2022. De morfologische ontwikkeling wordt besproken aan de hand van vijf subgebieden: de centrale eilandkust met de aanlandingsbanken (H. 6.4.2), de Noordsvaarder en Boomkensdiep (H. 6.4.3), Engelschhoek (H. 6.4.4), het drempelgebied en de Doorsteek (H. 6.4.5) en Slenk en Schuitengat (H.6.4.6).

6.2 Overzicht van de eilandkop

De kop van Terschelling ligt aan de geul Boomkensdiep (Figuur 6-1). In het zuiden van de kop bevindt zich het hoofddorp West-Terschelling. Direct ten zuidwesten van dit dorp ligt het natuurgebied de Noordsvaarder. De Noordsvaarder was een grote zandplaat, gescheiden van het eiland door het Westerboomgat. De zandplaat schoof steeds op naar het oosten en verzandde midden negentiende eeuw het Westerboomgat. Het kwam daardoor vast te zitten aan Terschelling. Sindsdien vindt er een grootschalige herverdeling van het aangelande zand over de eilandkust plaats. Deze herverdeling gaat gepaard met gebieden van erosie, maar ook gebieden met aanzanding. Er zijn geen harde verdedigingswerken aanwezig op de kop van Terschelling, de natuurlijke dynamiek kan hier ongestoord plaatsvinden.

Ten zuiden van de Noordsvaarder ligt de geul het Schuitengat. Het Schuitengat was in de periode 1831 – 1866 altijd verbonden met de Vliestroom (Quataert et al., 2020). Het vormde dan ook de belangrijkste toegangsheu naar de haven van Terschelling. Sinds 1991 heeft zich een ondiepe drempel gevormd, tussen Engelschhoek en Jacobsruggen, die het Schuitengat van de Vliestroom scheidt. Daarbij bevindt zich tussen het Schuitengat en Boomkensdiep een ondiepte, doorsneden door een complex stelsel van eb- en vloedscharen. Dit drempelgebied is zeer dynamisch.

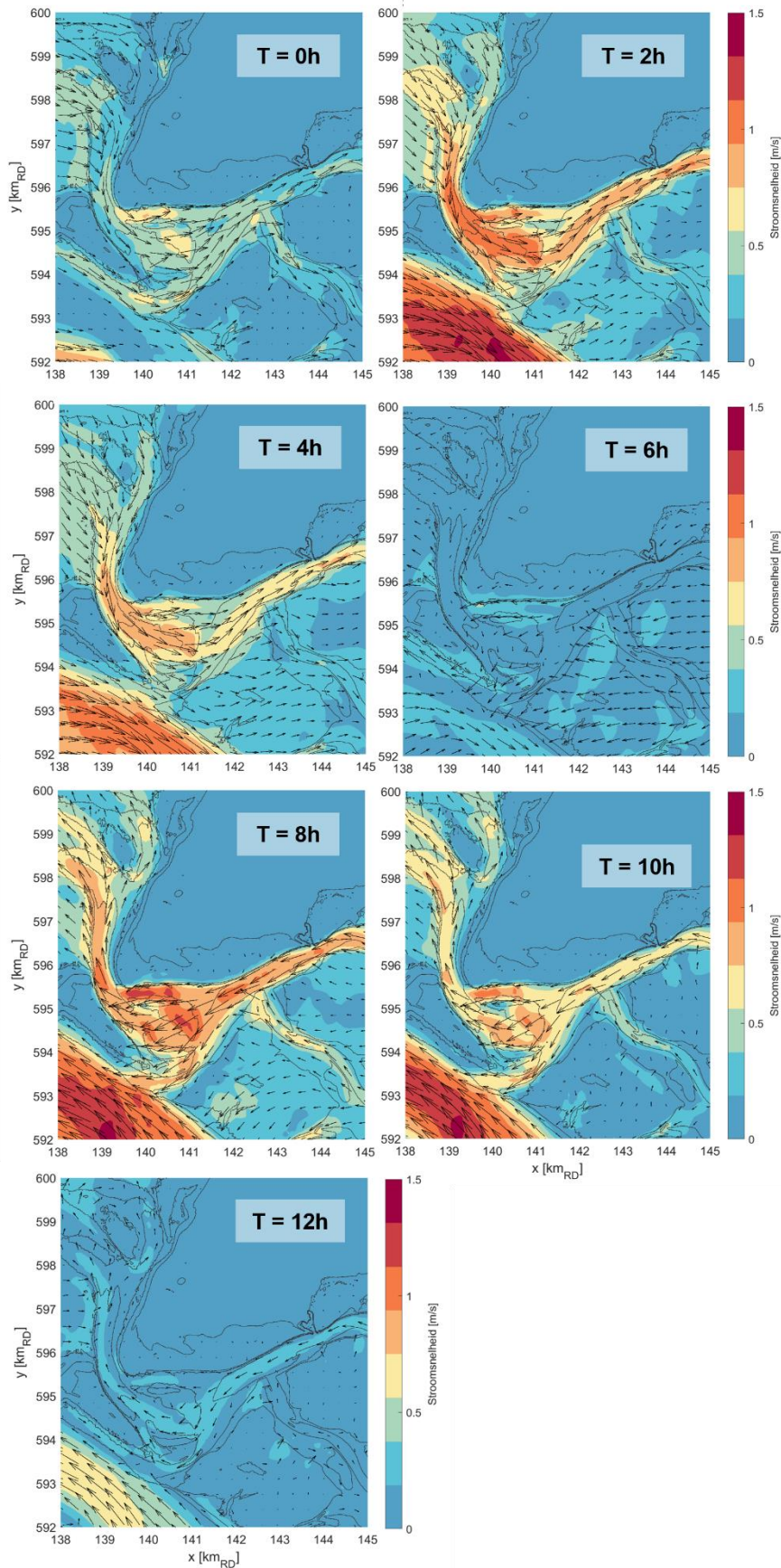


Figuur 6-1: Westkop van Terschelling op basis van de gecombineerde Vaklodingen, Jarkus, LiDAR en AHN data. De ligging van enkele Jarkusraaien, West-Terschelling en de belangrijkste geulen en platen is weergegeven.

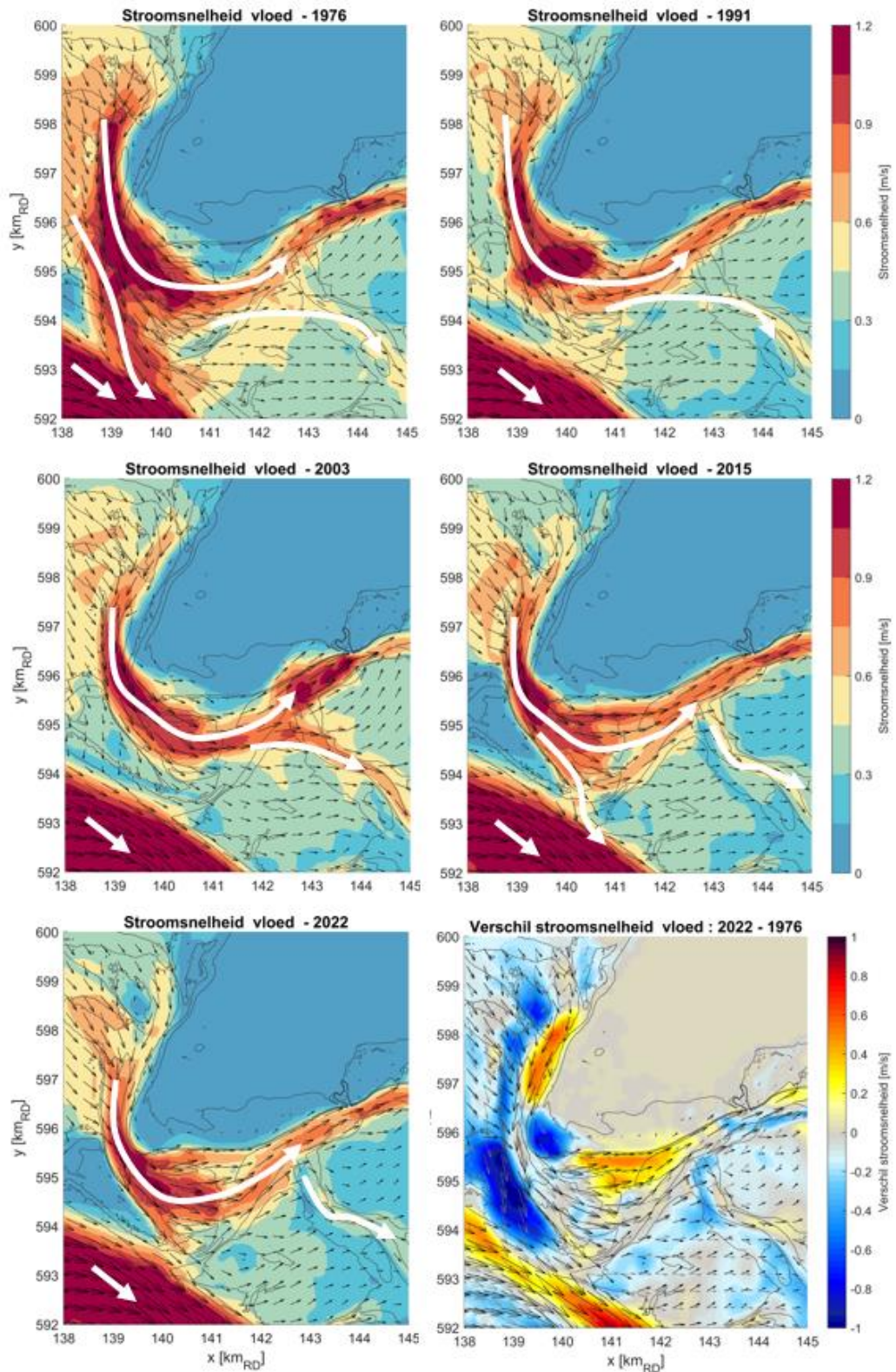
6.3 Hydrodynamica rondom eilandkop

Met behulp van modelsimulaties kan inzicht verkregen worden in de hydrodynamica rondom de eilandkop en de veranderingen daarin over de tijd. Figuur 6-2 toont de stromingspatronen rondom de eilandkop gedurende een getij. Terwijl de stroming in het centrale gedeelte van de Vliestroom nog aan het kenteren is, stroomt het water al langs Engelschhoek en door Boomkensdiep richting het bekken. Andersom is dat ook het geval bij de overgang van vloed naar eb: er vindt nog instroom via de Vliestroom plaats, terwijl het water via Schuitengat richting de buitendelta begint te stromen.

Figuur 6-3 en Bijlage B.2 tonen voor de modelsimulaties van de verschillende jaren de stromingspatronen tijdens vloed en eb. In 1976 bestond de plaat Engelschhoek nog niet en was er een directe verbinding tussen Boomkensdiep en Vliestroom. Met het ontstaan van Engelschhoek concentreert de stroming zich in Boomkensdiep rond de eilandkop. In 2015 ontstaat er weer een verbinding tussen Engelschhoek en Jacobsruggen (de Doorsteek). Het drempelgebied tussen Boomkensdiep en Schuitengat vertoont een dynamisch stromingspatroon. Terwijl de stroomsnelheden in Schuitengat lijken af te nemen, verandert ook de oriëntatie van de stroming van en naar Slenk: waar deze in 1976 nog een noordwestelijke oriëntatie had, is dit geroteerd naar een noordelijke oriëntatie. De stroming concentreert zich meer tussen de platen Jacobsruggen en Groote Plaat, waar deze in het verleden nog meer plaatsvond over Jacobsruggen heen. In Slenk lijken de vloodsnelheden ook af te nemen sinds 2003.



Figuur 6-2: Stromingspatronen rondom de eilandkop gedurende een gemiddeld getij om de 2 uur voor de 2022 bodem.



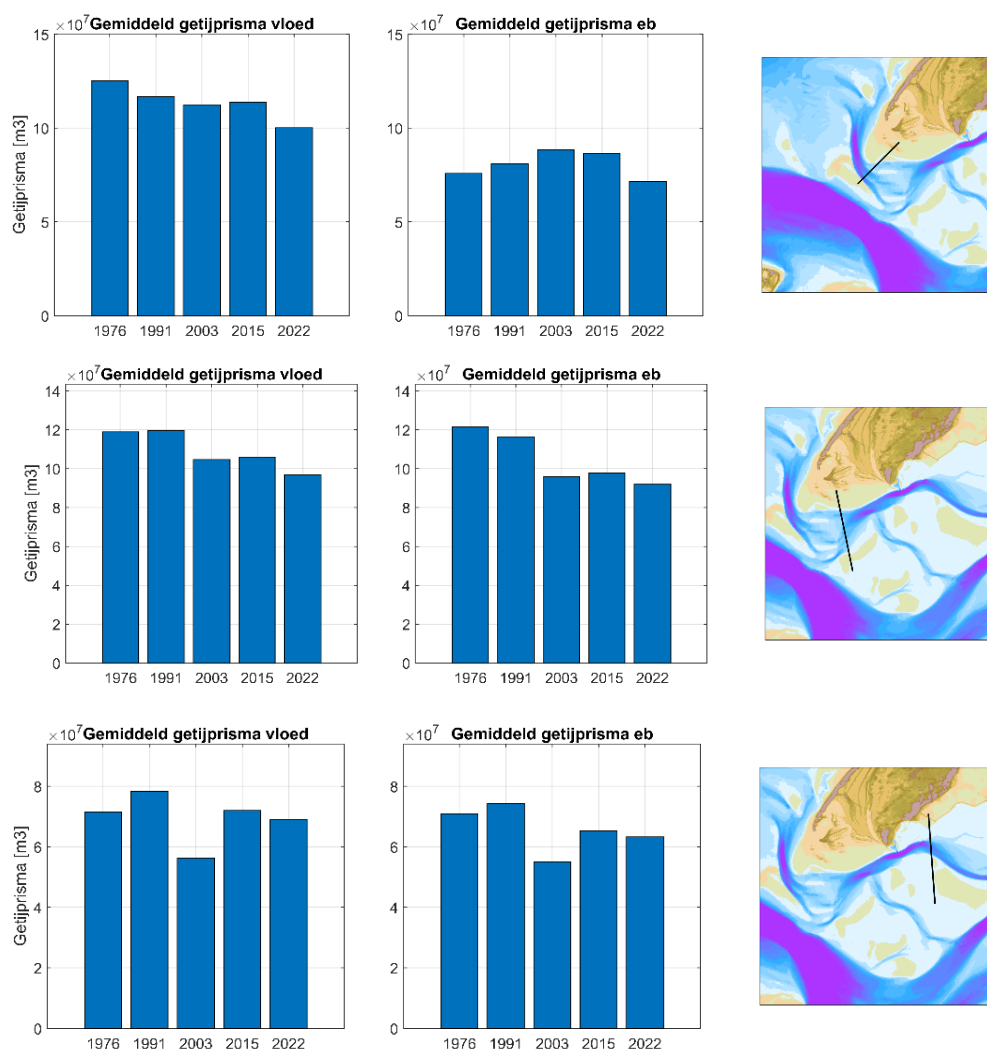
Figuur 6-3: Stromingspatronen rondom eilandkop tijdens eb voor de modelsimulaties van 1976 – 2022.

Figuur 6-4 en Bijlage B.3 tonen het gemiddelde getijprisma bij vloed en eb en het piekdebiet bij vloed en eb, wat door het Boomkensdiep en Schuitengat het bekken in stroomt:

- Het getijprisma door Boomkensdiep tijdens vloed is afgenomen met 20% (Figuur 6-4, boven), het getijprisma tijdens eb laat een lichte toename zien tot 2003 gevolgd door een

afname. Uiteindelijk is het getijprisma tijdens eb in 2022 6% kleiner dan in 1976. Het getijprisma tijdens vloed is groter, maar het verschil met het getijprisma tijdens eb neemt af: de vloeddominantie van het Boomkensdiep lijkt af te nemen. Ten opzichte van de afname van het getijprisma door het totale zeegat vindt 8% van de afname van het ebprisma plaats in het Boomkensdiep en 49% van de afname van het vloedprisma. Ook de piekdebieten tijdens vloed en eb nemen af;

- In het Schuitengat nemen zowel het gemiddelde getijprisma tijdens vloed als eb af (Figuur 6-4, midden), met 19 en 24% respectievelijk. In 1976 was het getijprisma tijdens eb licht groter dan tijdens vloed (122 t.o.v. 119 miljoen m³), in 2022 is dit licht kleiner dan tijdens vloed (92 t.o.v. 97 miljoen m³). Dezelfde trends zijn zichtbaar in de piekdebieten tijdens eb en vloed;
- De verandering van het gemiddelde getijprisma in het Oosterom vertoont geen duidelijke trend (Figuur 6-4, onder). In het verleden was het getijprisma tijdens eb en vloed vergelijkbaar (71 miljoen m³), nu overheerst het getijprisma tijdens vloed (69 t.o.v. 63 miljoen m³).



Figuur 6-4: Verandering van het gemiddeld getijprisma tijdens vloed en eb door de Boomkensdiep (boven), Schuitengat (midden) en Oosterom (onder).

6.4 Morfologie rondom eilandkop

6.4.1 Introductie

In dit hoofdstuk wordt de morfologische ontwikkeling rondom de eilandkop besproken. Hierbij worden de volgende onderdelen van de kust behandeld:

- De centrale eilandkust met de aanlandingsbanken;
- Boomkensdiep en de Noordsvaarder;
- Engelschhoek;
- Het drempelgebied tussen Boomkensdiep en Schuitengat en de Doorsteek;
- Slenk en Schuitengat.

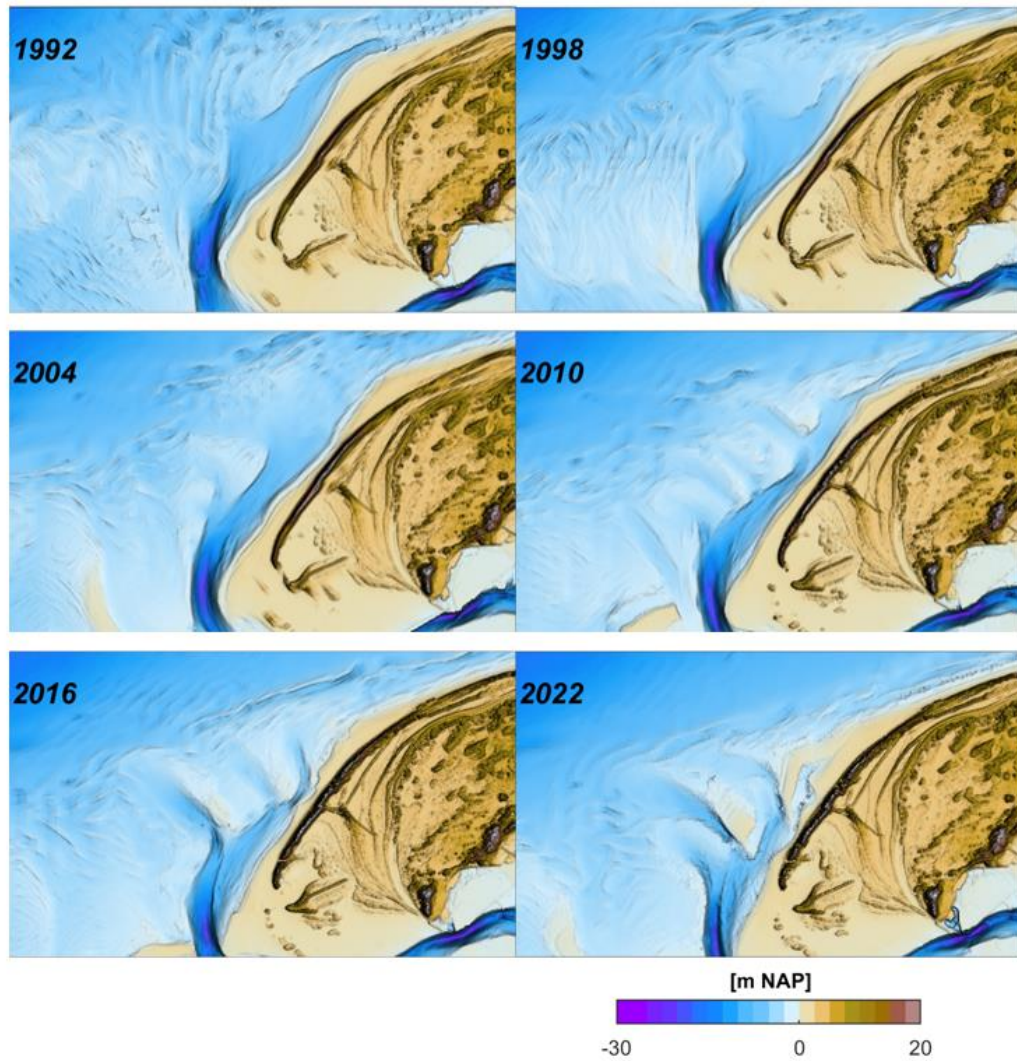
6.4.2 Centrale eilandkust en aanlandingsbanken

De overgang tussen de eilandkop en de centrale eilandkust van Terschelling wordt gekenmerkt door de aanlanding van banken. Elias (2021b) geeft een uitgebreide beschrijving van dit proces, hier wordt een samenvatting gegeven.

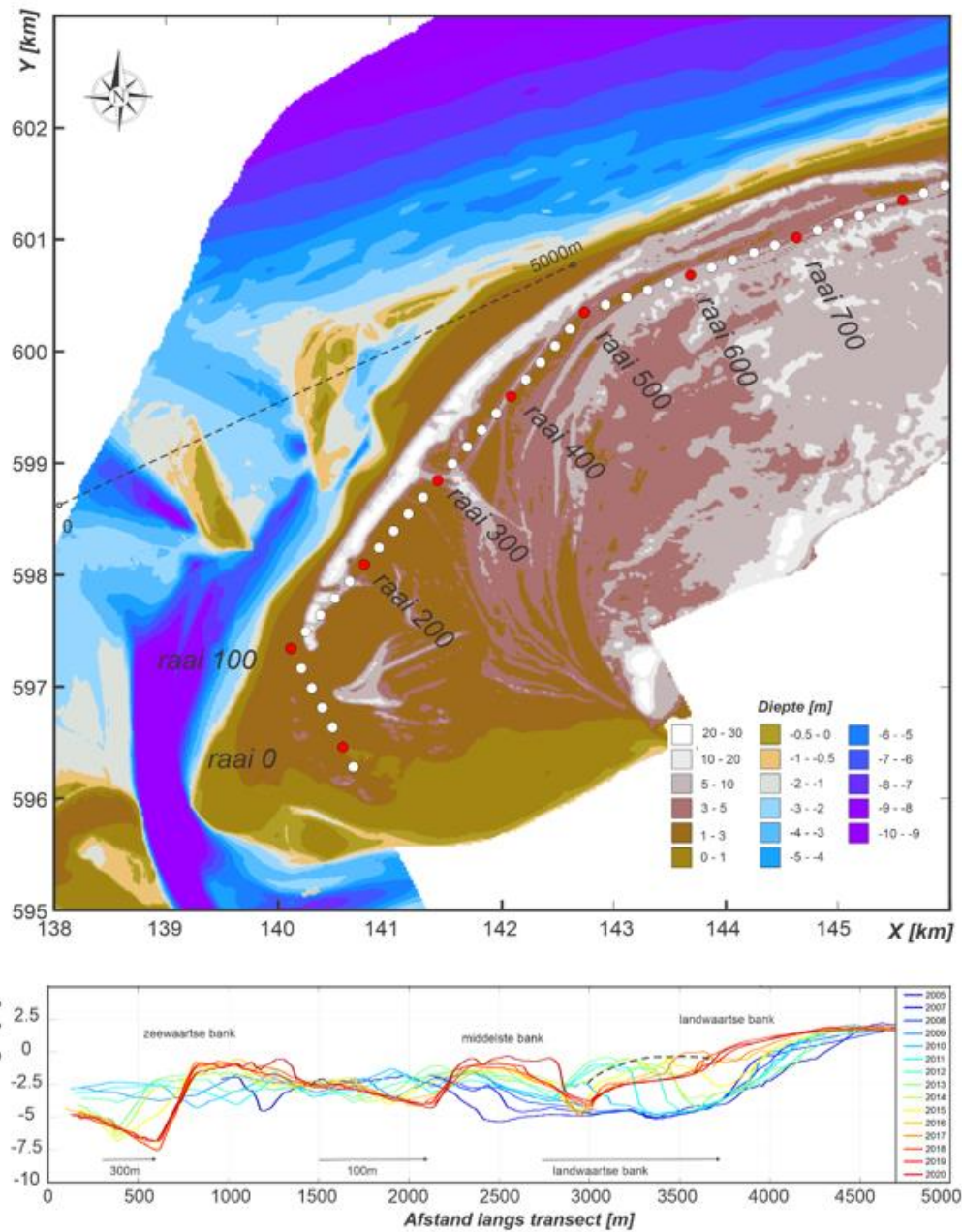
De eilandkop van Terschelling is in 1850 sterk uitgebouwd, na de grootschalige bankaanlanding van de Noordsvaarder. De vorm en grootte van de Noordsvaarder is sindsdien veranderd en afgenomen. Hierdoor is ook de sedimentuitwisseling tussen de Noordsvaarder en de kust van Terschelling veranderd. Sinds de aanlanding van de Noordsvaarder zijn geen grootschalige bankaanlandingen meer opgetreden, hoogstwaarschijnlijk door de directe verbinding tussen het Boomkensdiep en het Schuitengat welke om de Noordsvaarder heen loopt. Het Boomkensdiep verzorgt de afwatering van het kombergingsgebied van het Schuitengat, waardoor de getijgedreven langstransporten relatief groot blijven. De landwaartse aanvoer vanaf de Noordwestgronden wordt oostelijk en westelijk afgevoerd. Dit draagt bij aan de vorming van Engelschhoek en de vorming van de kustdwarse aanlandingsbanken op de Noordwestgronden. Deze banken migreren oostwaarts en landen aan bij raai 500-600. Tot 2000 landden deze aan met een herhalingsstijd van 30-40 jaar. Recentelijk ligt de herhalingsstijd rond de 10-15 jaar en is de vorm van de bank veranderd van een kustlangse naar kustdwarse bank.

De huidige ontwikkeling van aanlandingsbanken is getoond in Figuur 6-5 en Figuur 6-6 (2005-2020). Vanaf 2005 vormt zich een serie ondiepe banken op het landwaartse deel van de buitendelta langs het Boomkensdiep. Deze banken staan ongeveer haaks op de kust en worden gescheiden door ondiepe geulen. Aanlandingen van deze kustdwarse banken vinden plaats rond 2011 en 2016. In de 2015 bodem zijn drie kustdwarse bankcomplexen te onderscheiden: een zeewaartse bank met een afstand van ongeveer 400 m langs de doorsnede, een middenbank op 2500 m en een aangelande landwaartse bank die rond 2016 verbonden is met het strand. In de periode 2015-2020 vertonen de banken geen duidelijke migratie richting de kust. De banken stabiliseren vrijwel in positie, maar nemen wel sterk in grootte toe. Er vormt zich zo een groot haakvormig bankcomplex tussen raai 200 en raai 500, zie Figuur 6-7. Vanaf 2020 beweegt dit complex zich richting de kust en een directe verbinding ontstaat tussen de eilandkust en de haakvormige bank. Wanneer de bank volledig aanlandt, zullen de strandlijnen relatief ver zeewaarts verplaatsen.

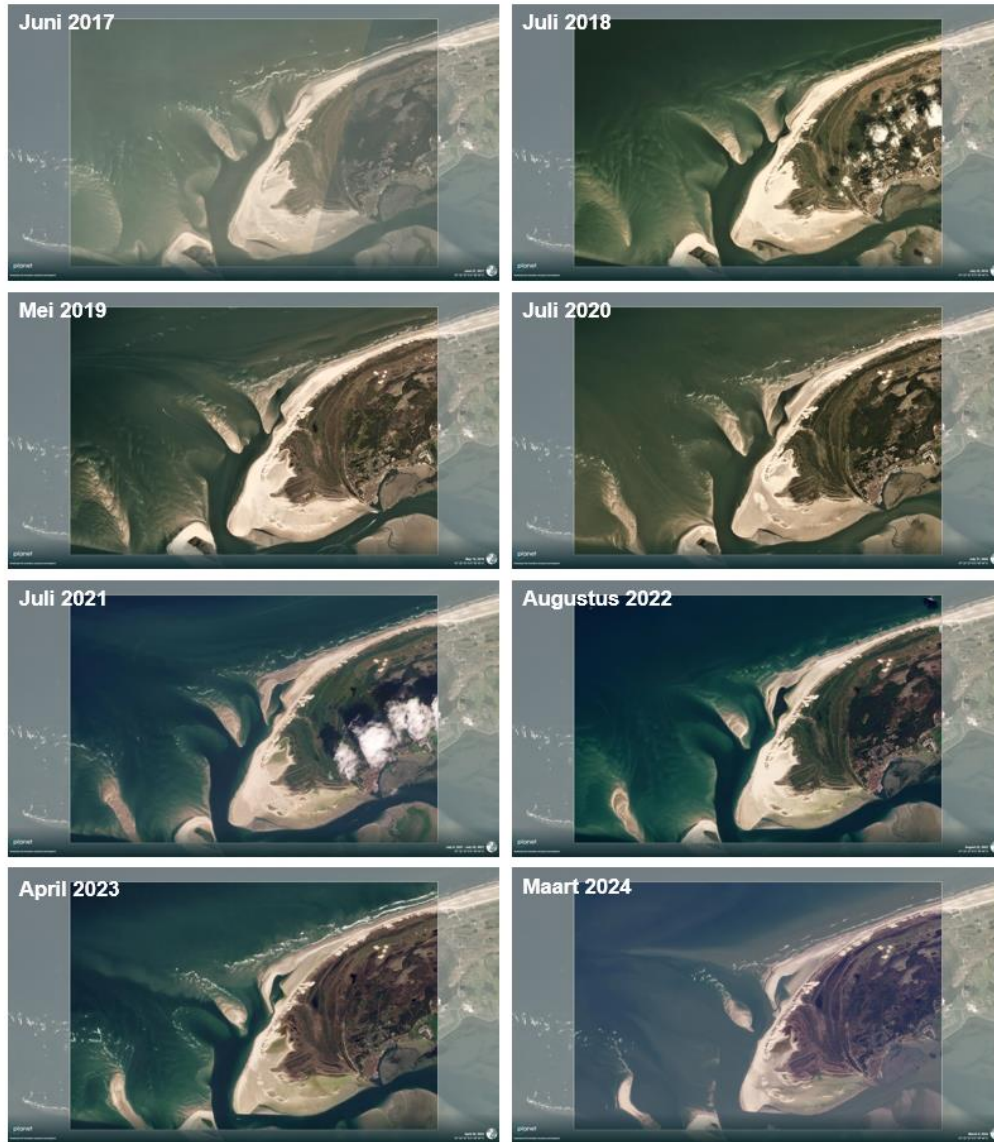
De veranderingen in bankaanlandingen hebben een direct effect op de achterliggende kustlijn. Lokaal kan de kustlijn sterk uitbouwen of terugtrekken, afhankelijk van de ligging van de bank en eventueel trog (zie bijvoorbeeld Figuur 6-8). Met afnemend volume van de buitendelta zal deze zandtoevoer richting de eilandkust naar verwachting ook afnemen.



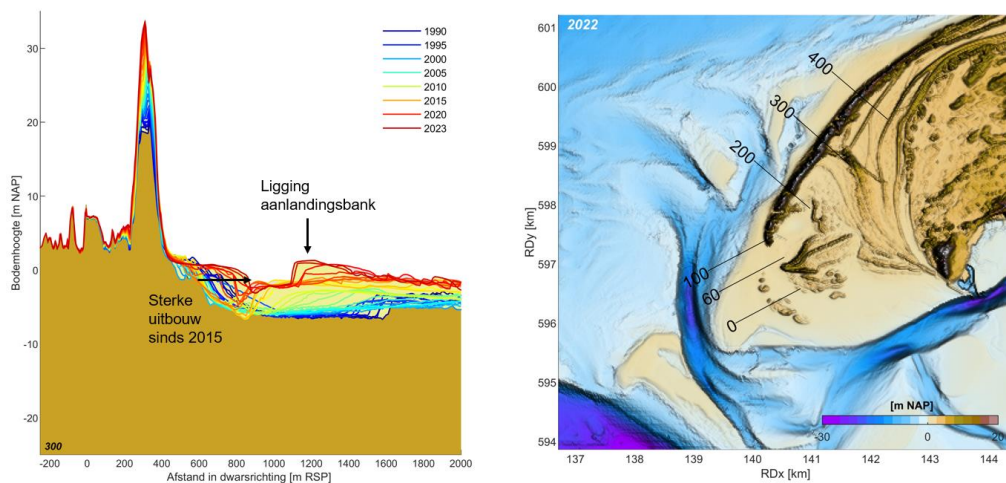
Figuur 6-5: Overzicht van de ontwikkeling van de aanlandingsbanken.



Figuur 6-6: Eilandkop van Terschelling op basis van de 2020 Jarkusmeting (boven). Tijdsreeks (jaarlijks) van een raai, getrokken over de aanlandingsbanken over de periode 2005-2020. Overgenomen en aangepast uit Elias (2021b).



Figuur 6-7: Satellietbeelden van de aanlandingsbanken over de periode 2017-2024 (bron: Planet).



Figuur 6-8: Overzicht van de ontwikkeling van raai 300, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.

6.4.3 Noordsvaarder & Boomkensdiep

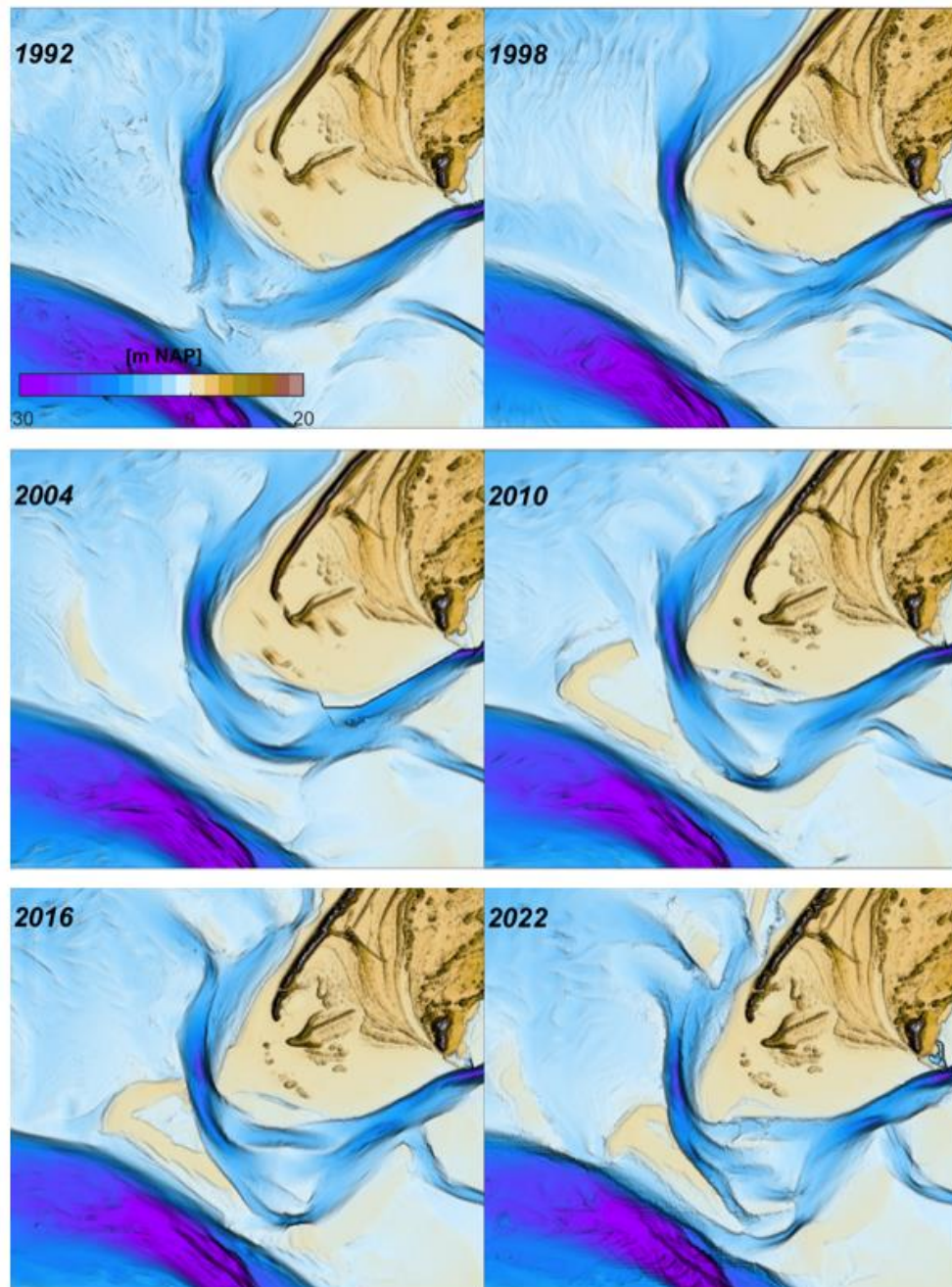
Het stuk van de eilandkop tussen raai 0 en raai 200 (Figuur 6-9) bestaat uit de voormalige aanlandingsbank de Noordsvaarder en wordt gekenmerkt door structurele erosie van de Noordsvaarder en de ligging van het Boomkensdiep vlak langs de eilandkust. Precies op de punt van de eilandkop (raai 0) vindt juist uitbouw plaats. Op raai 0 – 100 is geen BKL gedefinieerd. Tussen raai 100 en 105 ligt de MKL zeewaarts van de BKL, maar met een landwaartse trend (Rijkswaterstaat, 2024). Tussen raai 105 en 200 ligt de MKL landwaarts van de BKL en is de trend ook landwaarts.

Het Boomkensdiep ligt direct om de Noordsvaarder heen en is sinds afsluiting van de Zuiderzee zijn functie als hoofdgeul verloren, als gevolg van terugtrekking van de buitendelta (Elias, 2021b). Door de verbinding tussen het Boomkensdiep en het Schuitengat heeft de geul nog steeds een kombergingsgebied, waardoor de geul niet geheel verzandt. In 1992 was Boomkensdiep nog een relatief brede geul rondom de eilandkop, met een verbinding met de Vliestroom onder Engelschoek (Figuur 6-5). Sindsdien trekt de geul op de buitendelta zich terug (ook te zien in contourlijnen, Figuur 4-5), en zijn de aanlandingsbanken ten noorden van de uitstroom duidelijk te zien. Met erosie van de Noordsvaarder komt de geul dichter langs de kust te liggen. De geul wordt smaller en iets ondieper (raai 200, Figuur 6-10). Ook bij raai 100 is de erosie van de Noordsvaarder en het opvullen van Boomkensdiep zichtbaar. Met het opvullen is ook het doorstroomoppervlakte afgenomen sinds 1992 (Figuur 6-11).

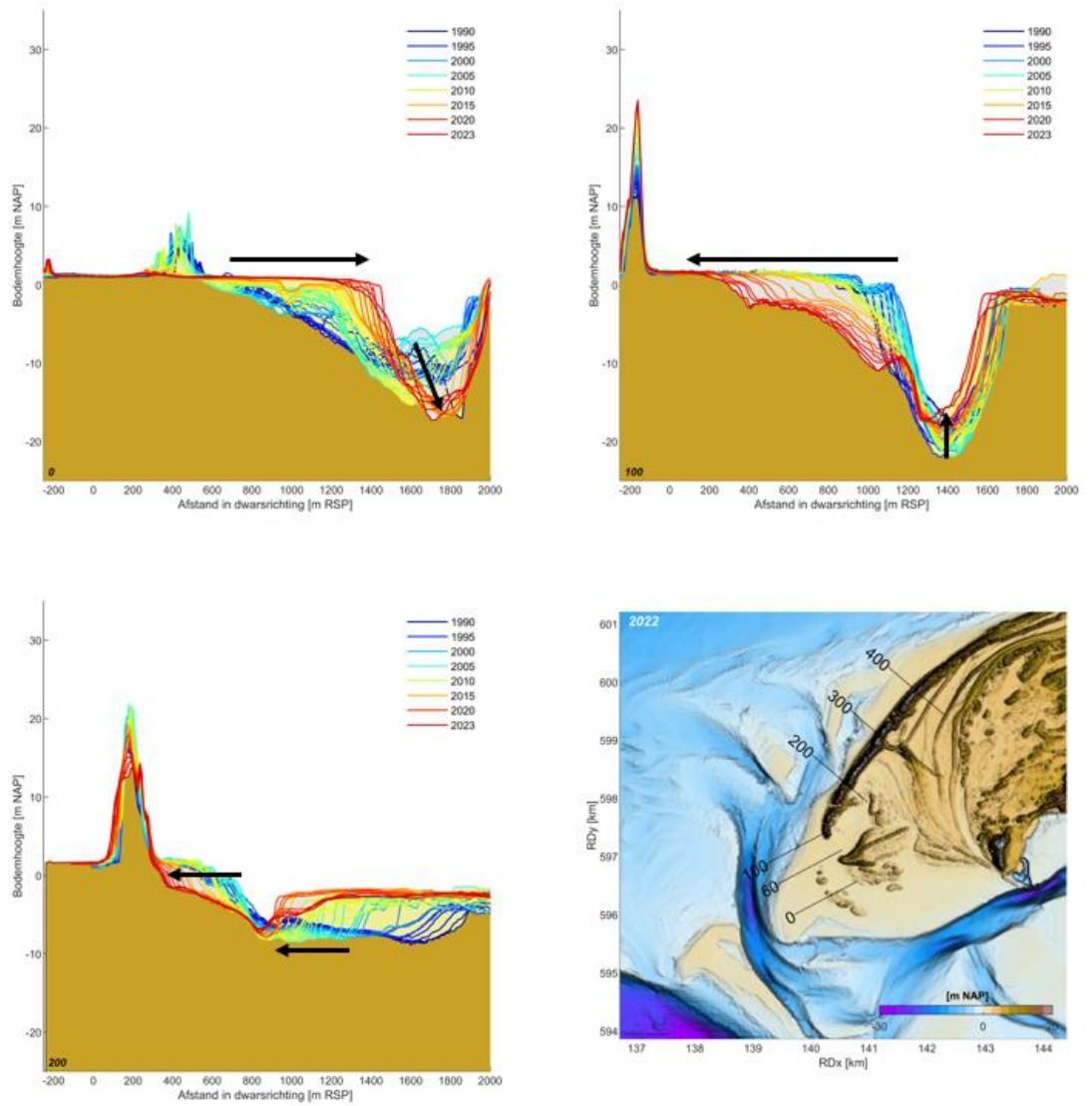
Door de vorming van Engelschoek en de verplaatsing het zeegat in, concentreert Boomkensdiep zich om de eilandkop en is er sinds 2003 geen verbinding meer met de Vliestroom. Dit is ook te zien in de stromingspatronen (Figuur 6-3, Bijlage B.2). Precies op de eilandkop bouwt de Noordsvaarder zich uit (raai 0, Figuur 6-10). De geul wordt smaller doordat deze tussen de Noordsvaarder en Engelschoek in geklemd ligt. Hier wordt de geul dan ook dieper.

Het drempelgebied, waar Boomkensdiep en Schuitengat op elkaar aansluiten, wordt over de jaren steeds complexer en bouwt zich uit in omvang. Het zuidelijke deel van Boomkensdiep vertoont een uitbocht naar het zuiden. Vanaf 2015 vormt zich tussen Engelschoek en Jacobsruggen een nieuwe verbinding tussen het Schuitengat en de Vliestroom: de Doorsteek. De toekomstige ontwikkeling van het Boomkensdiep is onder andere afhankelijk van de ontwikkelingen rondom de Doorsteek. Als het Schuitengat een doorgaande verbinding met de Vliestroom vormt, verliest het Boomkensdiep zijn verbinding met het achterliggende kombergingsgebied. Gezien de grote zanddruk van de Noordwesterbanken is het dan de vraag of deze geul nog gehandhaafd kan blijven. Het huidige debiet lijkt (vooralsnog) voldoende om de zandtoevoer vanaf de buitendelta kustlangs af te voeren in de vorm van de geobserveerde aanlandingsbanken.

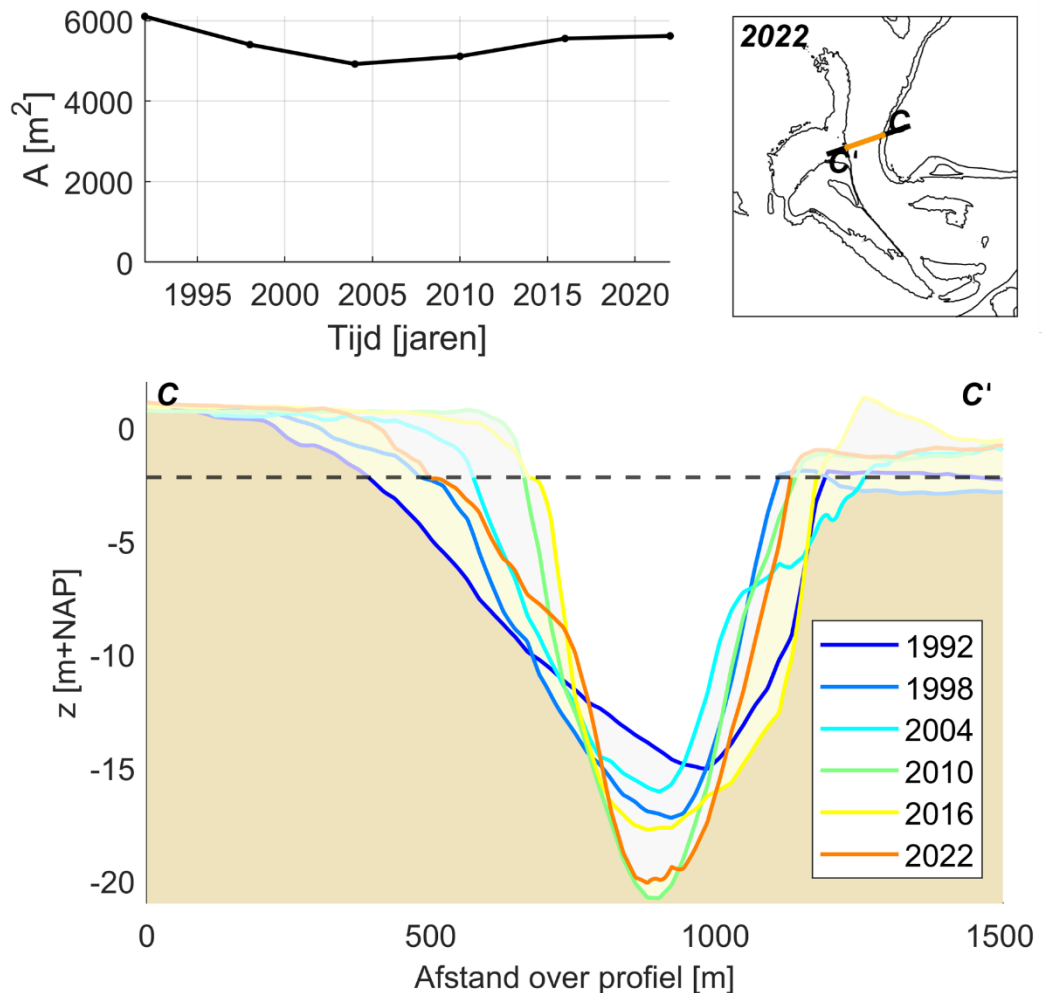
Door de verbinding tussen het Schuitengat en Boomkensdiep en de daardoor relatief sterke getijstroming in het Boomkensdiep, treedt structurele erosie van de Noordsvaarder op. Door de vloeddominantie van het Boomkensdiep wordt dit sediment het bekken in getransporteerd. Dit is waarschijnlijk ook de reden dat precies op de eilandkop uitbouw van de Noordsvaarder plaatsvindt. Het bekkengerichte transport vormt ook een bron van sediment voor het drempelcomplex tussen Boomkensdiep en Schuitengat.



Figuur 6-9: Overzicht van de ontwikkeling van het Boompensdiep en het drempelcomplex.



Figuur 6-10: Overzicht van de ontwikkeling van raai 0 (linksboven), raai 100 (rechtsboven) en raai 200 (linksonder), op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakte de meest recente 2023 bodemligging.



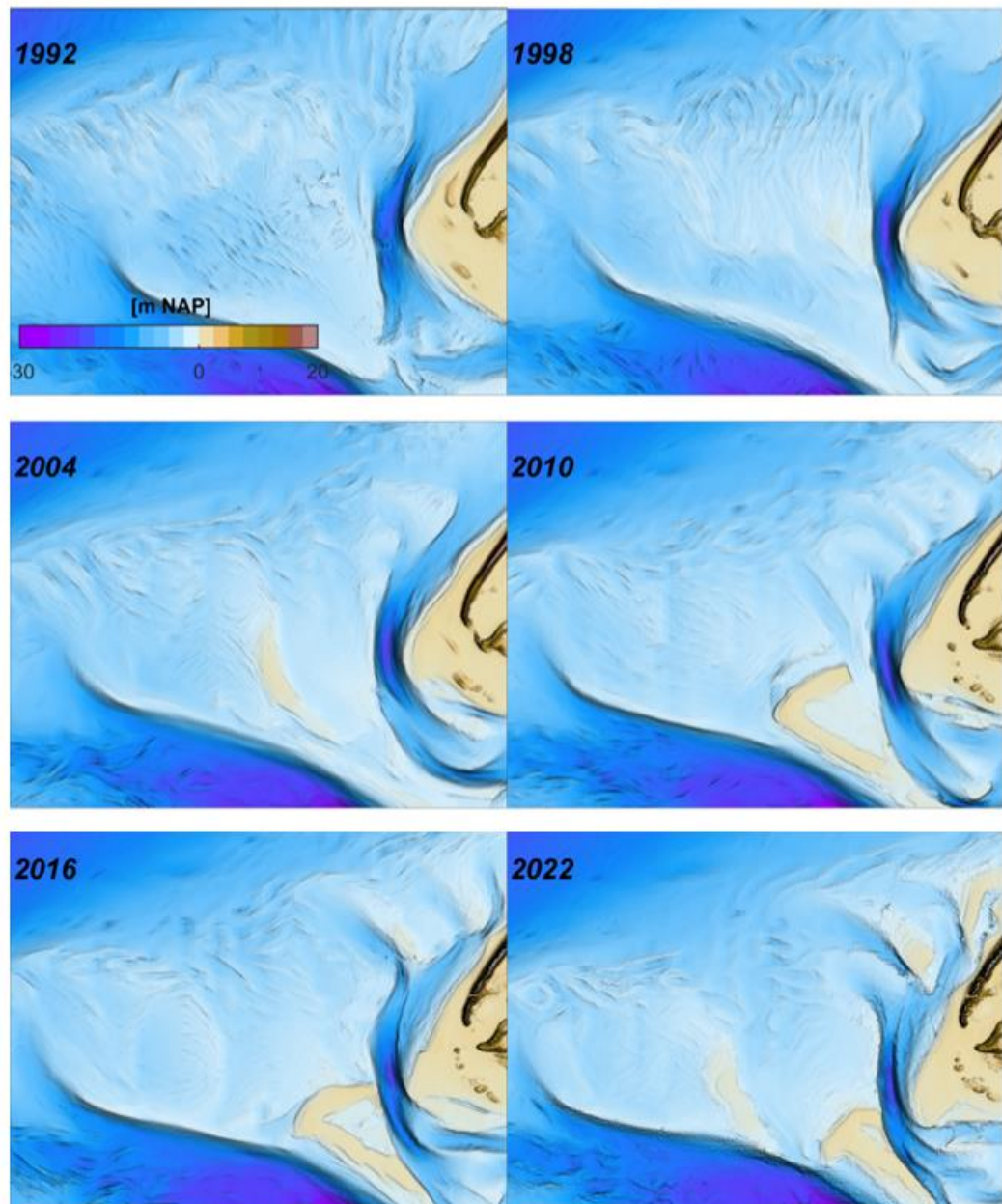
Figuur 6-11: Ontwikkeling van het doorstroomoppervlakte (onder de -2.2 m) door het Boomkensdiep.

6.4.4 Engelschhoek

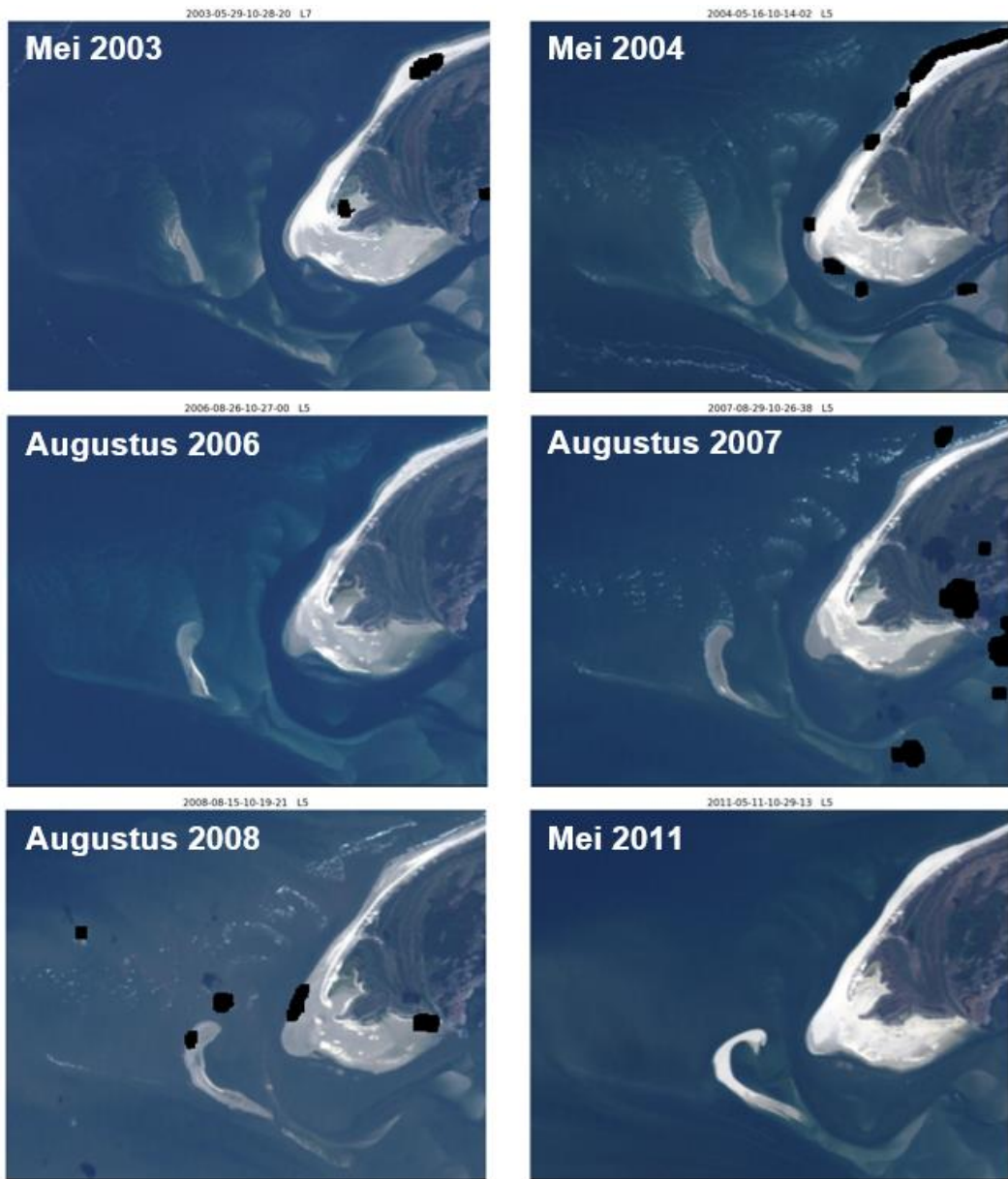
Naast de vorming van aanlandingsbanken zorgt het landwaartse transport vanuit de Noordwestgronden voor groei van een hoge, centrale bank in het zeegat, Engelschhoek. Vanaf 2004 is duidelijk een hoge bank zichtbaar in de Vaklodingen data (Figuur 6-12). Ook op satellietbeelden is de vorming van Engelschhoek vanaf 2003 goed te volgen (Figuur 6-13, Figuur 6-14). In 2003 was dit een langgerekte bank met een noordelijke oriëntatie. Tussen 2003 en 2011 verplaatst de bank zich richting het zuidoosten, het zeegat in. In die tijd krijgt de bank ook een sterk gekromde vorm, met een kromming richting de eilandkop.

De recente ontwikkeling van Engelschhoek is te volgen in Figuur 6-14 en Figuur 6-15. In 2016 heeft Engelschhoek zijn karakteristieke gehaakte vorm gekregen. Richting 2024 smelt de kop samen met de rest van de bank en krijgt deze een rondere vorm. Op basis van satellietdata kan inzicht verkregen worden in de verplaatsingssnelheden. Zo verplaatst de kop van Engelschhoek met ca. 100 m/jaar naar het zuiden. Deze snelheid zie je ook terug in de ontwikkeling van een langsdoorsnede door Engelschhoek (Figuur 6-16), waar de noordkant van de bank ca. 1800 m naar het zuidoosten migreert in 18 jaar. De staart van Engelschhoek heeft een vrij stabiele ligging en verplaatst richting het zuidoosten met een geringe snelheid van 4-6 m/jaar. Terwijl de staart van het hoge deel van Engelschhoek vrij stabiel ligt, verplaatst het diepere deel van Engelschhoek en de Doorsteek richting het bekken.

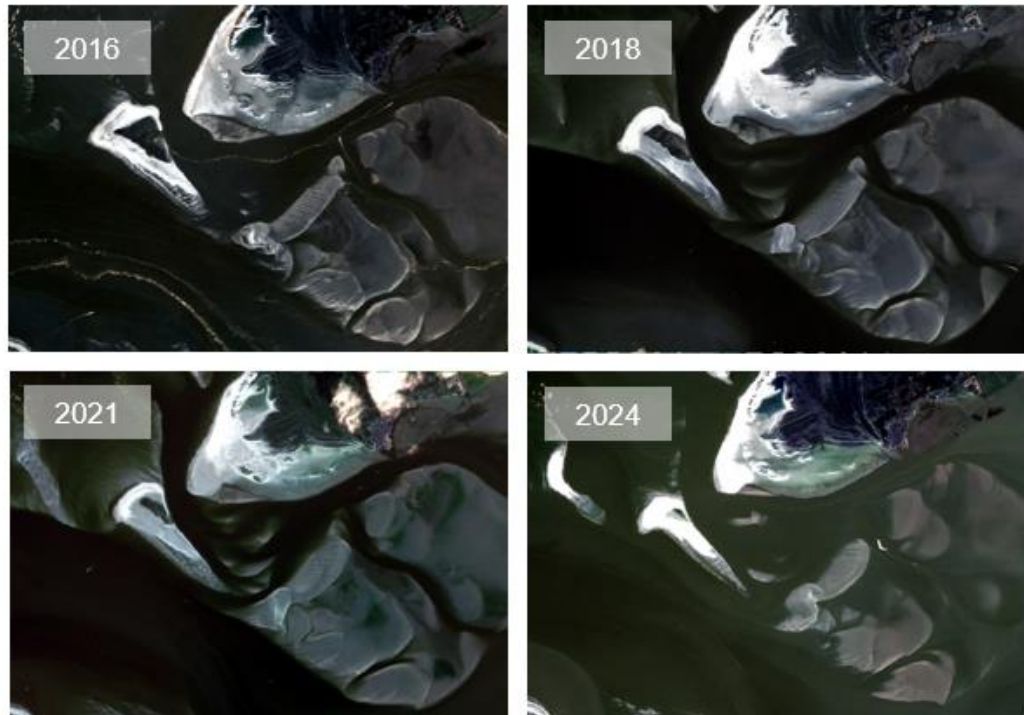
Op satellietfoto's is vanaf 2018 een nieuwe bank ten noordwesten van Engelschhoek zichtbaar (Figuur 6-14). In de vaklodingen van 2016 was deze ook al zichtbaar als diepe bank (Figuur 6-12). In 2021 heeft de bank nog een langgerekte vorm met een noordelijke oriëntatie, vergelijkbaar met de vorm van Engelschhoek in 2003. In 2024 begint deze nieuwe bank een gekromde vorm te krijgen, terwijl de bank richting Engelschhoek verschuift. De ontwikkeling van deze nieuwe bank lijkt daarmee veel op de ontwikkeling van Engelschhoek. Naar verwachting zal de bank op termijn gaan samenvoegen met Engelschhoek, waardoor weer een grotere bank gevormd wordt. Het ligt dus niet in lijn der verwachting dat Engelschhoek op termijn gaat verdwijnen. De verplaatsing van de nieuwe bank tussen 2020 en 2024 is getoond in Bijlage E: in 4 jaar is de kop van de bank ca. 800 m naar het zuiden verplaatst.



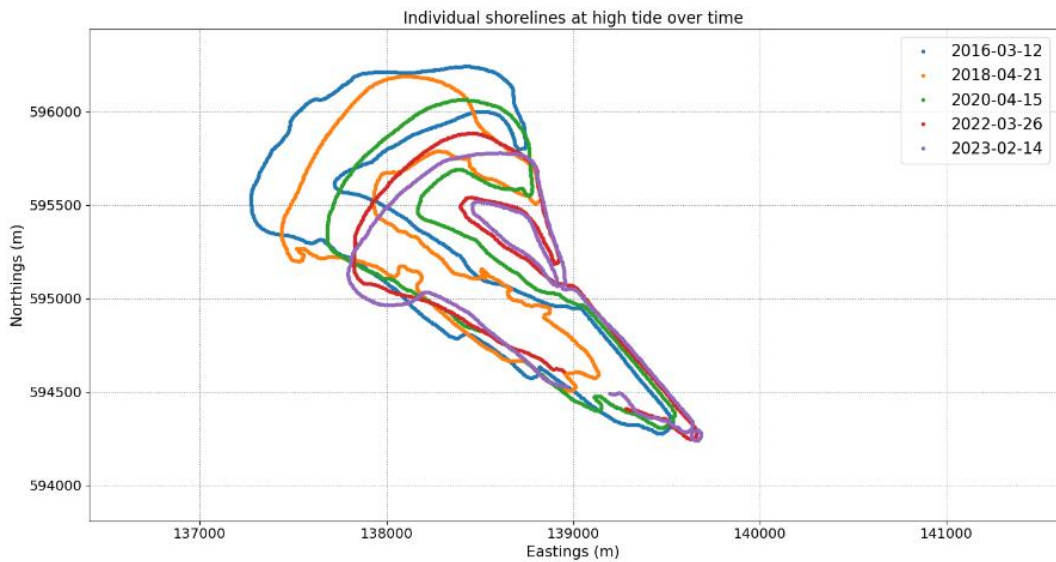
Figuur 6-12: Overzicht morfologische ontwikkelingen Engelschhoek.



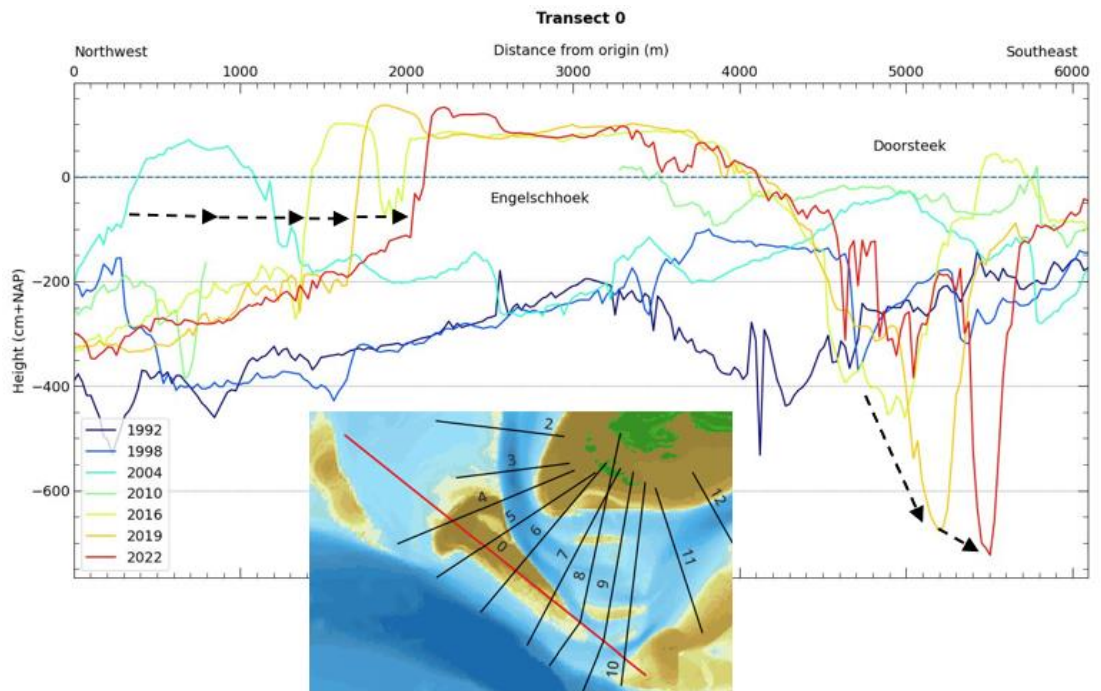
Figuur 6-13: Satellietbeelden van de ontwikkeling van Engelschhoek, 2003-2011.



Figuur 6-14: Satellietbeelden van de ontwikkeling van Engelschhoek, 2016-2024 (Löhr ,2024).



Figuur 6-15: Kustlijnen afgeleid met satellietbeelden gedurende hoogwater voor periode 2016-2023 (Löhr , 2024).



Figuur 6-16: Langsdoorsnede door Engelschhoek, op basis van de Vaklodingen data (Löhr, 2024).

6.4.5 Drempelgebied en Doorsteek

De verbinding tussen Boomkensdiep en Schuitengat wordt gevormd door een dynamisch drempelgebied, wat ingeklemd ligt tussen de eilandkop, Engelschhoek en Jacobsruggen. Het drempelgebied is een complex patroon van eb- en vloedscharen. Boomkensdiep eindigt als vloedschaar met bijbehorend schild in dit gebied. Figuur 6-17 toont de ontwikkelingen in het gebied over de periode 1992-2022. De belangrijkste geulen in het gebied zijn het Boomkensdiep, het Schuitengat, de noordelijke verbinding tussen Boomkensdiep en Schuitengat (de Noordschaar) en de Zuidschaar, de zuidelijke verbinding tussen Boomkensdiep en Schuitengat. De verbinding tussen Boomkensdiep en Schuitengat werd in 1979 gevormd, sindsdien gaat een groot deel van de afvoer van Schuitengat via deze route (Elias, 2021b). De beschrijving van de ontwikkelingen in het drempelgebied hieronder is gebaseerd en bouwt voort op Van Til (2018) en Elias (2021b), aangevuld met inzichten uit de laatste Vaklodingen (Löhr, 2024).

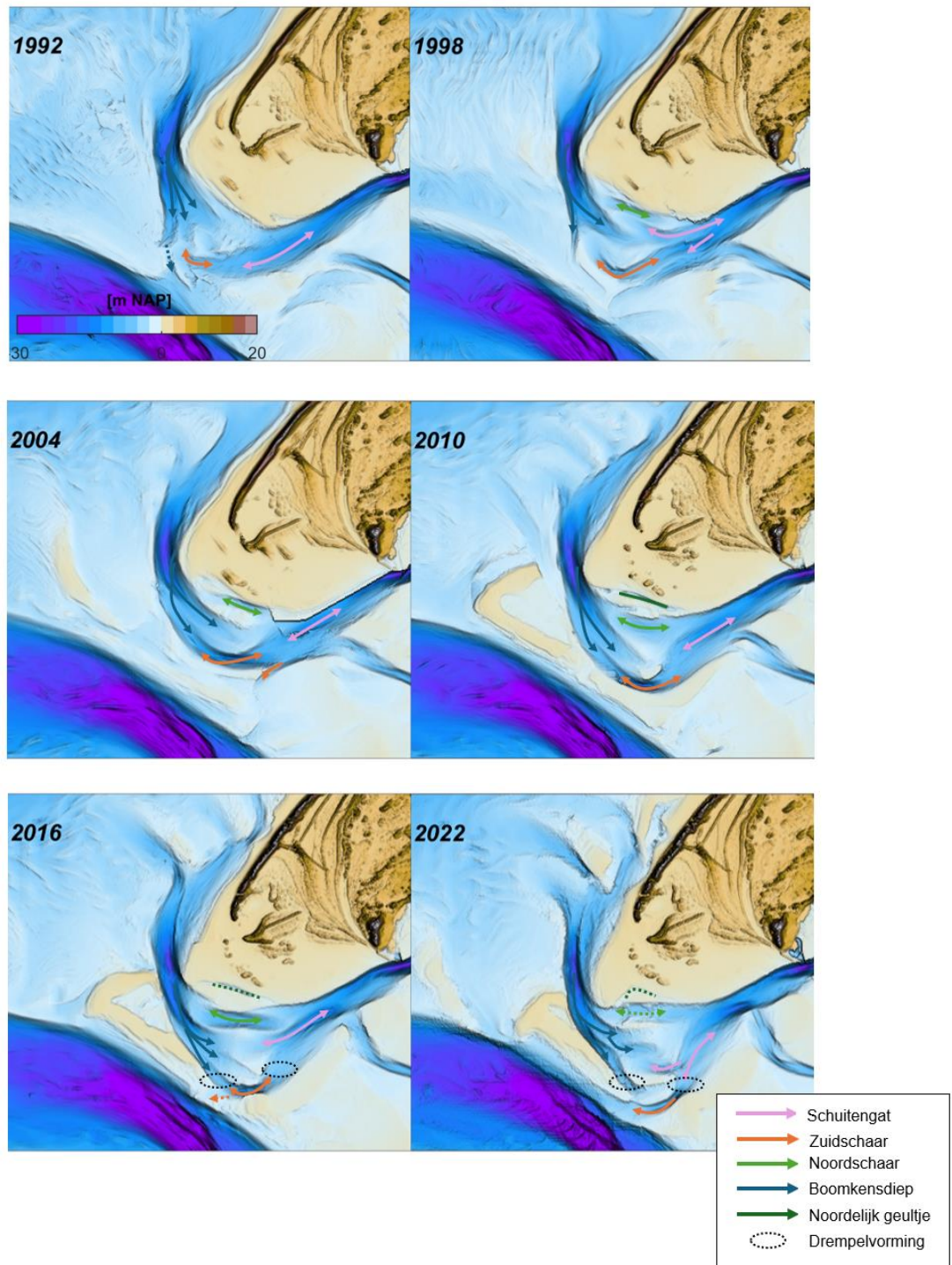
In 1992 was Engelschhoek nog een ondiepe plaat die geheel onder water lag. De restanten van de verbinding tussen Boomkensdiep-Schuitengat en Vliestroom zijn nog te zien. Ook Jacobsruggen lag lager dan in de huidige situatie. De Noordschaar was nog niet duidelijk aanwezig en de vloedschilden rondom de vloedscharen van het Boomkensdiep lagen in noordoost-zuidwest richting. Ontwikkelingen sindsdien zijn:

- In 1991 was er nog een verbinding tussen het Boomkensdiep/Schuitengat en de Vliestroom. Deze is sindsdien snel verzand, de restanten zijn in de bodem van 1992 nog te zien. Een verbinding tussen de banken Engelschhoek en de Jacobsruggen wordt gevormd. Deze drempelvorming is waarschijnlijk het resultaat van de grote veranderingen die op de buitendelta plaatsvinden (landwaartse verplaatsing van het buitendeltaplatform). Een maximale omvang van de drempel wordt bereikt rond 2004. Daarna neemt de breedte sterk af. Deze afname komt door de uitbocht van de geul Boomkensdiep-Schuitengat;
- De Noordschaar is goed zichtbaar vanaf 1998. Deze verplaatst richting het noorden en voegt zich tussen 2004 en 2010 samen met de Noordsvaarder.

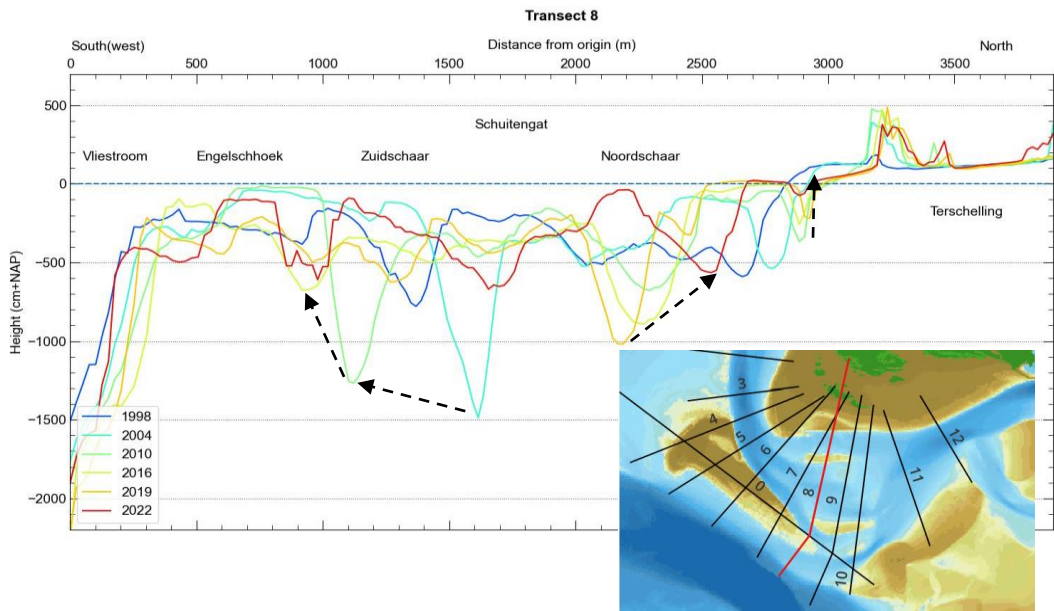
Het lijkt alsof deze nog aanwezig blijft als geultje door de Noordsvaarder, aangeduid als 'noordelijk geultje'. In 2010 is op de oude ligging van de Noordschaar een nieuwe geul gevormd, welke tot 2018 stabiel lijkt (Van Til, 2018). Richting 2022 verplaatst deze zich echter weer naar het noorden en vult op. Ook een klein geultje ten noorden van de Noordschaar is zich aan het opvullen. Beide ontwikkelingen zijn te zien in Figuur 6-18;

- De Zuidschaar verplaatst zich naar het zuidoosten en bocht uit in zuidelijke richting. Hiermee neemt de omvang van het drempelgebied toe. In 2004 vormde vanaf de Zuidschaar nog een ebschaartje richting Vliestroom, zonder verbinding te maken. Vanaf 2016 vormt in het verlengde van de Zuidschaar een ebschaar richting de Vliestroom, met bijbehorend ebschild aan Vliestroom zijde. Hiermee is er weer een verbinding tussen het Schuitengat en Vliestroom. Deze Doorsteek verplaatst naar het zuidoosten en wordt dieper en smaller tot 2022 (Figuur 6-16, Figuur 6-19). Tussen de Zuidschaar en Boomkensdiep, ten noorden van de Doorsteek vormt een drempel. Ook tussen de Zuidschaar/Doorsteek en Schuitengat vormt een drempel. De Zuidschaar lijkt tussen 2016 en 2022 daarnaast ondieper te worden. Dit zou erop kunnen duiden dat de huidige Zuidschaar op termijn gaat verdwijnen. Dit werd ook al voorspeld door Van Til (2018);
- Met het noordelijk verplaatsen van de Noordschaar worden nieuwe geultjes door het drempelcomplex gevormd door Schuitengat en Boomkensdiep. Dit is al te zien in 2016 en zet zich door in 2022. Verwacht wordt dat deze geultjes het debiet door de verdwijnende Noordschaar overnemen. Het zou kunnen dat deze geul, net als de Noordschaar tot twee keer toe, naar het noorden verplaatst en uiteindelijk opvult. De ebschaar van Schuitengat lijkt tussen 2016 en 2022 juist naar het zuiden te verplaatsen. Deze zou op termijn een nieuwe Zuidschaar kunnen vormen;
- Waar het Schuitengat overgaat in het drempelcomplex wordt de geul ondieper (Figuur 6-20). In beide richtingen wordt de geul breder: enerzijds door erosie van de Noordsvaarder en anderzijds door het uitbochten van de Zuidschaar naar het zuidoosten.

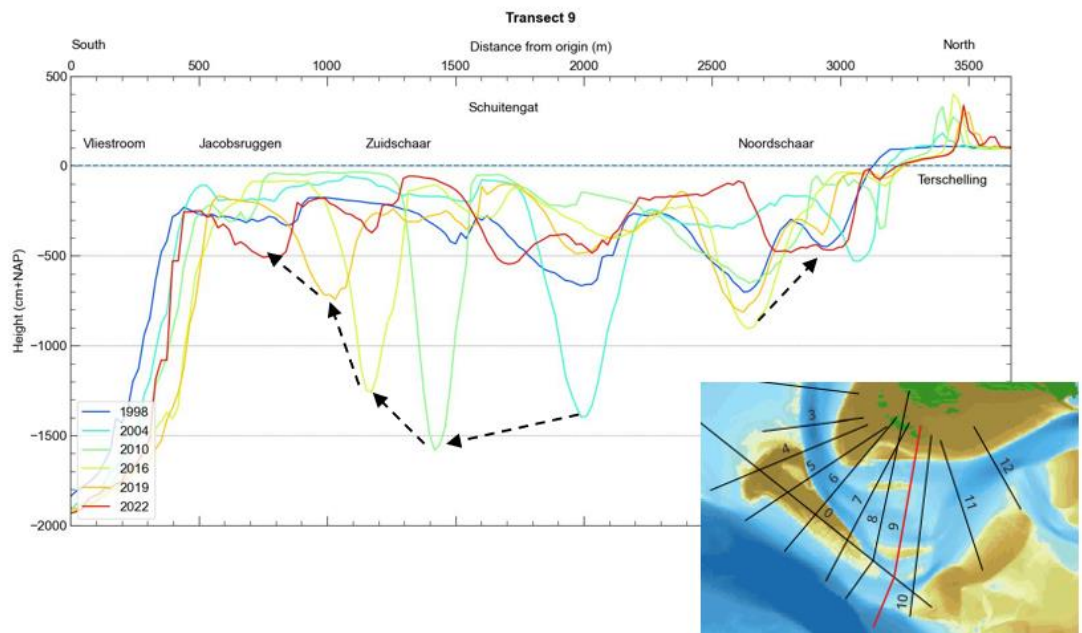
De toekomstige ontwikkeling van het drempelgebied is moeilijk voorspelbaar. Er is een grote toevoer van zand, zowel vanuit de buitendelta, de Noordsvaarder en Engelschhoek. Het is onduidelijk of de Doorsteek zal blijven bestaan, op deze locatie is waarschijnlijk snelle sedimentatie mogelijk door golven en stormen in nabijheid van de buitendelta (Van Til, 2018). De Doorsteek is daarnaast een relatief kleine geul in vergelijking met het doorstroomoppervlakte van het drempelcomplex als geheel, en zal naar verwachting niet het debiet van Schuitengat over kunnen nemen en daardoor als volledige geul uitgroeien.



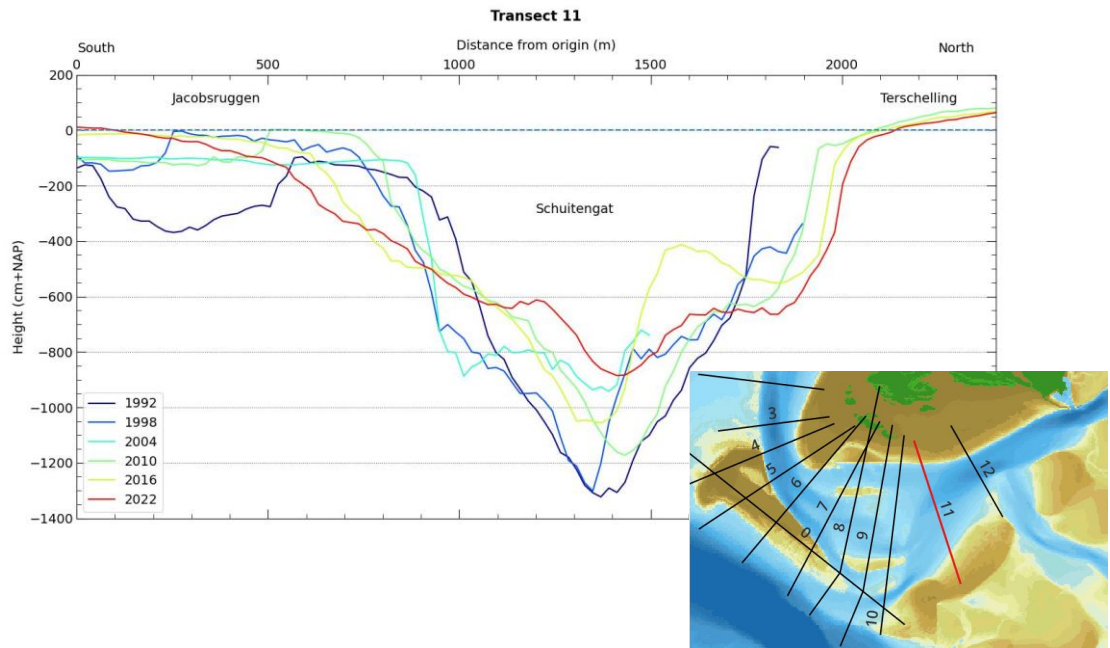
Figuur 6-17: Overzicht van de ontwikkelingen in het drempelgebied, op basis van de Vaklodingen. Gebaseerd op (Van Til, 2018) en (Lohr, 2024).



Figuur 6-18: Doorsnede door het drempelcomplex, op basis van de Vaklodingen en Jarkus data (Löhr, 2024).



Figuur 6-19: Doorsnede door het drempelcomplex, op basis van de Vaklodingen en Jarkus data (Löhr, 2024).



Figuur 6-20: Doorsnede door het drempelcomplex, op basis van de Vaklodgingen en Jarkus data (Löhr, 2024).

6.4.6 Slenk en Schuitengat

De huidige vaarroute richting de haven van West-Terschelling loopt via Slenk en Schuitengat. Door de drempelvorming tussen Schuitengat en Vliestroom is in 1996 besloten de vaarroute hierheen te verleggen. Slenk wordt daartoe gebaggerd. Een verspreidingslocatie ligt net ten noordwesten van de aansluiting van Slenk op Schuitengat (Figuur 6-21).

Slenk is een kortsluitgeul, oftewel een verbindingsgeul tussen een ebdominante en vloeddominante geul, zonder eigen komberging (Van Til, 2018). Het verhang tussen Schuitengat en Westmeep verandert tijdens het getij, wat ervoor zorgt dat er voldoende stroming door Slenk gaat om deze in stand te houden. De ontwikkeling van Slenk wordt getoond aan de hand van de ligging van de NAP -3,5 m contour tussen 1992 en 2022 en enkele doorsnedes (Figuur 6-22, Figuur 6-23, Figuur 6-24).

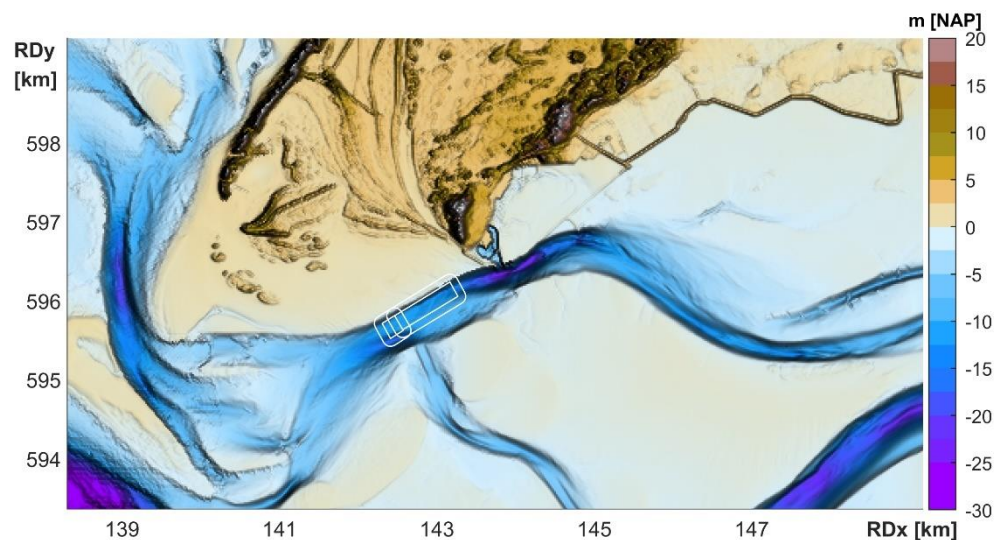
Over het algemeen is de ligging van Slenk vrij stabiel, ook al voordat begonnen werd met baggeren in 1995 (Van Til, 2018). De aansluiting van Slenk op het Schuitengat is echter verschoven. Waar deze in het verleden een noordwestelijke oriëntatie had, heeft deze nu een meer noordelijke oriëntatie. Dit is ook duidelijk te zien in de doorsnede vlakbij deze aansluiting, waar een geleidelijke verschuiving uit blijkt (~400 m in 30 jaar, Figuur 6-23 (linksboven)). Het doorstroomoppervlakte schommelt rond 1000 m². Sinds 2010 neemt het doorstroomoppervlakte toe in deze doorsnede vlakbij de aansluiting. De verschuiving van de aansluiting werd ook al geconstateerd door Van Til (2018).

De aansluiting van Slenk op Westmeep behoudt een constante oriëntatie, welke suggereert dat instroming vanuit Westmeep vooral plaatsvindt tijdens eb (Van Til, 2018). De ligging van de geul is hier stabiel en de geul wordt dieper, het doorstroomoppervlak neemt na een toename tussen 1992 en 2004 nu sinds 2004 weer af. Halverwege Slenk neemt de diepte, en daarmee het doorstroomoppervlakte, juist af tussen 1992 en 2022. Deze variatie in doorstroomoppervlak langs de geulas van Slenk is ook te zien in Figuur 6-24: tot ongeveer halverwege de geul vanaf Westmeep neemt het doorstroomoppervlak toe tussen 1992-2022, vervolgens neemt het af gedurende ong. 1,5 km om vervolgens bij de aansluiting met het Schuitengat weer toe te nemen tussen 1992 en 2022. De uitschieter voor 1998 tussen kilometer 2 en 2,5 is waarschijnlijk een afwijking in de data.

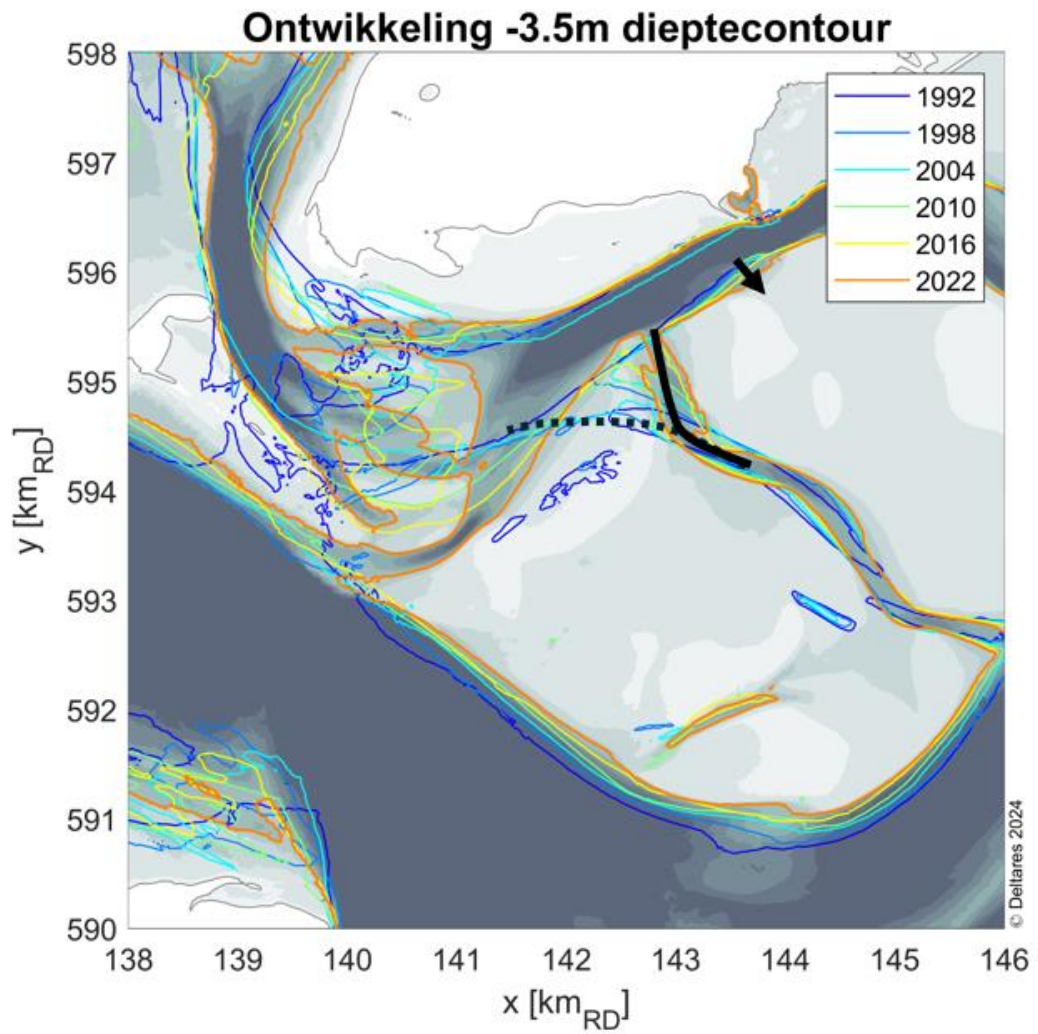
In 1992 was er langs de geulas, van Westmeep naar Schuitengat, een toename in het doorstroomoppervlak te zien. Dit met uitzondering van de aansluiting Slenk-Schuitengat, hier nam lokaal het doorstroomoppervlak weer af. In 2022 zien we dat er nog een lichte toename in doorstroomoppervlak is langs de geul, maar dat de helling hiervan af is genomen. Ook het doorstroomoppervlak in de aansluiting met Schuitengat is nu meer in lijn met de rest van de geul.

De sedimentatie bij de aansluiting kan daarmee meerdere oorzaken hebben. Het kan gestuurd worden vanuit Jacobsruggen, welke toenemen in hoogte (zie Hoofdstuk 4.4.1), of vanuit Slenk zelf. Hier lijken de stroomsnelheden tijdens eb de laatste jaren af te nemen (Figuur 6-3) en het doorstroomoppervlakte van de geul neemt toe bij de aansluiting met Schuitengat. Hierdoor kan hier makkelijker sedimentatie optreden. De veranderende oriëntatie hoeft voor de scheepvaart niet per se negatief te zijn, maar het effect is afhankelijk van de toekomstige ontwikkeling. Bij een doorgaande uitbouw van de Jacobsruggen in noordoostelijke richting, zal Slenk meer en meer een meanderende vorm krijgen. De verschuiving van de aansluiting Slenk – Schuitengat vertoont voorsnog een geleidelijke trend, wat een verdere verschuiving in de toekomst kan betekenen.

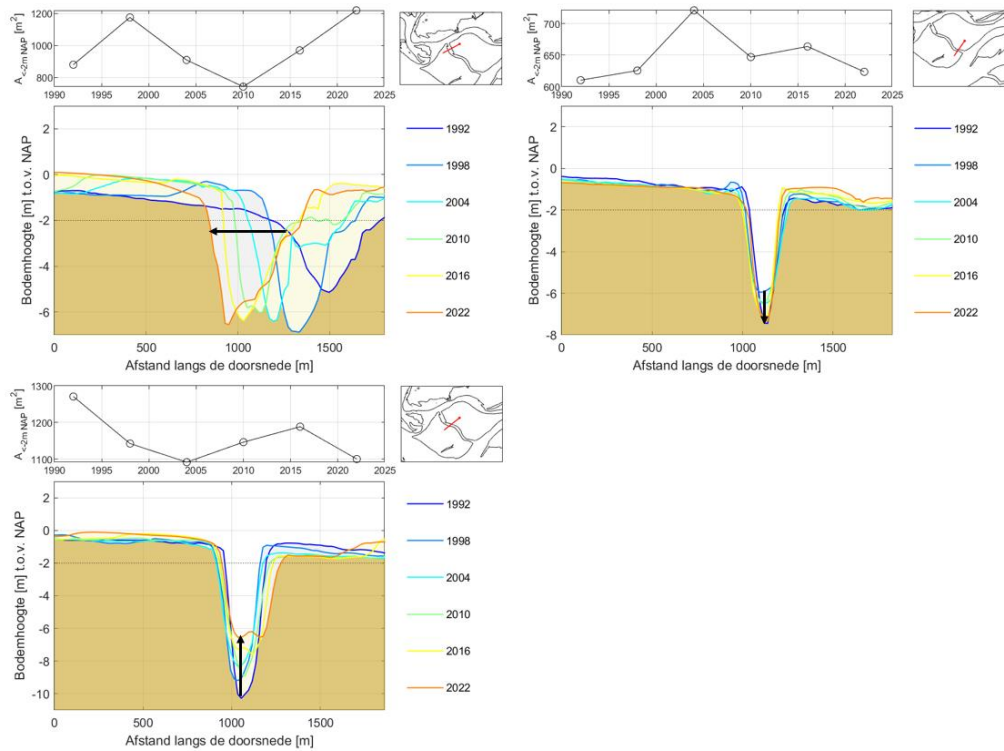
De ligging van het Schuitengat ten oosten van de aansluiting met Slenk is vrij stabiel (Figuur 6-25). De diepte neemt tussen 1992 en 2022 af van ca. 15 m naar ca. 12 m, tegelijkertijd wordt de geul breder. Hiermee blijft het doorstroomoppervlakte nagenoeg gelijk. Meer richting het oosten heeft de geul een stabiele diepte van ca. NAP -18 m en treedt uitbouw van de geul richting Groote Plaat op. Net ten westen van de aansluiting met Slenk wordt Schuitengat dieper en is de aanzanding van de hoek van Jacobsruggen ook duidelijk in het geulprofiel te zien.



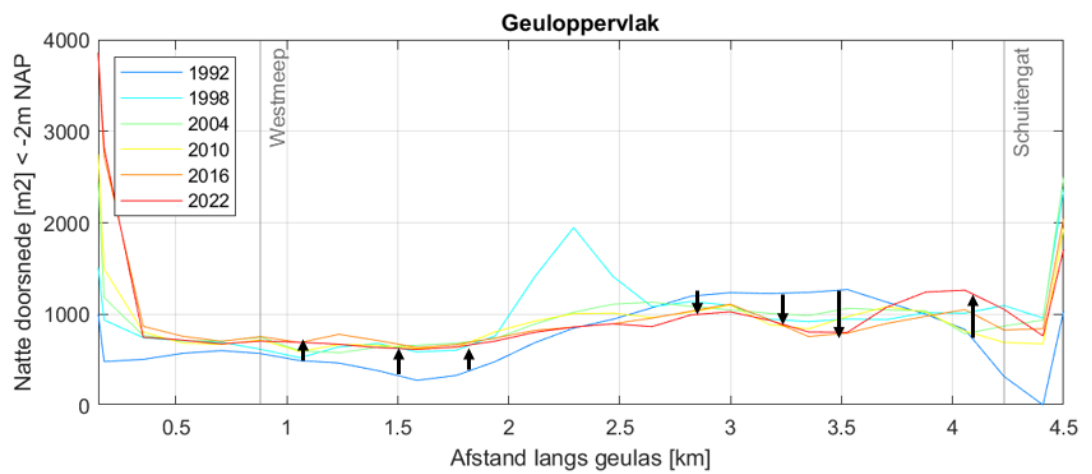
Figuur 6-21: Locatie verspreidingslocatie in Schuitengat.



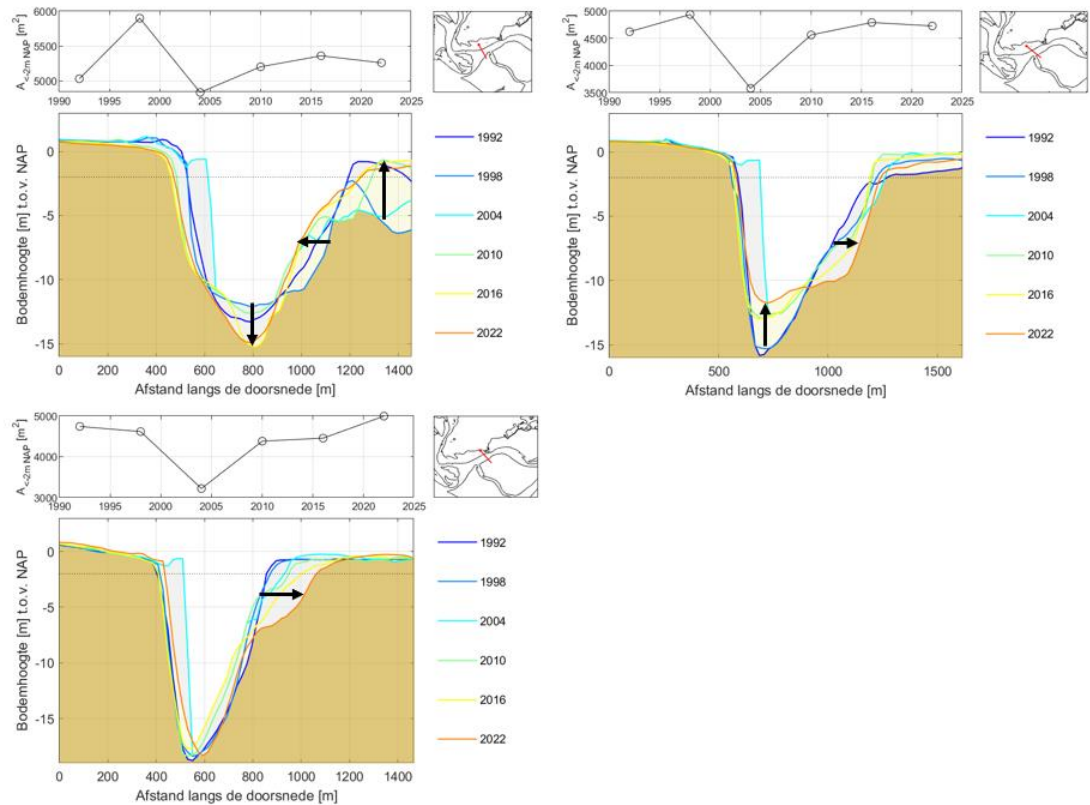
Figuur 6-22: Ligging contourlijnen op NAP -3,5 m rondom Slenk en Schuitengat.



Figuur 6-23: Ontwikkeling op profielen langs Slenk.



Figuur 6-24: Natte doorsnede over de periode 1992-2022 langs de Slenk.



Figuur 6-25: Ontwikkeling op profielen langs Schuitengat.

6.5 Samenvatting

De belangrijkste bevindingen uit dit hoofdstuk zijn als volgt:

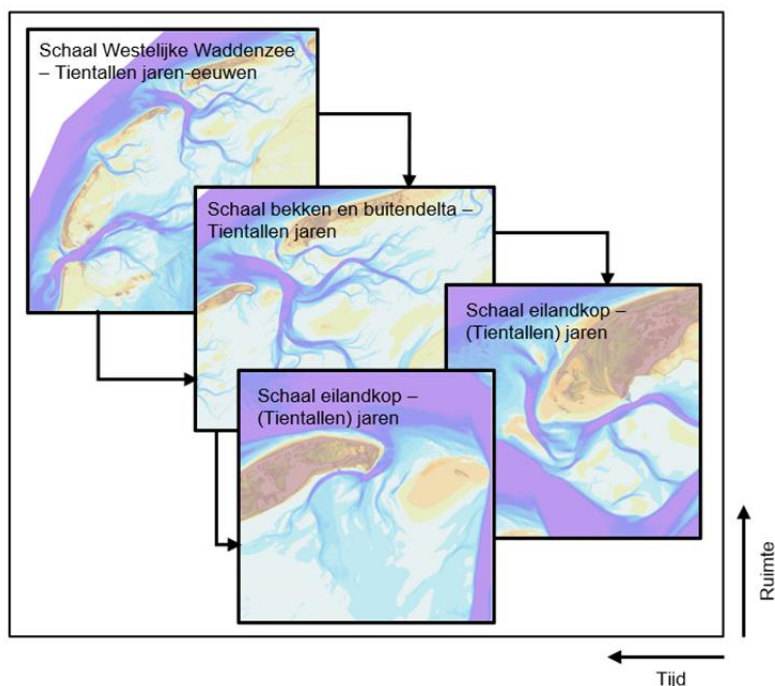
- **Centrale eilandkust en aanlandingsbanken:** de ligging van de kustlijn is variabel door de ligging van aanlandingsbanken en bijbehorende troggen voor de kust. De kustdwarse aanlandingsbanken hebben een herhalingstijd van 10-15 jaar. In 2024 is een bank in het proces van aanlanding;
- **Engelschhoek:** de ligging van de bank Engelschhoek zorgt voor een scheiding tussen het Boomkensdiep/Schuitengat en de Vliestroom. Engelschhoek verplaatst en krimpt richting het zuidoosten, maar wordt in de toekomst naar verwachting gevoed door een nieuwe bank;
- **Noordsvaarder en Boomkensdiep:** door de verbinding tussen Boomkensdiep en Schuitengat blijft de getijstrooming door het Boomkensdiep relatief groot, resulterend in structurele erosie van de Noordsvaarder. Het Boomkensdiep is zich wel aan het terugtrekken van de buitendelta en wat aan het opvullen, voor de toekomstige ontwikkeling is de ontwikkeling van de Doorsteek en het drempelgebied van belang;
- **Drempelgebied en Schuitengat:** het drempelgebied tussen Schuitengat en Boomkensdiep heeft zich uitgebreid in omvang, waarbij de geulen en drempels zeer dynamisch zijn. De Zuidschaar heeft zich richting het zuidoosten verplaatst en een verbinding gemaakt met de Vliestroom, de Doorsteek. De toekomstige ontwikkeling van dit gebied is moeilijk te voorspellen;
- **Slenk en Schuitengat:** Slenk heeft een vrij stabiele ligging. De grootste verandering is het verschuiven van de aansluiting Slenk – Schuitengat van het noordwesten naar het noorden. Dit lijkt zich door te zetten en kan leiden tot een bochtiger verloop van Slenk. Het oostelijke deel van Schuitengat heeft een stabiele ligging.

7 Conceptueel morfologisch model

7.1 Inleiding

Het conceptuele model is opgebouwd uit drie schaalniveaus: de grootste schaal omvat de westelijke Waddenzee, de middenschaal het bekken en de buitendelta van het Vlie, en de kleinste schaal zoomt in op de eilandkoppen (Figuur 7-1). Op het schaalniveau van de westelijke Waddenzee spelen veranderingen op de tijdschaal van tientallen jaren tot eeuwen die hebben gezorgd voor grootschalige veranderingen in het systeem van de Waddenzee, denk bijvoorbeeld aan de bouw van de Afsluitdijk en zeespiegelstijging. Deze grootschalige veranderingen werken door naar de schaal van het bekken en de buitendelta van het Vlie. Op dit schaalniveau wordt bijvoorbeeld gekeken naar patronen van erosie en sedimentatie binnen het bekken, de verandering van debieten en de verplaatsing van geulen en platen. Deze ontwikkelingen vormen op hun beurt de context en randvoorwaarden voor de ontwikkeling van de eilandkoppen.

N.B. de conceptuele modellen zoals hier gepresenteerd zijn ontwikkeld in samenspraak met de studie naar de knelpunten Harlingen-Noordzee (Quataert et al., 2024).



Figuur 7-1: Overzicht van de drie schaalniveaus van het conceptuele model.

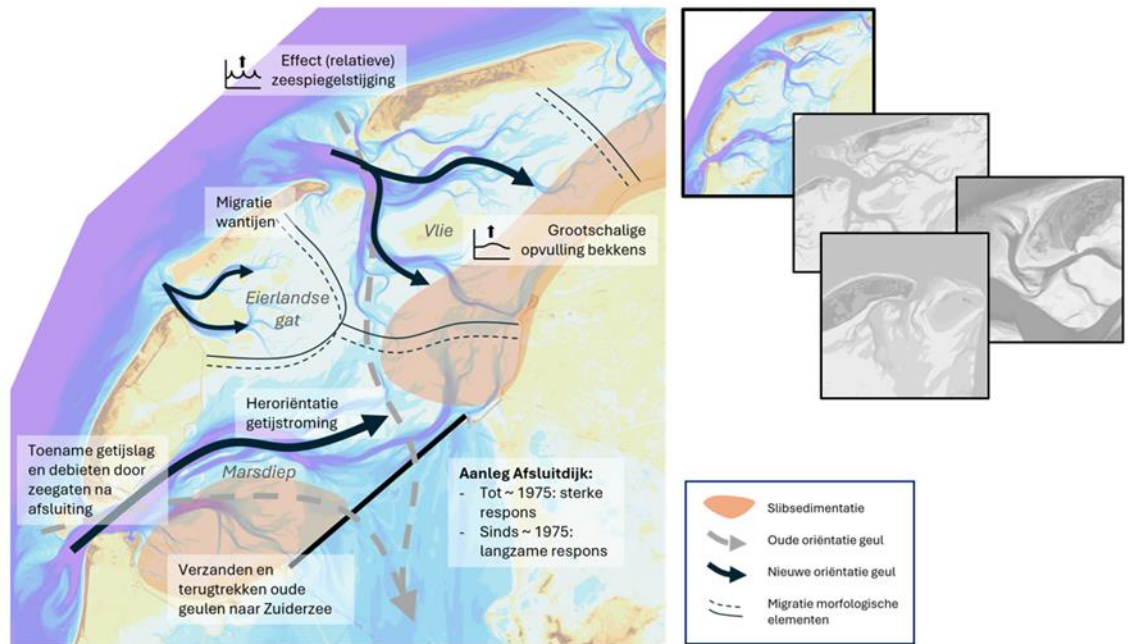
7.2 Schaal 1: Westelijke Waddenzee

Op de grootste tijd- en ruimteschaal heeft de aanleg van de Afsluitdijk in 1932 een vormende invloed gehad op de westelijke Waddenzee. De effecten van de afsluiting waren het sterkst in de decennia na afsluiting, tot ca. 1975. In deze periode vult het bekken sterk op met sediment. Sinds 1975 is de respons minder sterk, maar de effecten werken nog altijd door.

Als gevolg van de afsluiting heeft een heroriëntatie van de getijstrooming plaatsgevonden. Voor de afsluiting liepen geulen vanuit het Marsdiep en het Vlie door naar de Zuiderzee. Als gevolg van de heroriëntatie van de getijstrooming verschoven de wantijen in de westelijke Waddenzee

in oostelijke richting. Het kombergingsgebied Marsdiep nam hierdoor in oppervlakte toe ten koste van het Vlie. Door de combinatie van de afname van het kombergingsgebied en de invulling van het bekken nemen de debieten door het zeegat in het Vlie in recente jaren af.

In geulen die vroeger naar de Zuiderzee liepen, vond grootschalige sedimentatie plaats. De bekkens, die na de afsluiting plotseling veel kleiner geworden waren, begonnen sediment te importeren om tot een nieuwe evenwichtssituatie te komen (Elias et al., 2012). Initieel was deze respons van opvulling en netto sedimentimport het sterkst, in recente jaren neemt de trend in sedimentatie af van ca 2,3 Mm³/jaar over 1933 – 2015, naar 1,44 Mm³/jaar over 1991 – 2022 voor het Vlie (Elias, 2019). De toename in plaatvolume vind met name plaats langs de Friese vastelandskust en bestaat voor een toenemend deel uit slijsedimentatie (Colina Alonso, 2020).



Figuur 7-2: Ontwikkelingen op de schaal van de Westelijke Waddenzee, op de tijdschaal van tientallen jaren tot eeuwen.

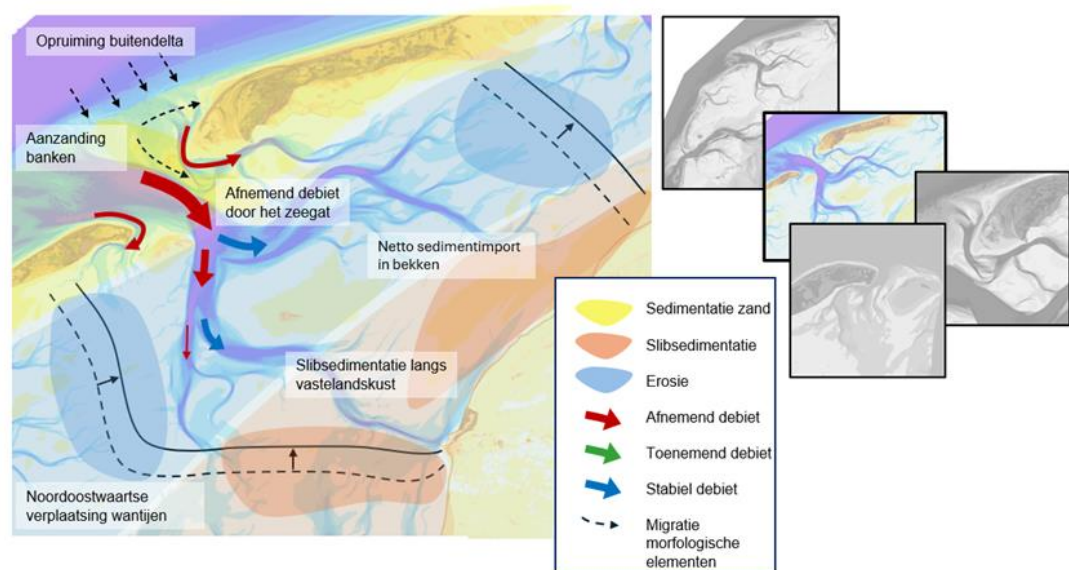
7.3 Schaal 2: Bekken & buitendelta

De sedimentimport op grote schaal als gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee werkt door op de schaal van het Vlie. Vanwege de netto import neemt het kombergingsvolume van het Vlie af, waardoor ook het debiet door het zeegat gestaag afneemt. Dit geldt zowel voor de hoofdgeul, als de secundaire geulen om de eilandkoppen. Deze sedimentimport is echter niet overal even sterk merkbaar. In het bekken kunnen drie zones worden onderscheiden:

- Met name de plaatgebieden langs de Friese vastelandskust nemen toe in volume en hoogte, voor een groot deel door slijsedimentatie;
- Centraal in het bekken vindt juist erosie plaats, met name rondom de wantijen;
- De platen in de keel groeien in hoogte door sedimentuitwisseling met de buitendelta.

Een andere ontwikkeling die van de grote schaal doorwerkt naar dit schaalniveau is de verplaatsing van de morfologische wantijen. Door deze verplaatsing noordoostwaarts krimpt het Vlie in het westelijke deel en breidt het uit naar het oosten. Netto neemt het bekkenoppervlakte af.

De buitendelta verliest juist sediment en wordt onder invloed van golven richting de kust verplaatst. Een deel van dit zand zorgt voor groei van centrale banken op de buitendelta, die kustlans of het zeegat in getransporteerd worden. Deze sedimentaanvoer heeft een grote invloed op de schaal van de eilandkoppen.



Figuur 7-3: Ontwikkelingen op de schaal van het bekken en de buitendelta van het Vlie, op een tijdschaal van tientallen jaren.

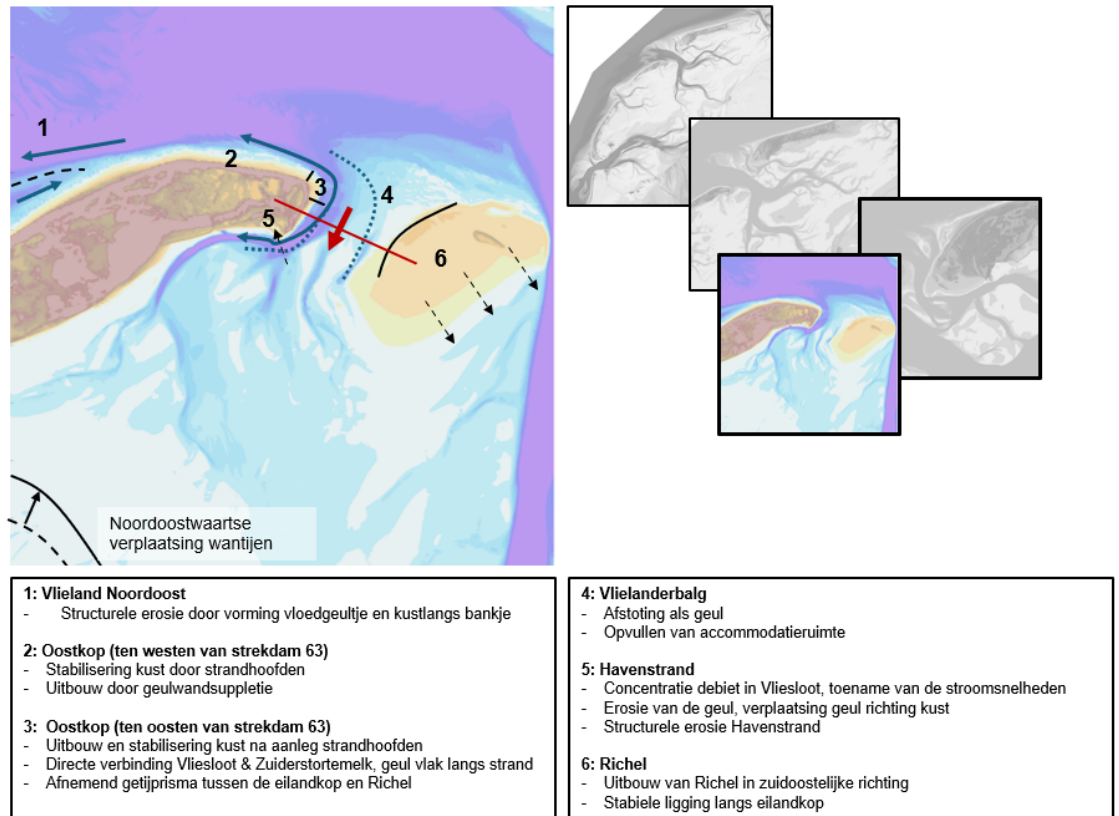
7.4 Schaal 3: eilandkoppen

7.4.1 Eilandkop Vlieland

Op de schaal van de eilandkoppen speelt de ligging van individuele platen en geulen een rol. De directe verbinding tussen Zuiderstortemelk en Vliesloot en de ligging vlak om de eilandkop zorgt voor erosie, welke hier wordt bestreden door de aanleg van kustbescherming in de vorm van strandhoofden en het aanbrengen van suppleties.

De afname van het debiet door het zeegat, en specifiek tussen de eilandkop en Richel door, en het verkleinen van het kombergingsgebied zorgt voor het afstoten van de Vlielanderbalg als geul en het opvullen van accommodatieruimte. Het resterende debiet concentreert zich rondom de eilandkop in de Vliesloot, die daardoor erodeert en verplaatst richting het Havenstrand. Dit zorgt voor structurele erosie bij het Havenstrand. De verwachting is dat dit proces zich voortzet of in stand gehouden wordt: de afwatering verloopt voornamelijk via de Vliesloot en er heeft zich tot nu toe geen nieuwe doorgaande geul ontwikkeld.

Door aanvoer van sediment vanaf de buitendelta kan de droogliggende plaat Richel in zuidoostelijke richting groeien. Aan de zijde van de eilandkop heeft Richel een stabiele ligging.



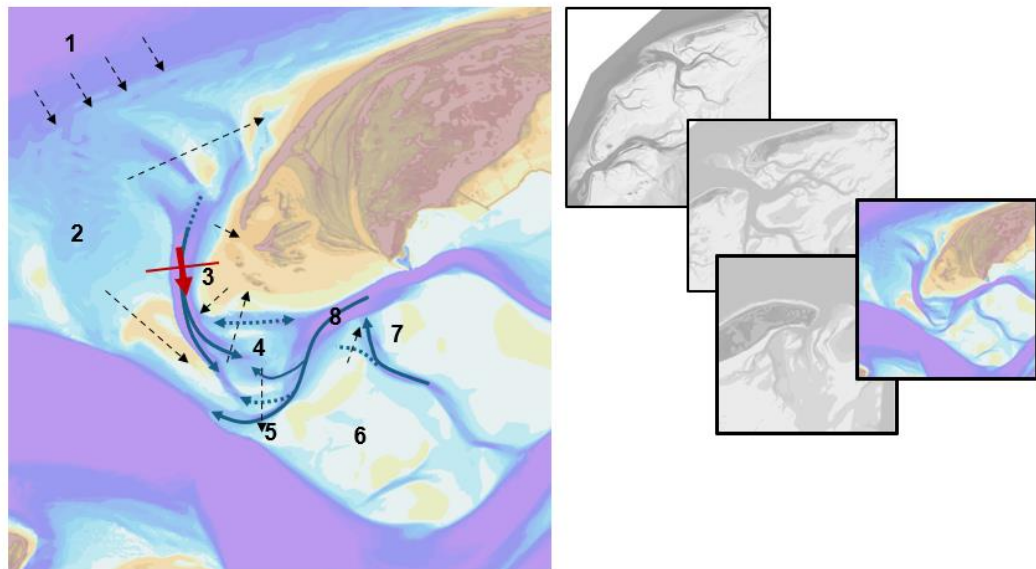
Figuur 7-4: Ontwikkelingen op de schaal van de eilandkop van Vlieland, op een tijdschaal van jaren.

7.4.2 Eilandkop Terschelling

De verplaatsing van de buitendelta in landwaartse richting en de resulterende zandaanvoer is een van de drijvende krachten voor de ontwikkelingen rondom de eilandkop van Terschelling. De hoge banken, gevormd op de buitendelta als gevolg van landwaarts transport, worden enerzijds richting de eilandkust verplaatst als aanlandingsbanken. Anderzijds worden ze het zeegat in getransporteerd als centrale hoge bank (Engelschhoek). Dit zorgt voor een scheiding tussen Boomkensdiep-Schuitengat en de Vliestroom en een verlegging van de vaarroute naar Slenk. Door de oprukkende buitendelta trekt ook Boomkensdiep zich terug van de buitendelta, opvulling van het Boomkensdiep wordt voorlopig tegengegaan door de directe verbinding tussen Boomkensdiep-Schuitengat en de resulterende stroming.

Het drempelgebied, de aansluiting tussen Boomkensdiep en Schuitengat en omringd door de hoge platen van Engelschhoek en Jacobsruggen, is zeer dynamisch. Door uitbochting van Schuitengat en Boomkensdiep en een grote beschikbaarheid van zand neemt het drempelcomplex toe in omvang en laat een dynamische vorming en verplaatsing van geulen en drempels zien. Sinds 2016 is er weer een verbinding tussen Schuitengat en Vliestroom, waarvan de stabiliteit nog moeilijk te voorspellen is.

Slenk, waardoor de huidige vaarroute naar West-Terschelling loopt, is over het algemeen een vrij stabiele geul. De aansluiting van Slenk op Schuitengat verschuift echter, waardoor de geul een meanderende vorm krijgt. De vrij constante trend duidt erop dat dit in de toekomst zou kunnen doorzetten.



1: Buitendelta

- Opruiming buitendelta
- Landwaarts transport

2: Buitendeltaplatform

- Vorming hoge banken
- Periodieke aanlanding banken op centrale eilandkust
- Periode vorming Engelschoek, zuidoostelijke migratie

3: Boompensdiep

- Afname debieten
- Terugtrekking van de buitendelta
- Uitbochting naar het zuidwesten
- Erosie Noordsvaarder, uitbouw kop

4: Noordschaar

- Verplaatsing naar het noorden + opvulling
- Vorming nieuwe geul dwars door drempelgebied

5: Zuidschaar

- Verplaatsing naar het zuidoosten
- Vorming Doorsteek
- Vorming nieuwe ebschaar, verplaatsing naar het zuiden

6: Jacobsruggen

- Groei in hoogte

7: Slenk

- Uitbouw Jacobsruggen in noordoostelijke richting → veranderende oriëntatie aansluiting Slenk

8: Schuitengat

- Afname debiet
- Stabiele ligging

Figuur 7-5: Ontwikkelingen op de schaal van de eilandkop van Terschelling, op een tijdschaal van jaren.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

Binnen het deelprogramma 'Systeemkennis Zeegaten' van het SITO-PS B&O Kust programma focust deze studie op de kennisontwikkeling van het zeegat van het Vlie en de aangrenzende zandige eilandkoppen van Vlieland en Terschelling. Door een integrale aanpak, waarbij zowel de Noordzeekust, de eilandkoppen als het bekken worden betrokken ontstaat een vollediger beeld van de morfologische processen. Dit dient ter ondersteuning van een optimaal beheer van kust en vaargeul rondom de eilandkoppen. In deze studie is gebruikgemaakt van een combinatie van grootschalige volume- en trendanalyses op basis van gedetailleerde bodemdata van het bekken en de buitendelta, aangevuld met detailanalyses van bodem- en satellietdata rondom de eilandkoppen en ondersteund door hydrodynamische modellering.

Op de schaal van het bekken en de buitendelta kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De buitendelta verplaatst landwaarts, waarbij vooral op de diepe vooroever en aan de rand van de buitendelta een volumevermindering optreedt;
- Er vindt groei plaats van aanlandingsbanken en hoge, centrale banken in het zeegat;
- Door de verschuiving van het oostelijke en westelijke morfologisch wantij neemt de oppervlakte van het bekken af wat gepaard gaat met een lichte afname van het getijprisma door het zeegat;
- Het bekken vult zich op, maar de opvulsnelheid is afgenomen in vergelijking met de periode direct na afsluiting van de Zuiderzee.

Conclusies op de schaal van de eilandkop van Vlieland zijn:

- Bij Vlieland Noordoost treedt structurele erosie op door de ligging van vloedgeultjes vlak langs de kust. Een vooroeversuppletie, bedoeld om deze geultjes te dichten, heeft dit probleem niet opgelost, aangezien steeds een nieuw vloedgeultje ontstaat;
- Het rechte deel van de eilandkop heeft een relatief stabiele kustlijnpositie, dankzij de aanwezigheid van strandhoofden en het aanbrengen van suppleties. Op de kop zelf heeft de kust zich aanzienlijk uitgebreid door de aanleg van strekdam 63 en 64. Waar het Zuiderstortemelk eerst nog verbonden was met de Vlielandbalg, loopt de stroming nu via een directe verbinding met de Vliesloot dicht langs de kop;
- Door het opvullen van de Vlielandbalg en de daardoor geconcentreerde stroming in de Vliesloot, komt de Vliesloot steeds dicht bij het Havenstrand te liggen. Lokaal nemen de stroomsnelheden toe, wat leidt tot structurele erosie bij het Havenstrand en wat de ruimte voor suppleties beperkt. Er is geen reden om te verwachten dat deze erosie in de nabije toekomst zal afnemen.

Met betrekking tot de eilandkop van Terschelling kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De ligging van de kustlijn bij de overgang naar de centrale eilandkust is variabel door de aanlanding van banken. De kustdwarse aanlandingsbanken hebben een herhalingsstijd van 10-15 jaar. In 2024 is er een bank in het proces van aanlanding. De huidige aanlandingsbanken zijn kleiner dan in het verleden, en naar verwachting zal in de toekomst de zandtoevoer vanuit de buitendelta afnemen;
- De ligging van de bank Engelschhoek zorgt voor een scheiding tussen het Boomkensdiep/Schuitengat en de Vliestroom. Engelschhoek zal naar verwachting in de

toekomst worden gevoed door een nieuwe bank en lijkt daarmee in de nabije toekomst niet te verdwijnen;

- Door de verbinding tussen het Boomkensdiep en het Schuitengat blijft de getijstroming door het Boomkensdiep relatief groot, wat resulteert in structurele erosie van de Noordsvaarder. Het Boomkensdiep trekt zich echter terug van de buitendelta, en voor de toekomstige ontwikkeling is de evolutie van de Doorsteek en het drempelgebied van belang;
- Het drempelgebied tussen het Schuitengat en het Boomkensdiep is in omvang toegenomen, waarbij de geulen en drempels zeer dynamisch zijn. Sinds 2016 is er weer een verbinding tussen het Schuitengat en de Vliestroom, via de Doorsteek. De toekomstige ontwikkeling van dit gebied is moeilijk te voorspellen en de Doorsteek lijkt geen betrouwbare vaarroute te vormen;
- De oriëntatie van de aansluiting van de Slenk op het Schuitengat is aan het veranderen. Deze ontwikkeling lijkt door te zetten en kan leiden tot een bochtiger verloop van de Slenk.

8.2 Aanbevelingen

Deze studie geeft een overzicht van de morfologische ontwikkelingen rondom de eilandkoppen van Vlieland en Terschelling. Aangezien er geen specifieke beheervragen waren, is gefocust op het verkrijgen van grootschalige inzichten. Vooral de morfologische ontwikkeling rondom de eilandkop van Terschelling blijkt zeer complex en daardoor moeilijk te voorspellen. Aanbevolen wordt om meer inzicht te verkrijgen in:

- De geuldynamiek van de aansluiting Boomkensdiep-Schuitengat en het drempelgebied, door middel van de analyse van beheerlodingen en gedetailleerde hydrodynamische modellering;
- De dynamiek van de aansluiting Slenk – Schuitengat en het effect van toekomstige ontwikkelingen op de scheepvaart en baggerwerkzaamheden.

Voor beide eilandkoppen geldt dat aanvullende inzichten in de hydrodynamica verkregen kunnen worden door modellering op een hoger detailniveau. De in deze studie gebruikte modelschematisatie heeft een relatief grove resolutie in verhouding tot de geulafmetingen. Een fijnmaziger model kan mogelijk ook meer inzicht geven in de relatie tussen de verdieping van de Waardgronden en het getijprisma door de Vliesloot.

9 Referenties

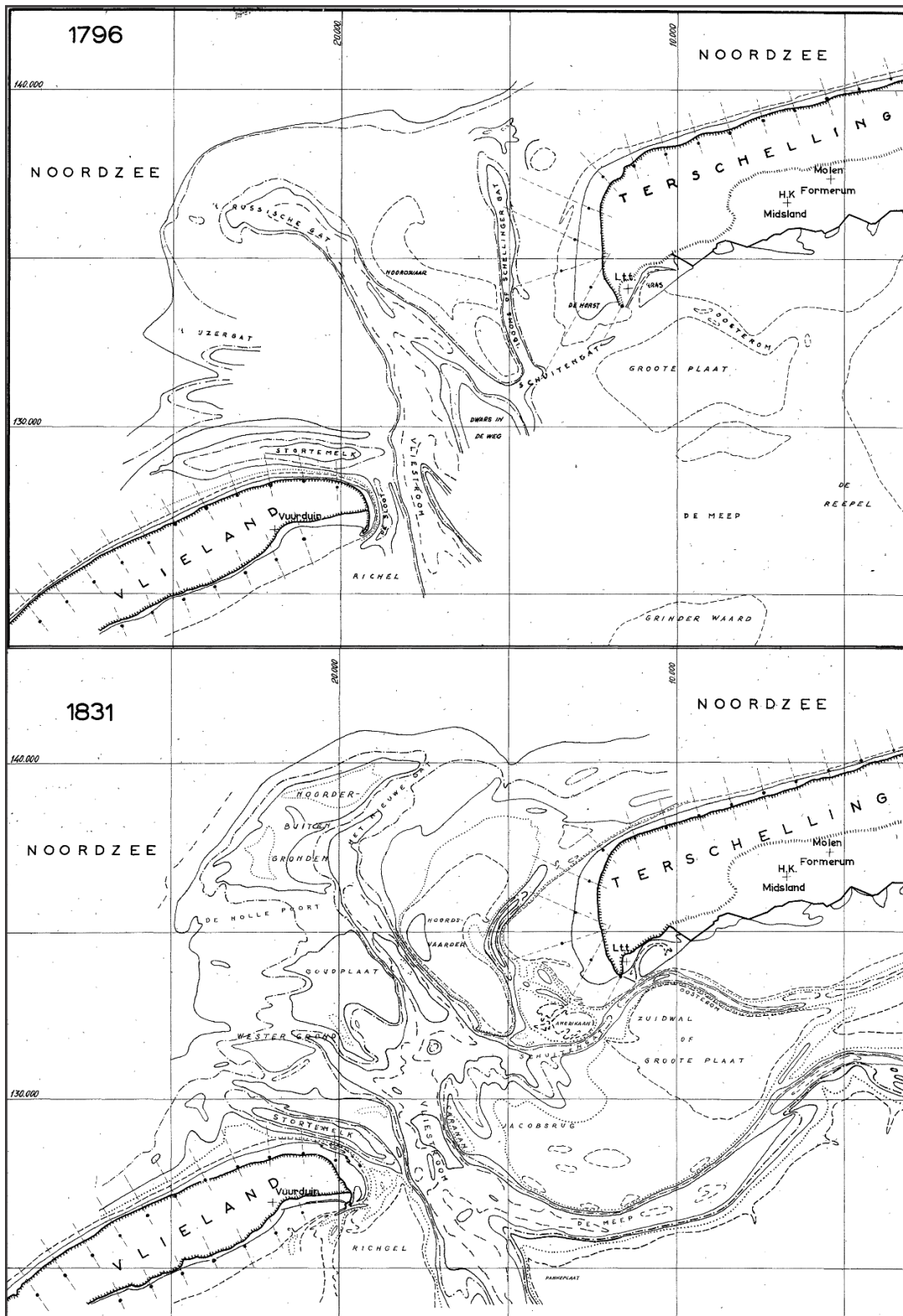
- Colina Alonso, A., (2020), Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee. Data analyse. Kenmerk: 11205229-001-ZKS-0003, 20-10-2020.
- De Kruijff, A.C., 2001. Bodemdieptegegevens van het Nederlandse Kuststelsel; Beschikbare Digitale Data en een Overzicht van Aanvullende Analoge Data. Report RIKZ/2001.041 (in Dutch), Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ, The Hague.
- Digipol, 1997. Gebruikershandleiding Digipol, 1997. versie 1.0. beheerder RWS/RIKZ.
- Duran-Matute M., Gerkema T., de Boer G.J., Nauw J.J., Gräwe U., 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Sciences* 10 (4), 611–632.
- Elias, E.P.L., 2018. Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015). Rapport 11202190-000-ZKS-0013, Deltares, Delft.
- Elias, E. (2019), Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Kenmerk: 11203683-001-ZKS-0002.
- Elias, E.P.L., 2021a. Morfologische ontwikkeling Vlieland Noordoost. Deltares rapport 11206794-001-ZKS-0002.
- Elias, E.P.L., 2021b. Morfologie van het Zeegat van het Vlie. Deltares rapport 11206794-004-ZKS-0003.
- Elias, E., Quataert, E., Taal, M., Vermeer, N., 2024. Sedimentbalans Nederlandse Kust. Deltares rapport 11207897-002-ZKS-0007.
- Elias, E.P.L., Stive, M.J.F., Bonekamp, J.G., Cleveringa, J., (2003). Tidal inlet dynamics in response to human intervention. *Coastal Engineering Journal*, 45(4): 629-658.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., De Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91-X (in Press).
- Glim, G.W., de Graaff, N., Kool, G., Lieshout, M.F. and de Boer, M., 1988. Erosie en sedimentatie in de binnendelta van het Zeegat van de Vlie 1933-1983. Rapportage ANWX-88.H204, Deelonderzoek 3, 54 pp.
- Grasmeijer, B., Jaksic, L., Vroom, J., 2022. Verkenning morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee. Deltares rapport 11208040-005-ZKS-0001.
- Hoogervorst, R.D.N., 2005. Inventarisatie bagger-, stort- en zandwinggegevens binnen de -20 m NAP. Ten behoeve van een zandbalans van het Nederlands kuststelsel. Report (werkdokument) RIKZ/KW/2005.103W, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ., (Den Haag): 59 pp.
- Hut, H.J., 2004. Project VLIEDEBI, Stroommeting Buitendelta Zeegat tussen Vlieland en Terschelling, 27 augustus 2002. Notitie 2003-212. Meetdienst van Rijkswaterstaat Noord-Nederland, 30 p.

- Lohr, J., 2024. Morphodynamics of the Vlie inlet. Internship report 2024.
- Meijers, C.H., Oost, A., Cleveringa, J., Taal, M. (2024). Kombergingsrapportage Vlie: Overzicht van informatie en kennis van het fysisch systeem. Versie 2024
- Mulder H.P.J., 2021. Prognose baggervolumes voor RWS in de Waddenzee vanaf 2021. Memo Rijkswaterstaat, 50p.
- Quataert, E., Elias, E., IJff, S., Hijma, M., 2021. Beheerbibliotheek Kust Vlieland. Deltares rapport 11206794-002-ZKS-0002.
- Quataert, E., Meijers, C., de Beer, A., Elias, E., 2024. Knelpuntenanalyse Harlingen-Noordzee: Conceptueel model en handelingsperspectief voor knelpunten in de vaargeul Harlingen – Noordzee. Deltares rapport 11210370-005-ZKS-0002.
- Rakhorst H.D., 1982. Inventarisatie zandwinning, Rijkswaterstaat Adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-82.H014, 73 pp.
- Rakhorst, H.D., 1984. Werking strandhoofden Noord-Holland, Vlieland, Rijkswaterstaat, adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-84.H007, 15 pag., 16 bijlagen.
- Rijkswaterstaat, 2024. Kustlijnkaarten 2024. 127 p.
- Van Sijp, D. 1989. Correcties op gemeten Eb- en vloedvolume bij omrekening naar gemiddeld getij in het Friesche Zeegat, Rapport ANW 89-02, Rijkswaterstaat, Directie Friesland, Leeuwarden.
- Thijssen, J.T., 1972. Een Halve Eeuw Zuiderzeewerken 1920-1970. Tjeenk Willink (Groningen): 469 pp. (in Dutch).
- Van Til, S. en Cleveringa, J., 2018. Morfologische dynamiek Schuitengat: Analyse t.b.v. de scheepvaartfunctie. Arcadis.
- Van Weerdenburg, R.J.A., 2019. Exploring the importance of wind for exchange processes around a tidal inlet system: the case of Ameland Inlet. MSc. Thesis Delft University of Technology, Delft, 78 p.
- Verhagen, H. J. en van Rossum, H., 1990. Strandhoofden en paalrijen: evaluatie van hun werking. Min V&W, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde
- Visser, C., De Graaff, N., De Boer, M., 1986. Het vermogen van het Zeegat van het Vlie. ANW-86.H205. 14 pp.
- Vroom, J., Elias, E., Lescinski, J. & Wang, Z., 2012. Assessment of the effects of the Zuider Sea closure on the hydrodynamics of the Wadden inlets. sl, ICCE proceedings 2012.
- Wagenaar, M., 2024. Morphological Characteristics of the Present-day Wadden Sea: 1985-2023. Internship report.
- Walhout, T. (1988). Het kustgedrag van Vlieland van 1688-1992 en de rol van de strandhoofden daarin. Werkdocument RIKZ/AB-98.807x.
- Wang, Z.B., Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Lodder, Q.L., 2018. Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea - impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. Netherlands Journal of Geosciences, October 2018.

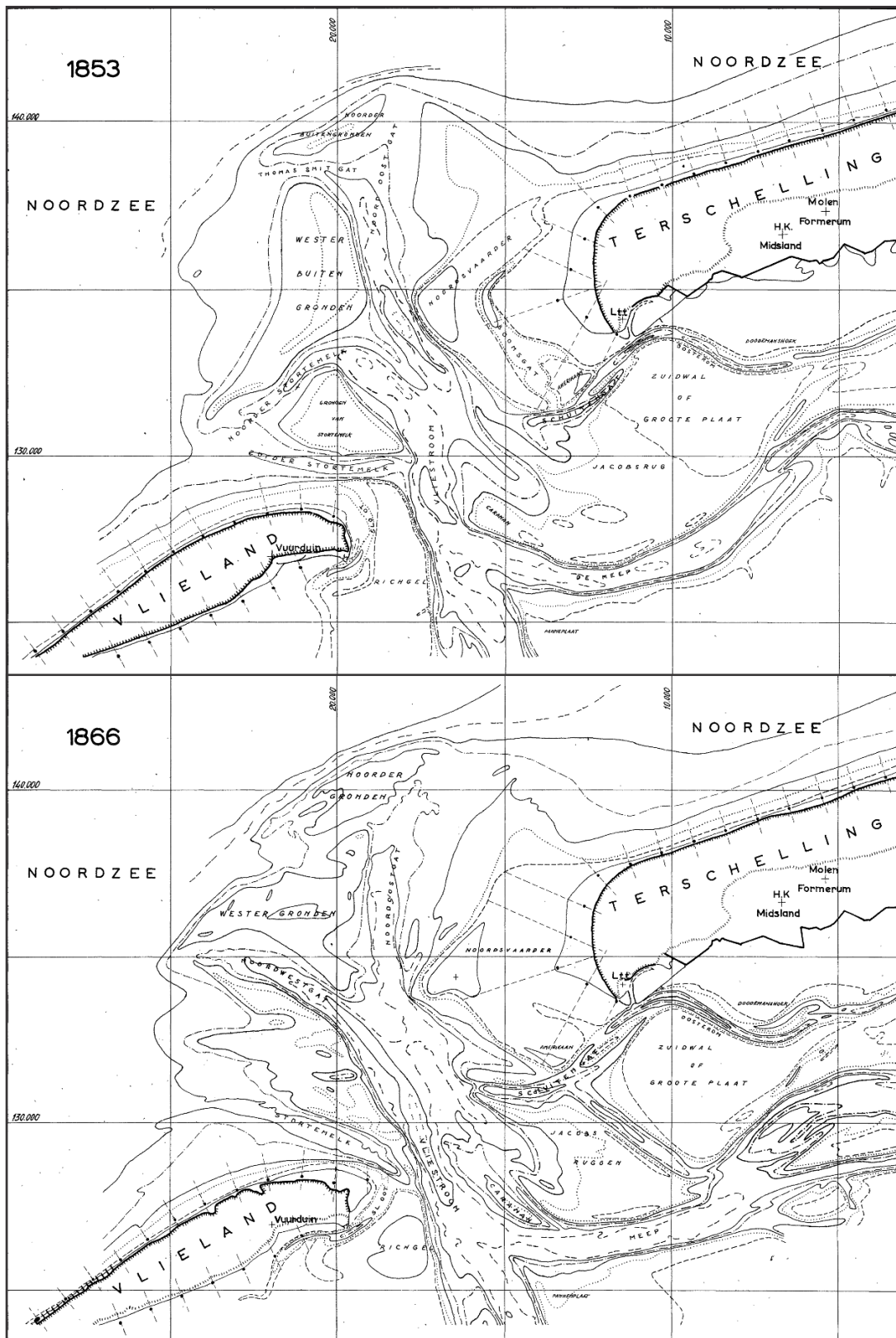
Zijl. F., Groenenboom. J., Laan, S., Zijker T., 2022. DCSM-FM 100m: a sixth-generation model for the NW European Shelf. Deltares rapport 11208054-004-ZKS-0002.

A Bodemdata

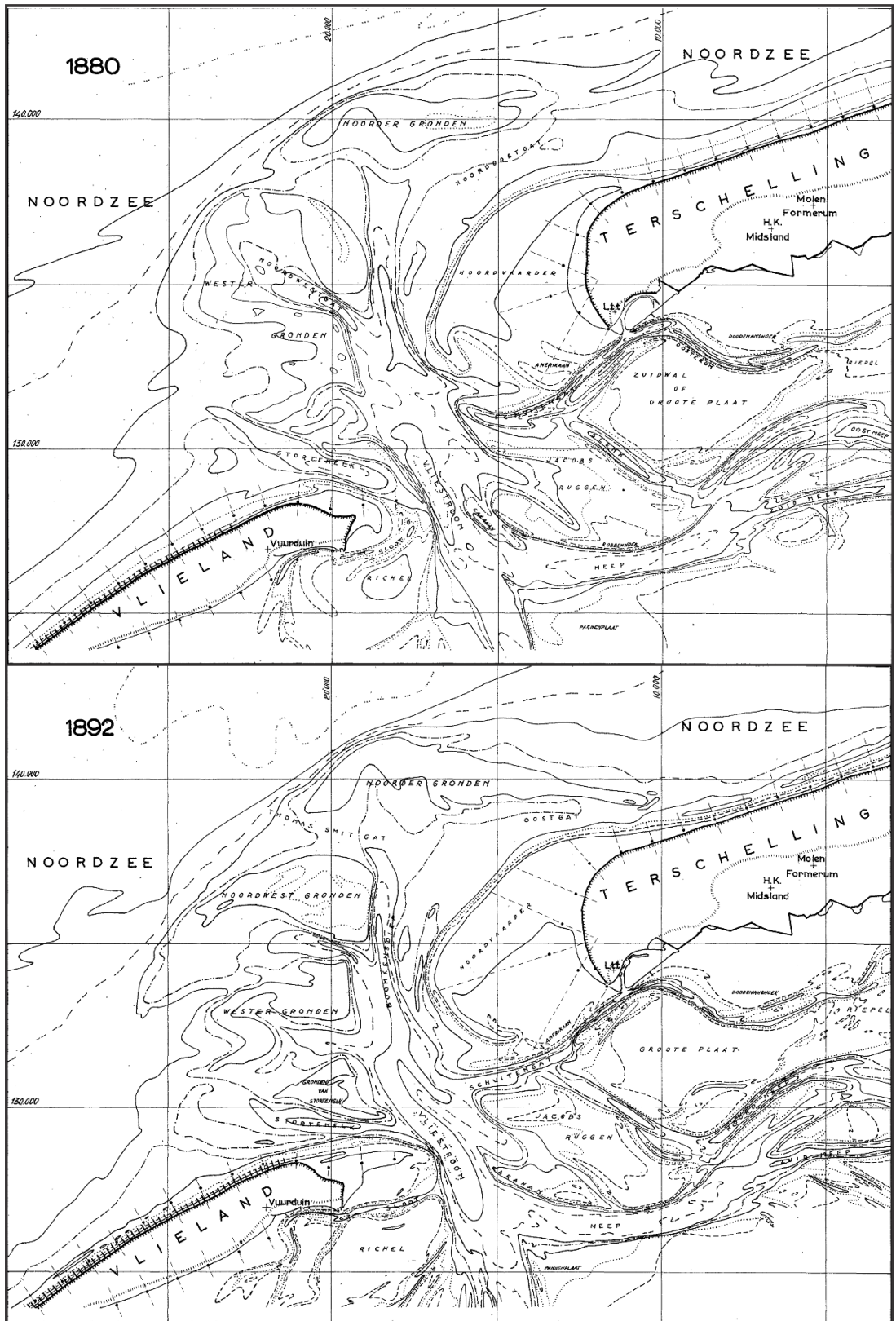
A.1 Hydrografische Kaarten



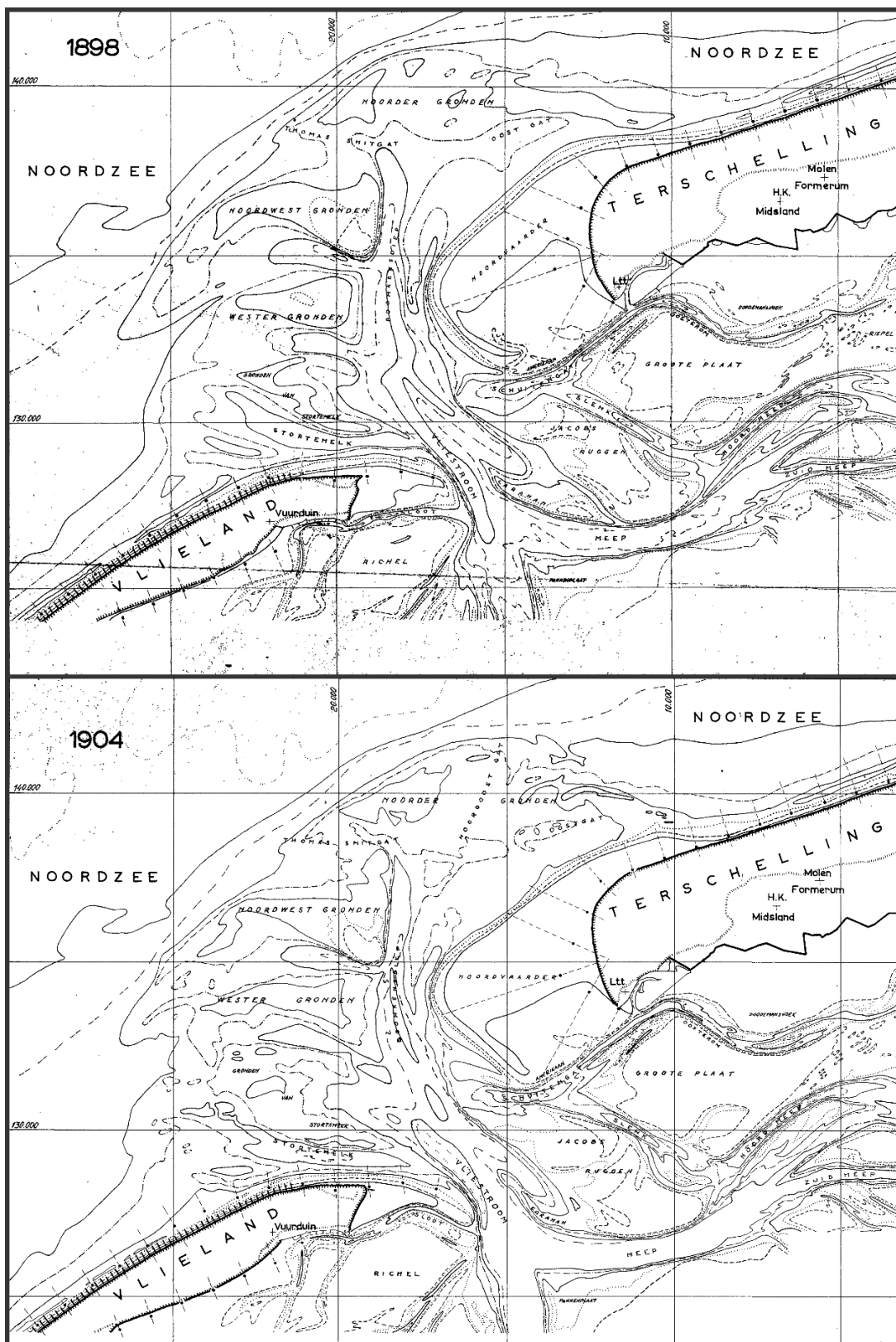
Figuur A- 1: Hydrografische kaart voor de jaren 1796 en 1831.



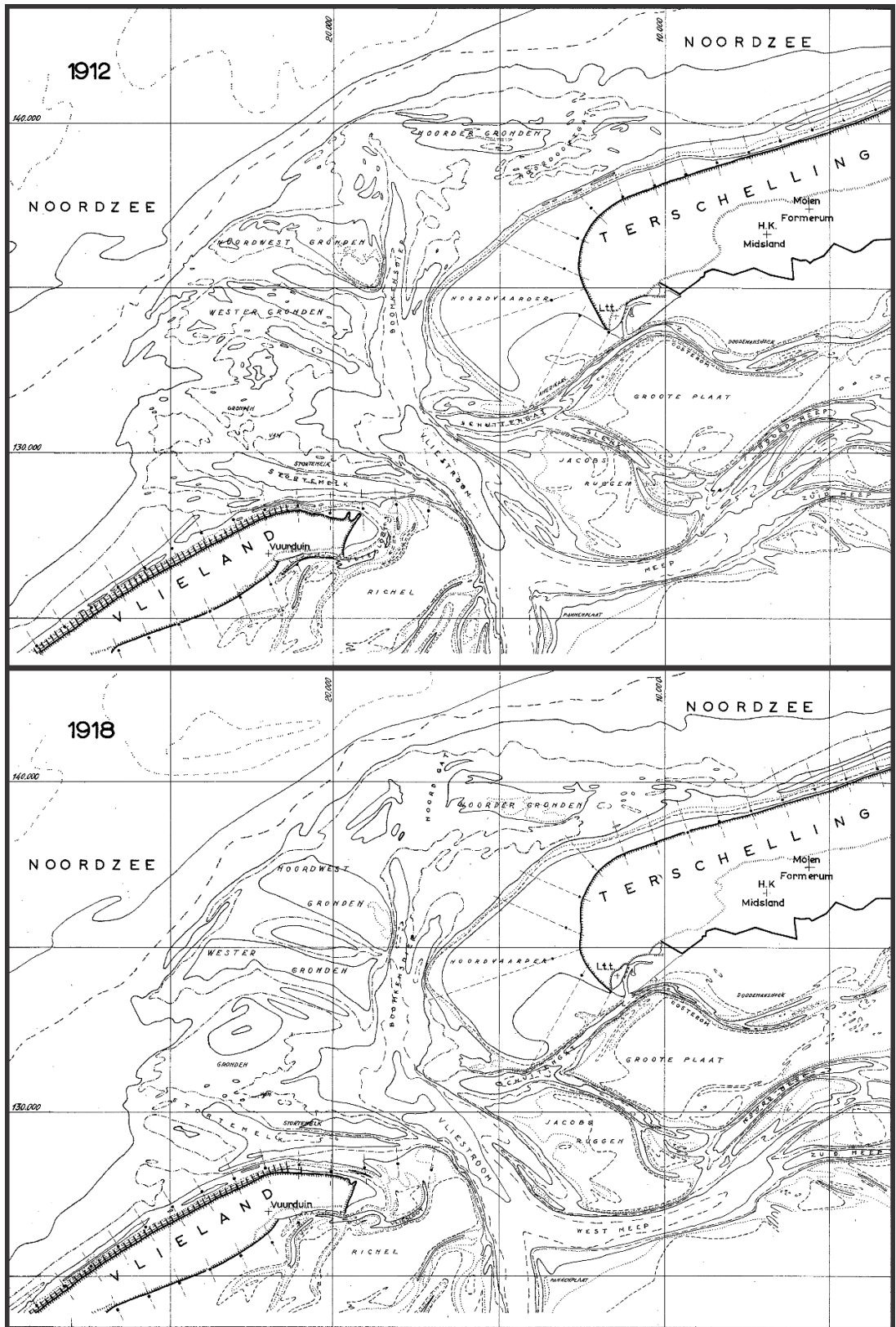
Figuur A- 2: Hydrografische kaart voor de jaren 1853 en 1866.



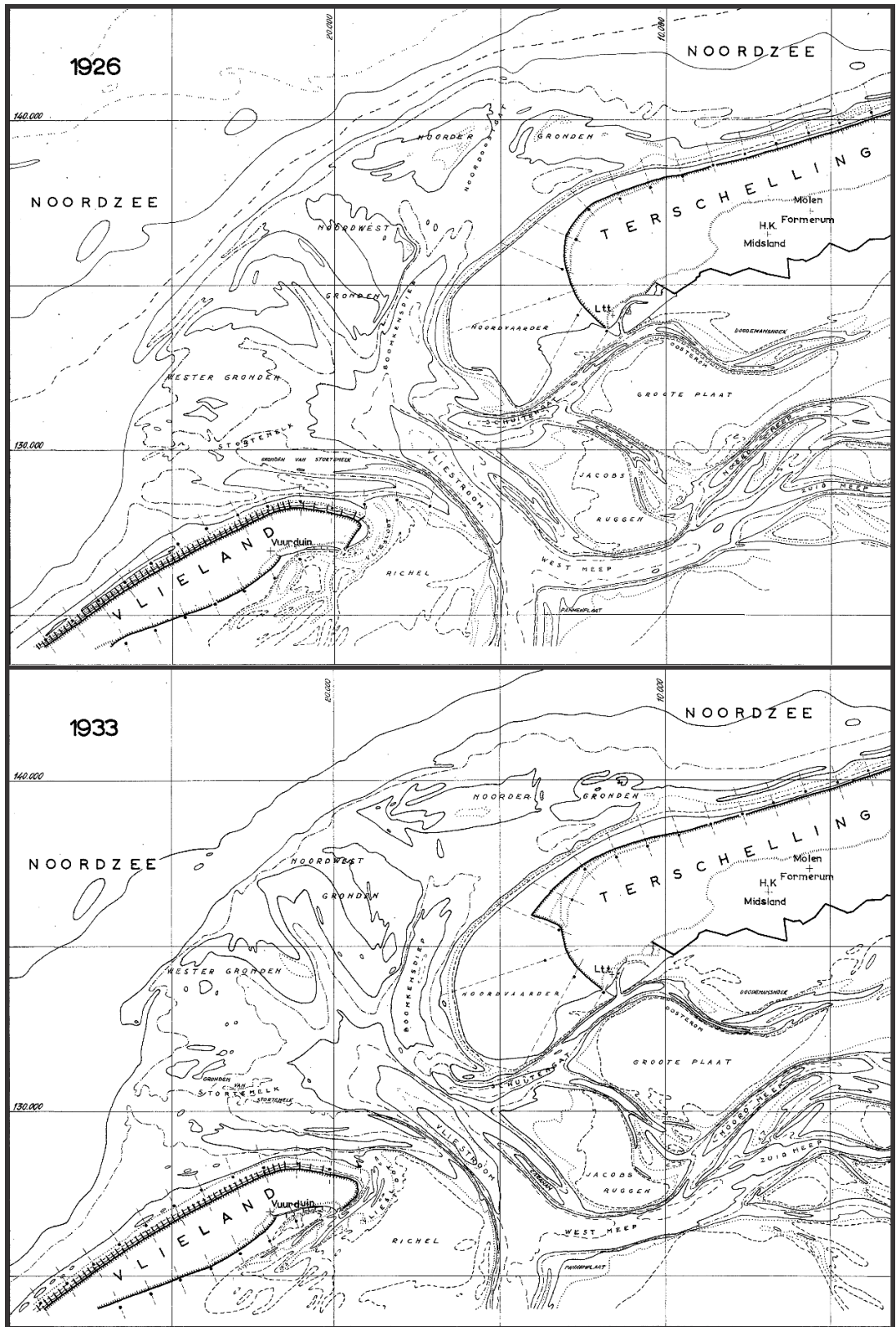
Figuur A- 3: Hydrografische kaart voor de jaren 1880 en 1892.



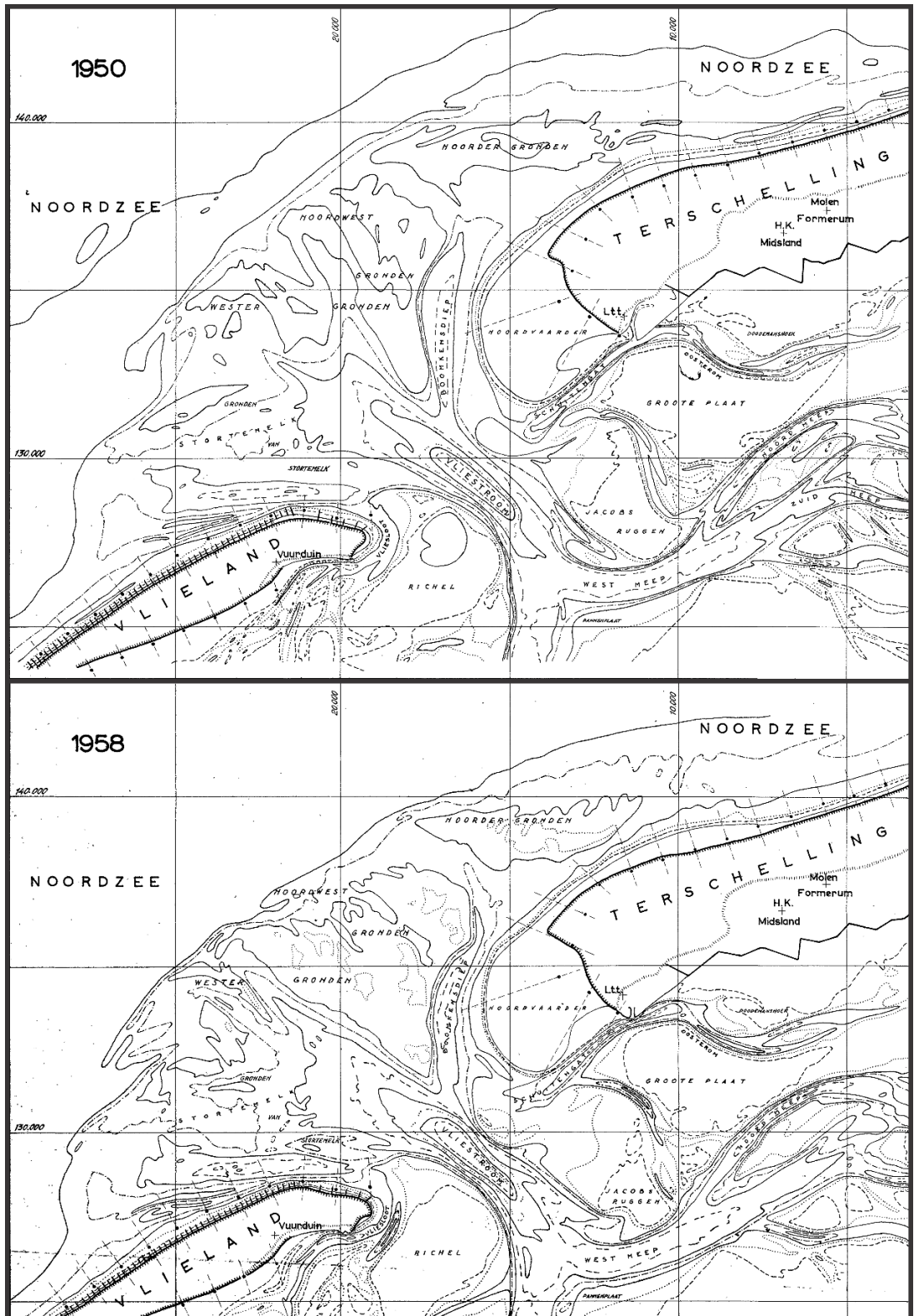
Figuur A- 4: Hydrografische kaart voor de jaren 1898 en 1904 .



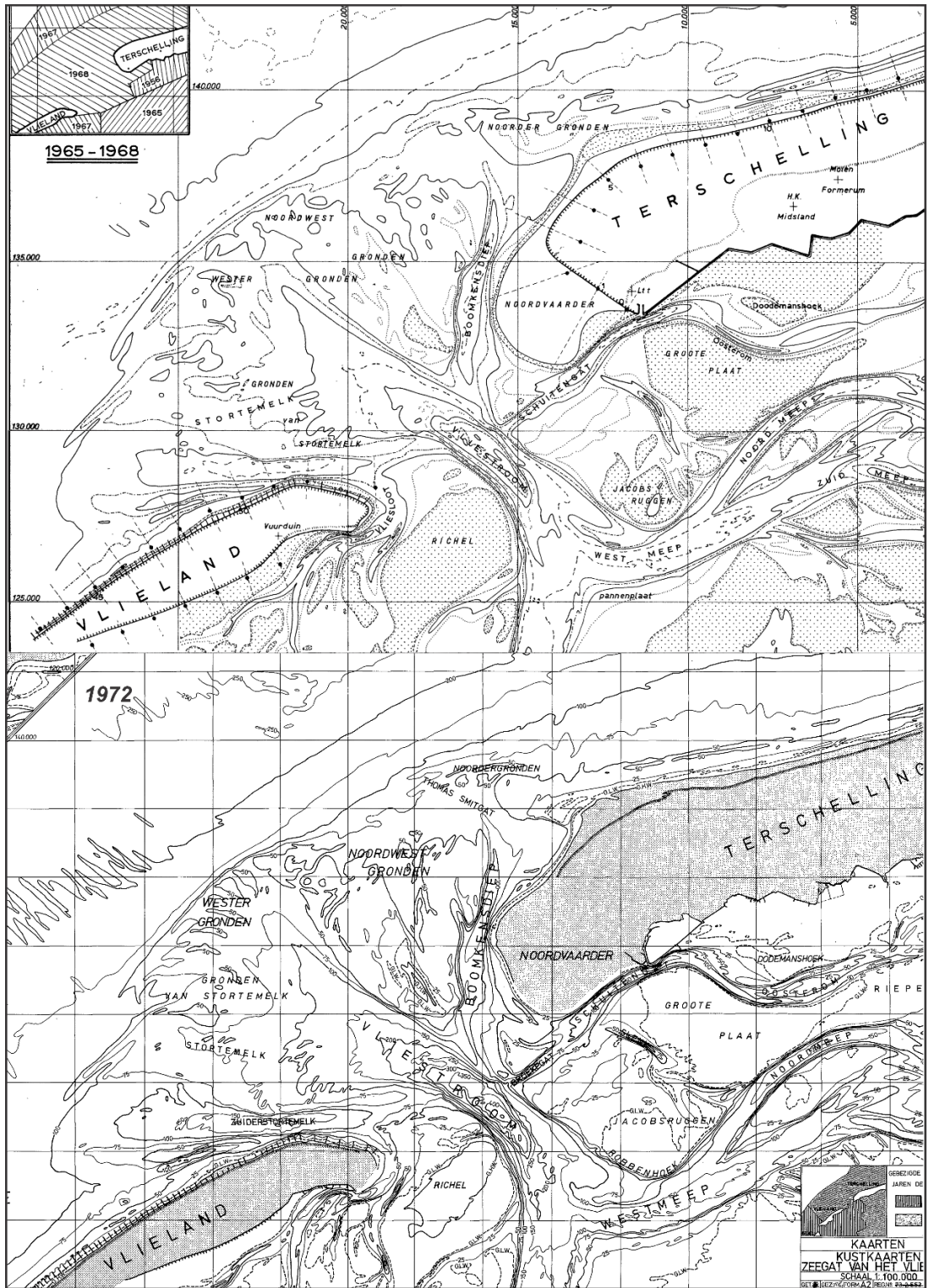
Figuur A- 5: Hydrografische kaart voor de jaren 1912 en 1918.



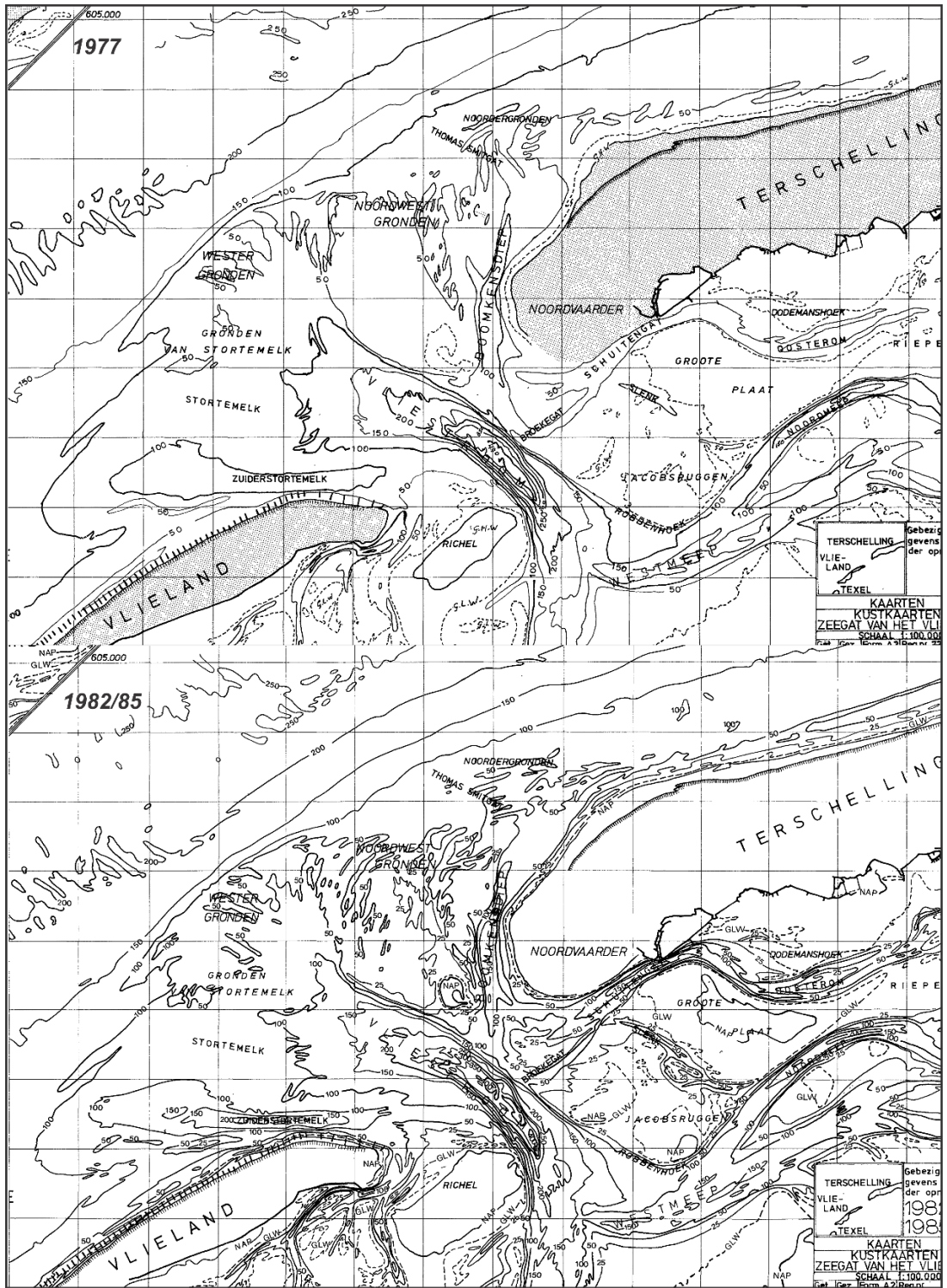
Figuur A- 6: Hydrografische kaart voor de jaren 1926 en 1933.



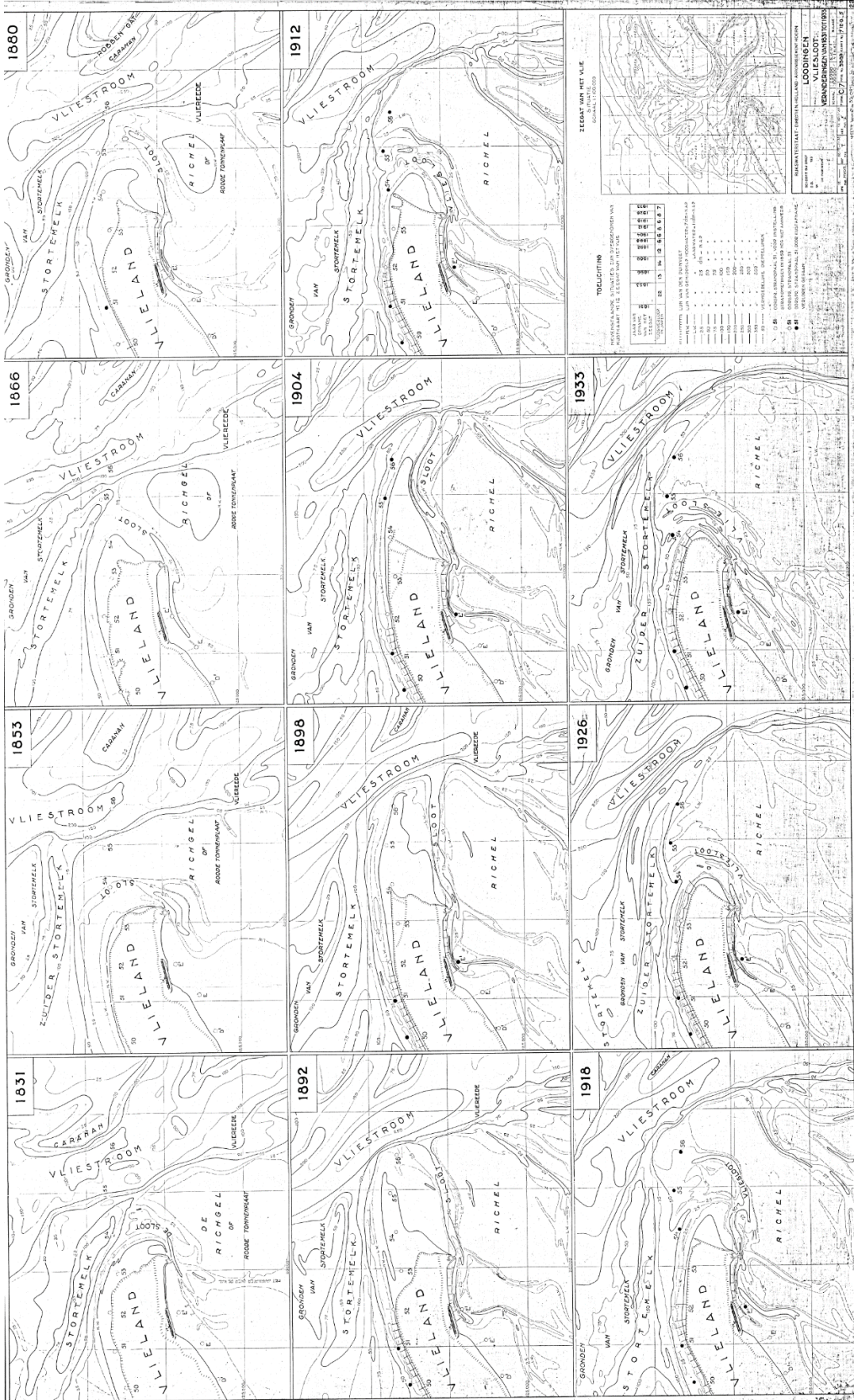
Figuur A- 7: Hydrografische kaart voor de jaren 1950 en 1958.



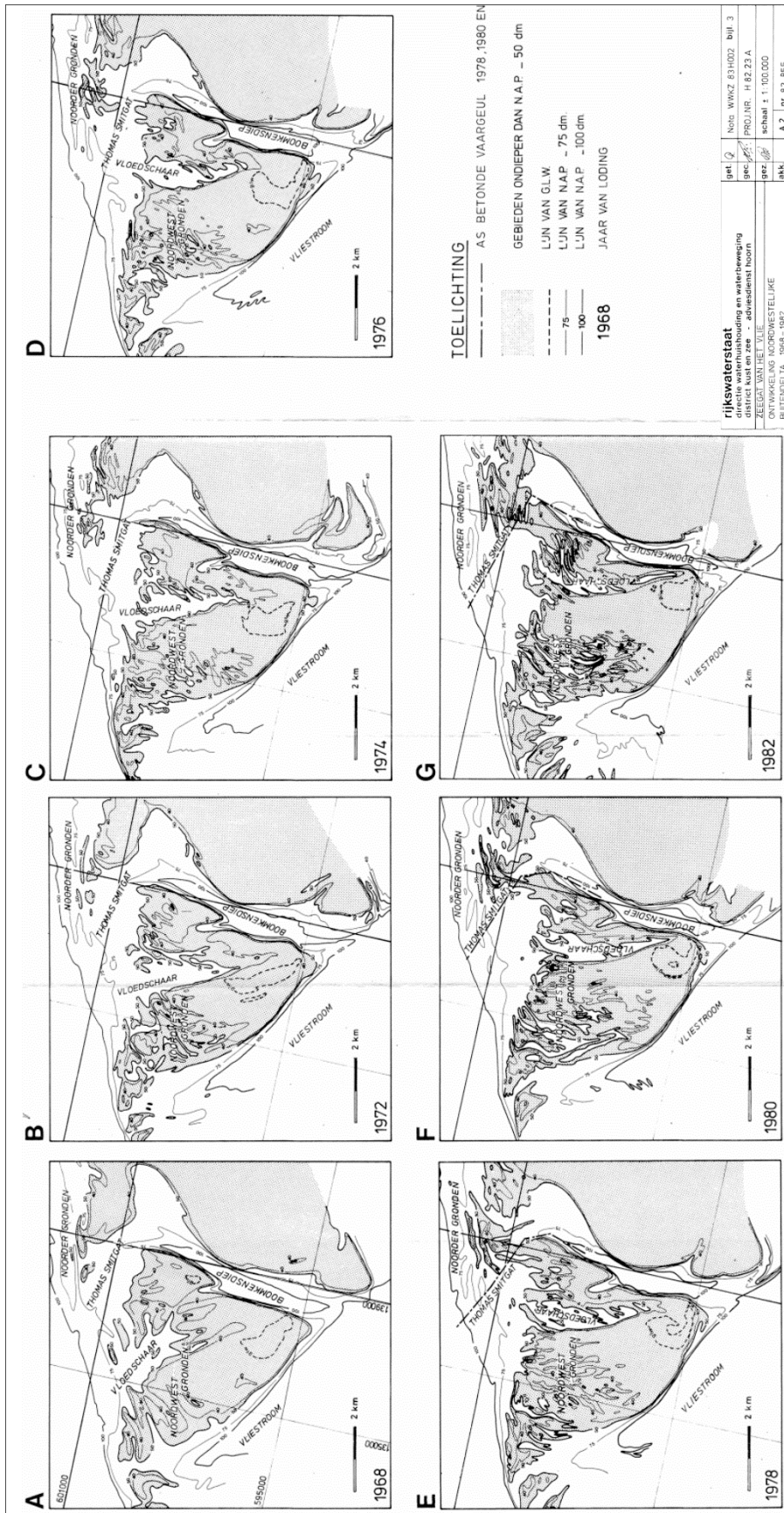
Figuur A- 8: Hydrografische kaart voor de jaren 1965-68 en 1972.



Figuur A- 9: Hydrografische kaart voor de jaren 1977 en 1982/85.

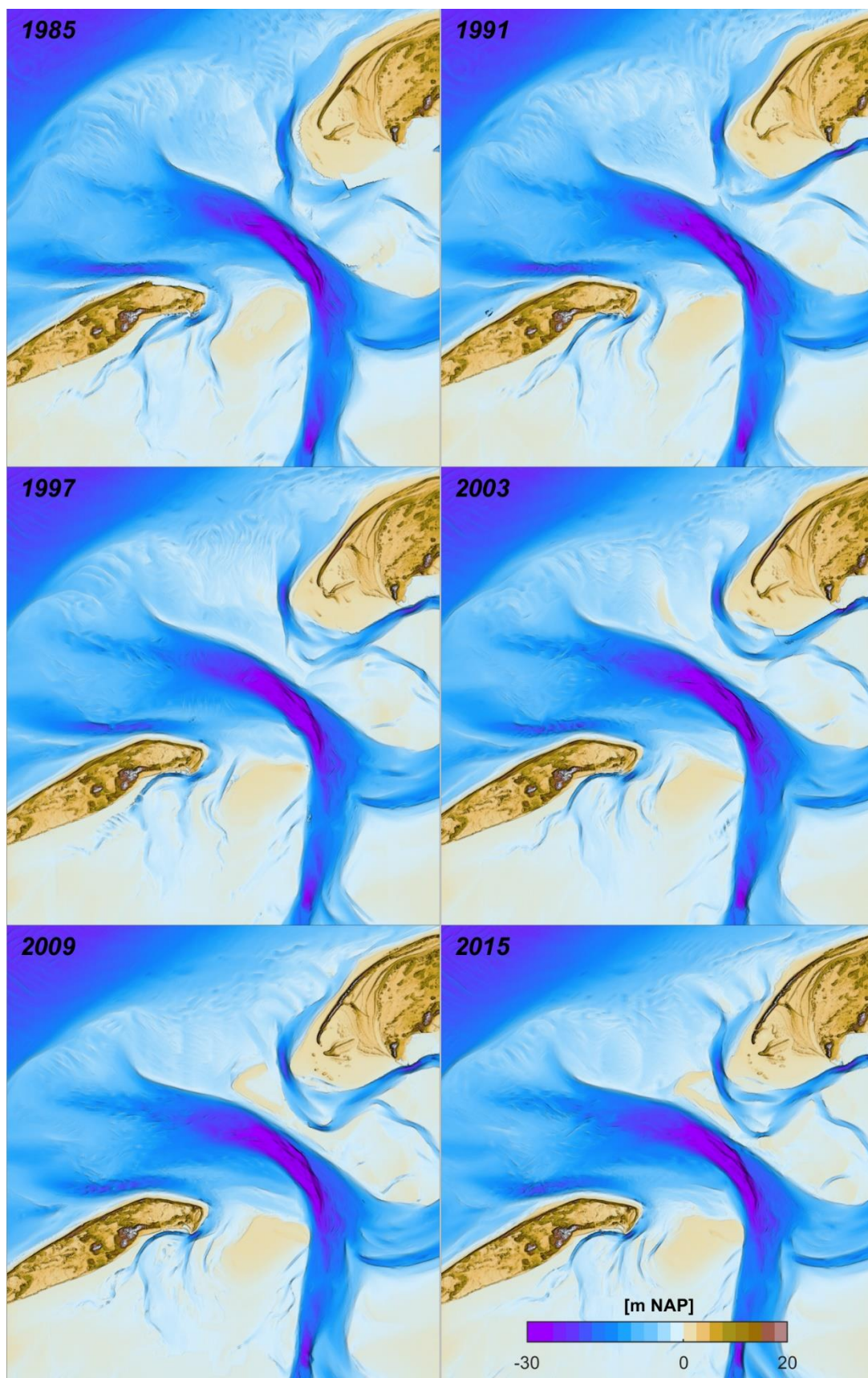


Figuur A- 10: De ontwikkeling van Richel en invloed op Vliestroom over de periode 1831-1933.

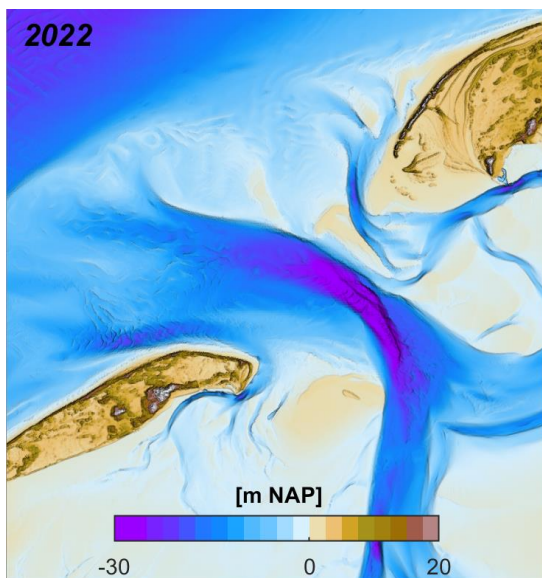


Figuur A- 11: Hydrografische kaart voor de jaren 1968-1978.

A.2 Vaklodgingen

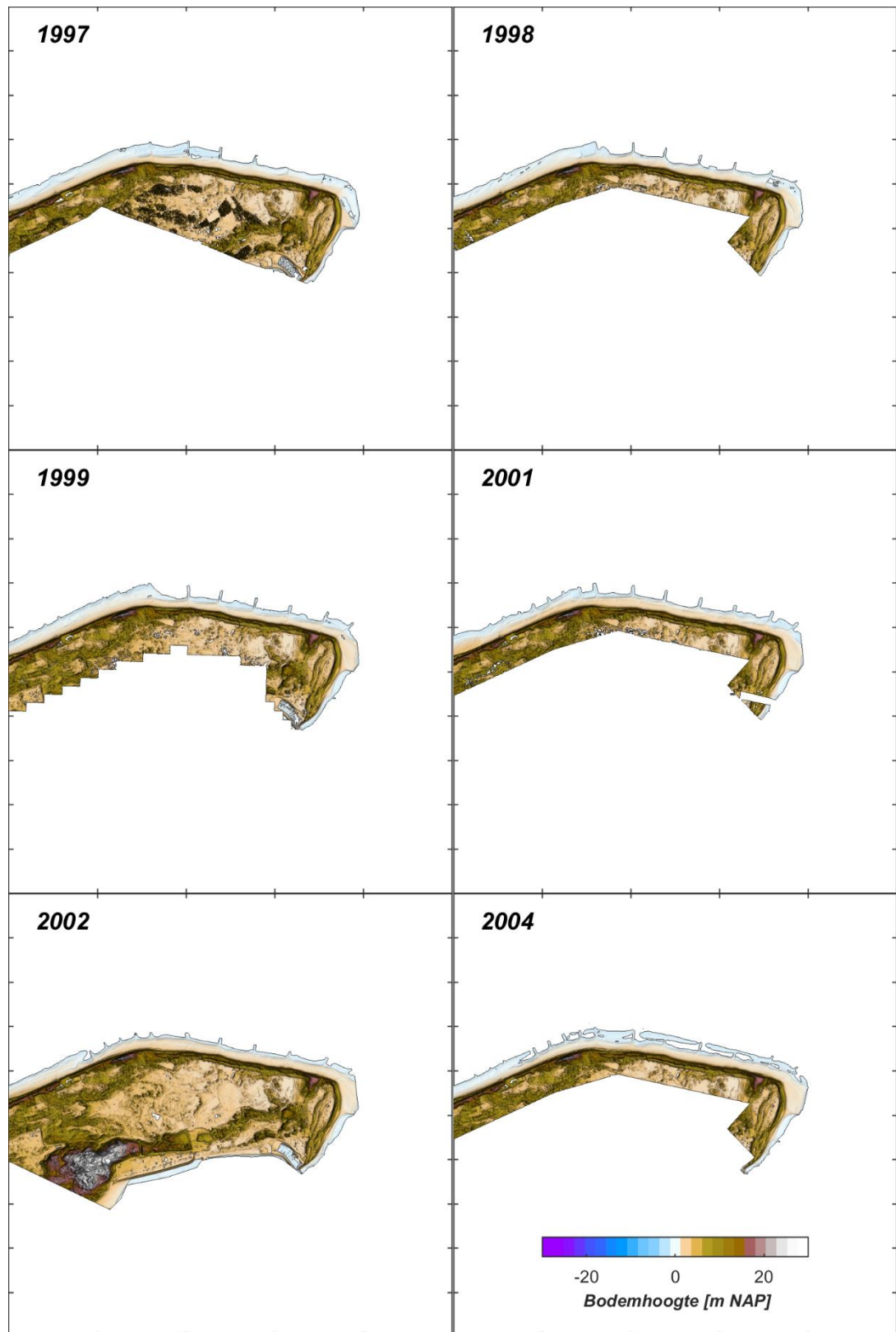


Figuur A- 12: Overzicht van de ontwikkeling van het Zeegat van het Vlie en de eilandkoppen aan de hand van de Vaklodgingen over de periode 1985-2015.

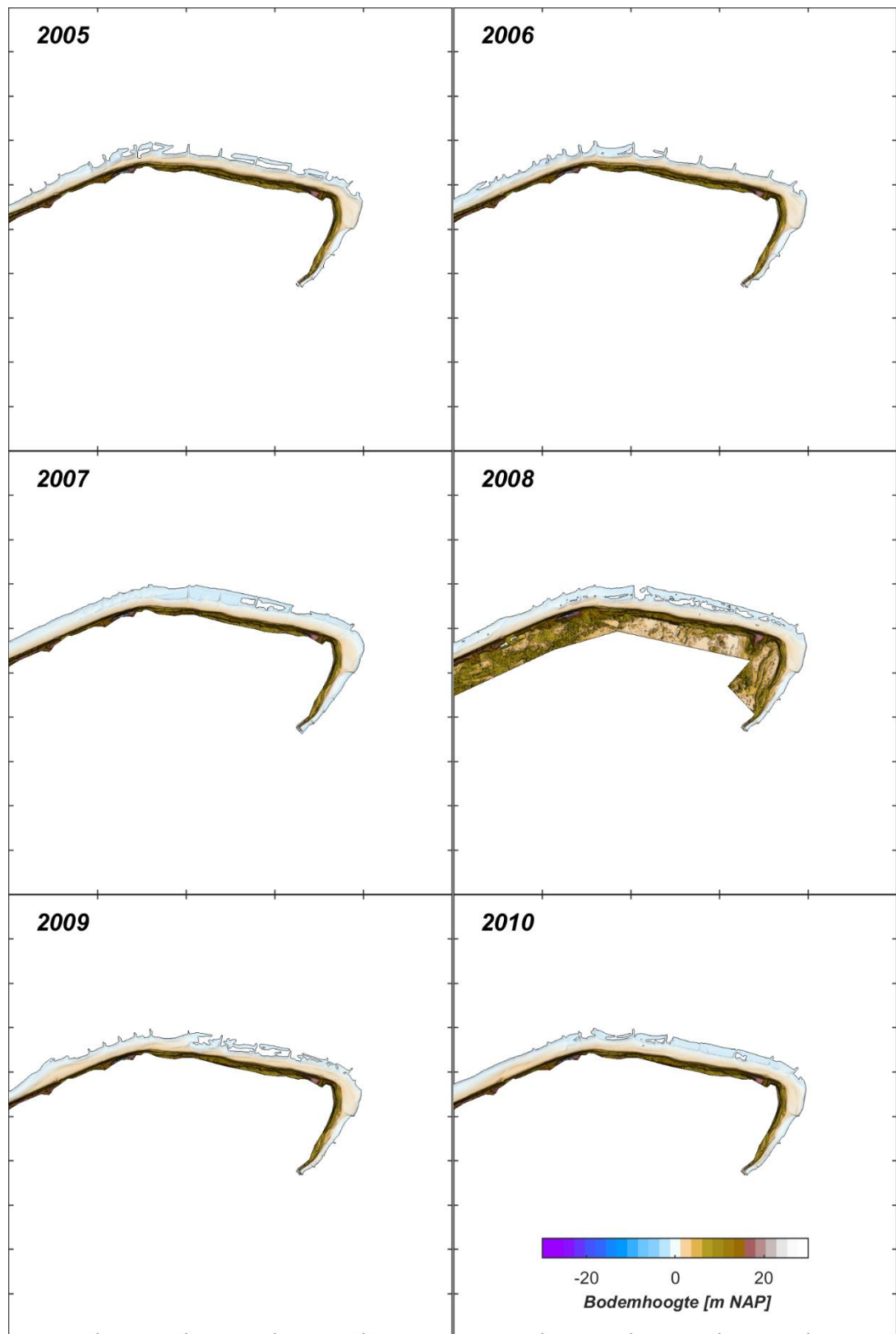


Figuur A- 13: Overzicht van de ontwikkeling van het Zeegat van het Vlie en de eilandkoppen aan de hand van de Vaklodingen 2022.

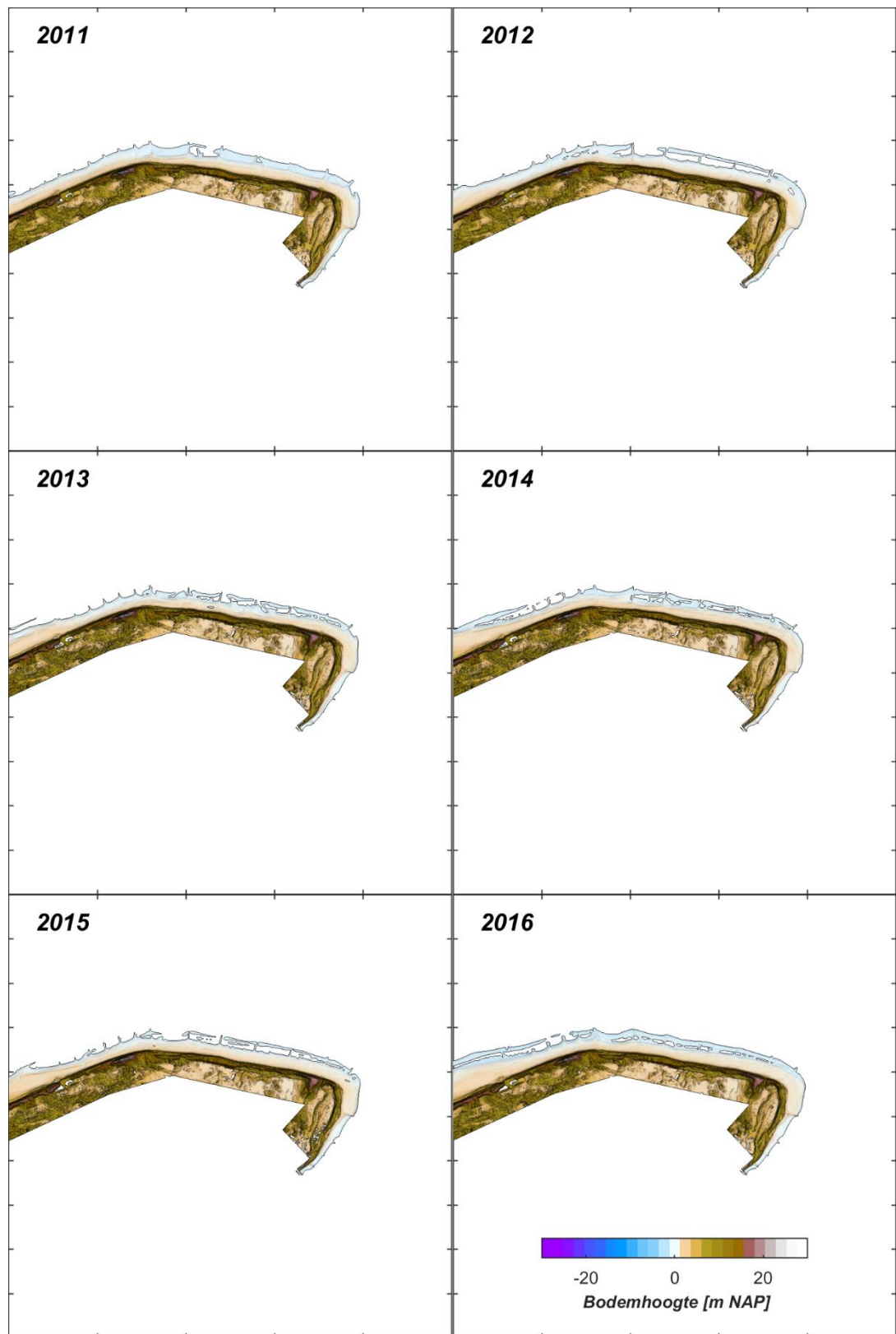
A.3 LiDAR



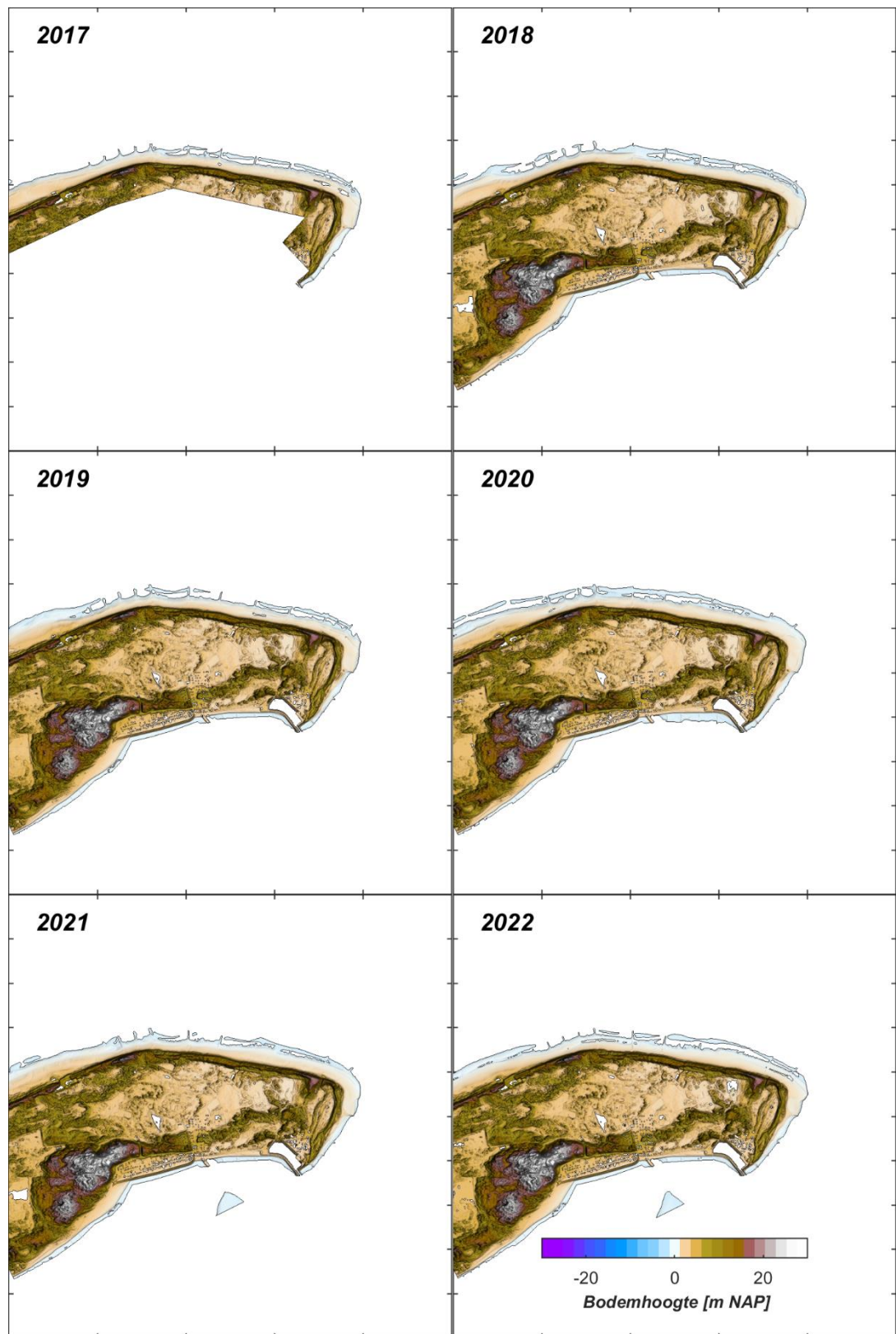
Figuur A- 14: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandstaart van Vlieland aan de hand van de LiDAR metingen over de periode 1997-2004.



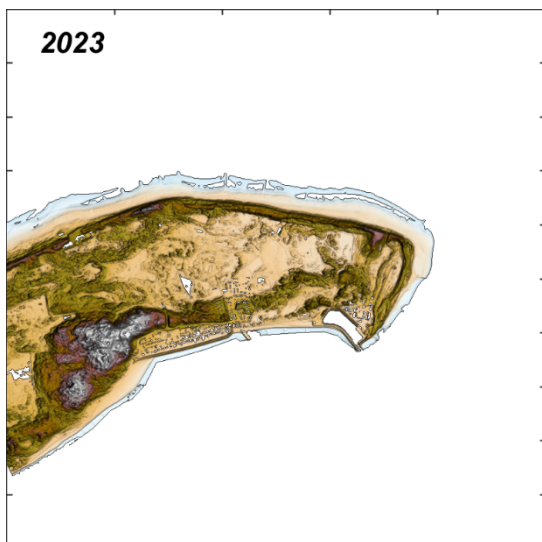
Figuur A- 15: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandstaart van Vlieland aan de hand van de LiDAR metingen over de periode 2005-2010.



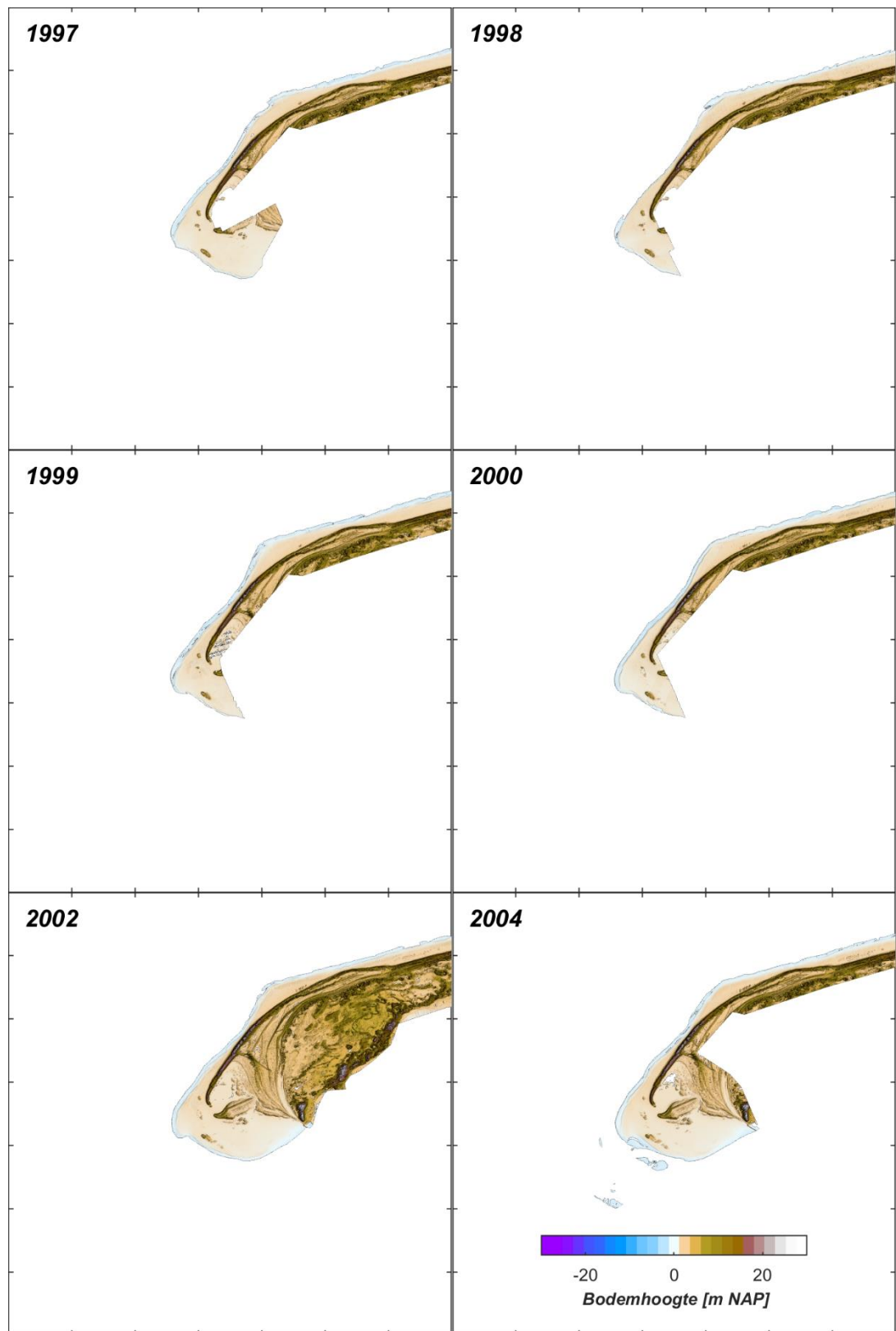
Figuur A- 16: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandstaart van Vlieland aan de hand van de LiDAR metingen over de periode 2011-2016.



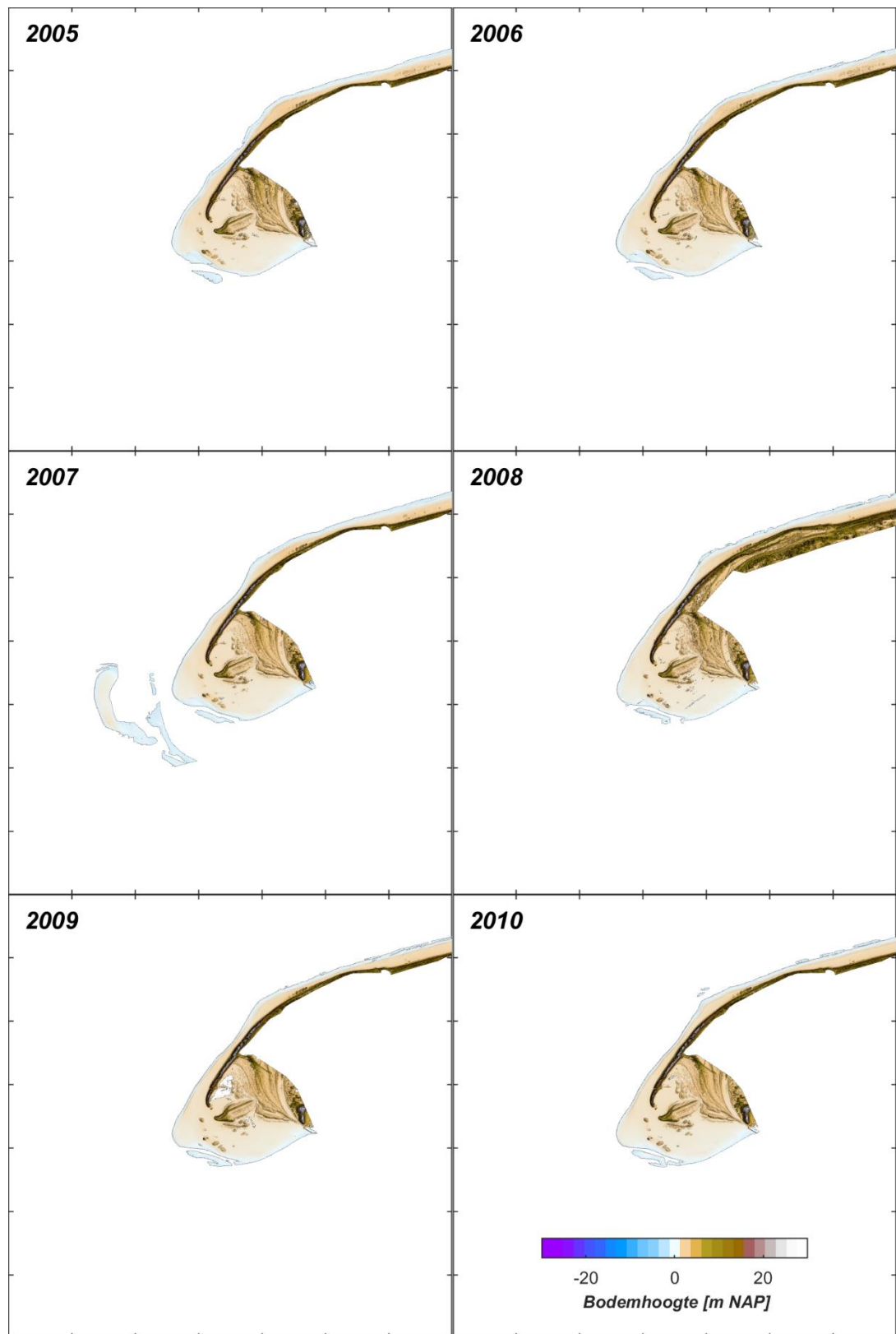
Figuur A- 17: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandstaart van Vlieland aan de hand van de LiDAR metingen over de periode 2017-2022.



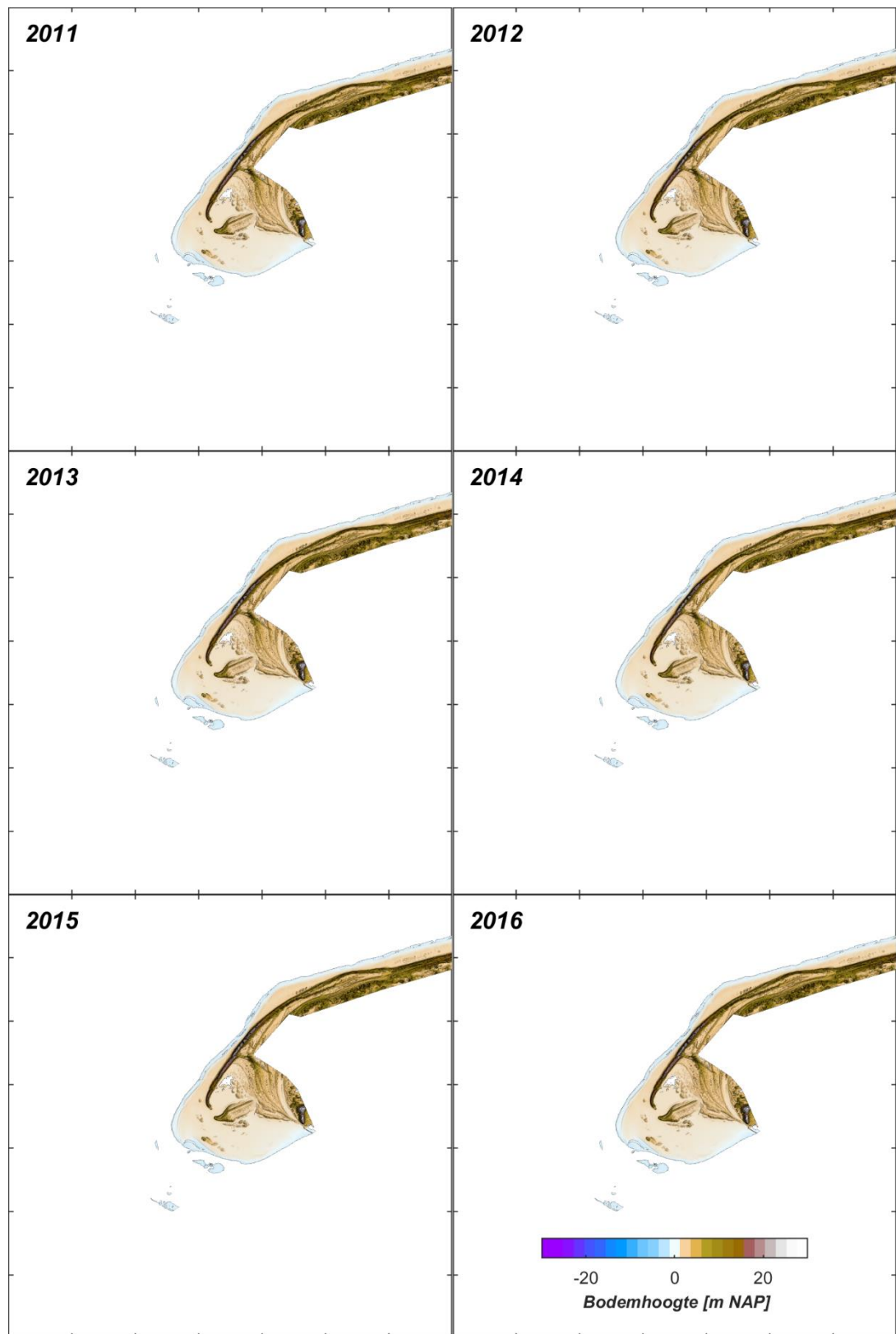
Figuur A- 18: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandstaart van Vlieland aan de hand van de LiDAR metingen 2023.



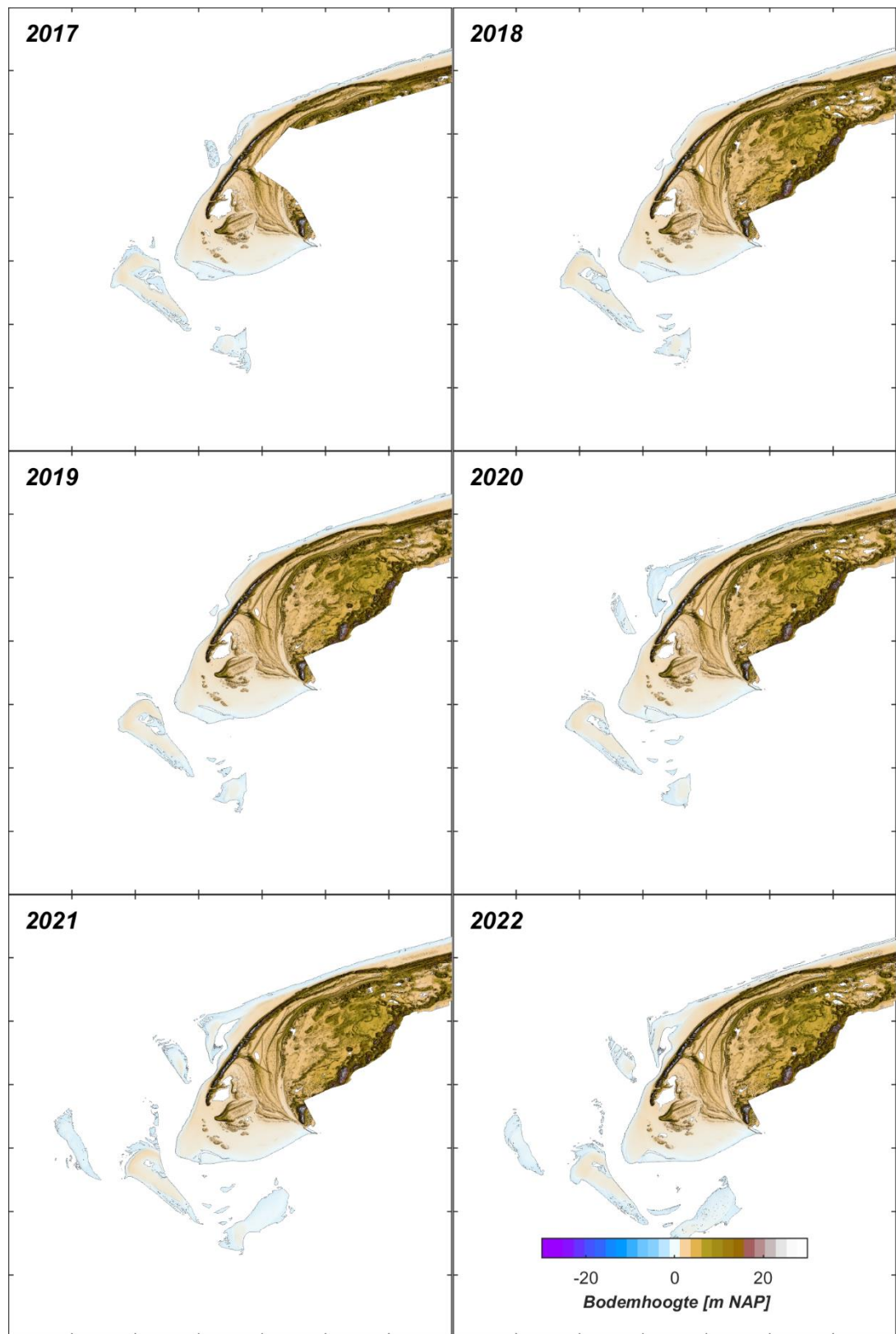
Figuur A- 19: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandkop van Terschelling aan de hand van de LiDAR metingen over de periode 1997-2004.



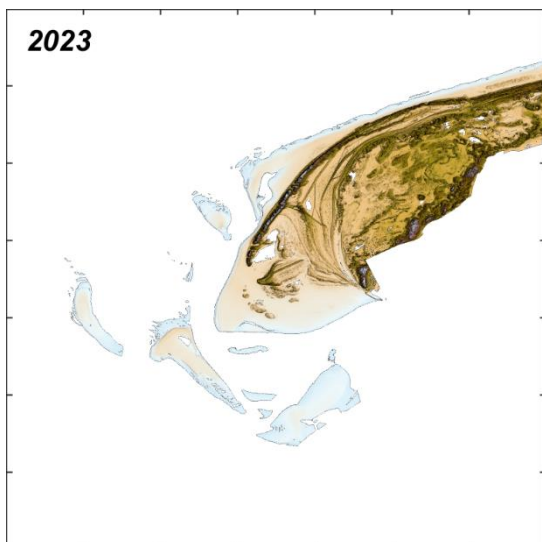
Figuur A- 20: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandkop van Terschelling aan de hand van de LiDAR metingen over de periode 2005-2010.



Figuur A- 21: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandkop van Terschelling aan de hand van de LiDAR metingen over de periode 2011-2016.



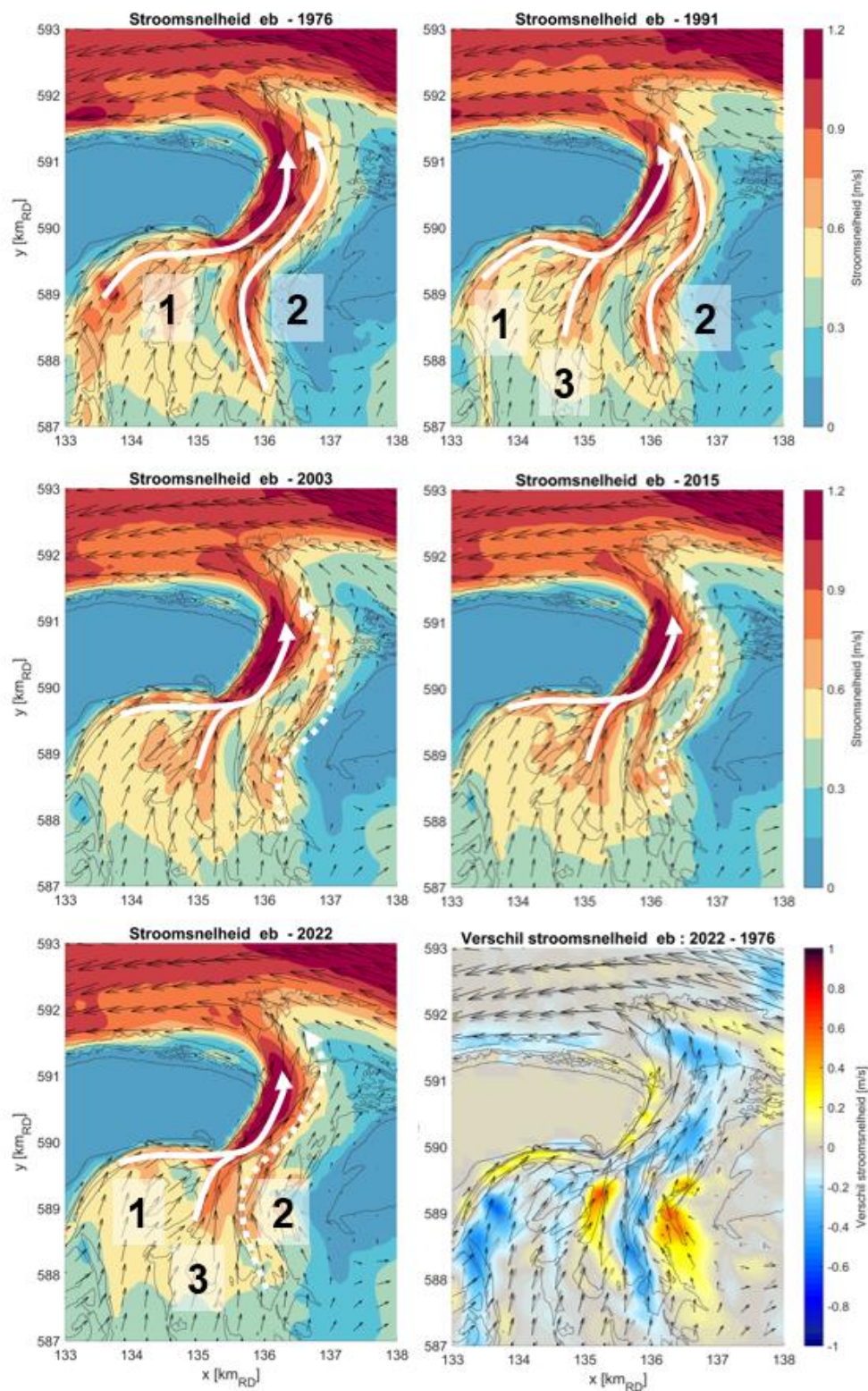
Figuur A- 22: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandkop van Terschelling aan de hand van de LiDAR metingen over de periode 2017-2022.



Figuur A- 23: Overzicht van de ontwikkeling van de eilandkop van Terschelling aan de hand van de LiDAR metingen 2023.

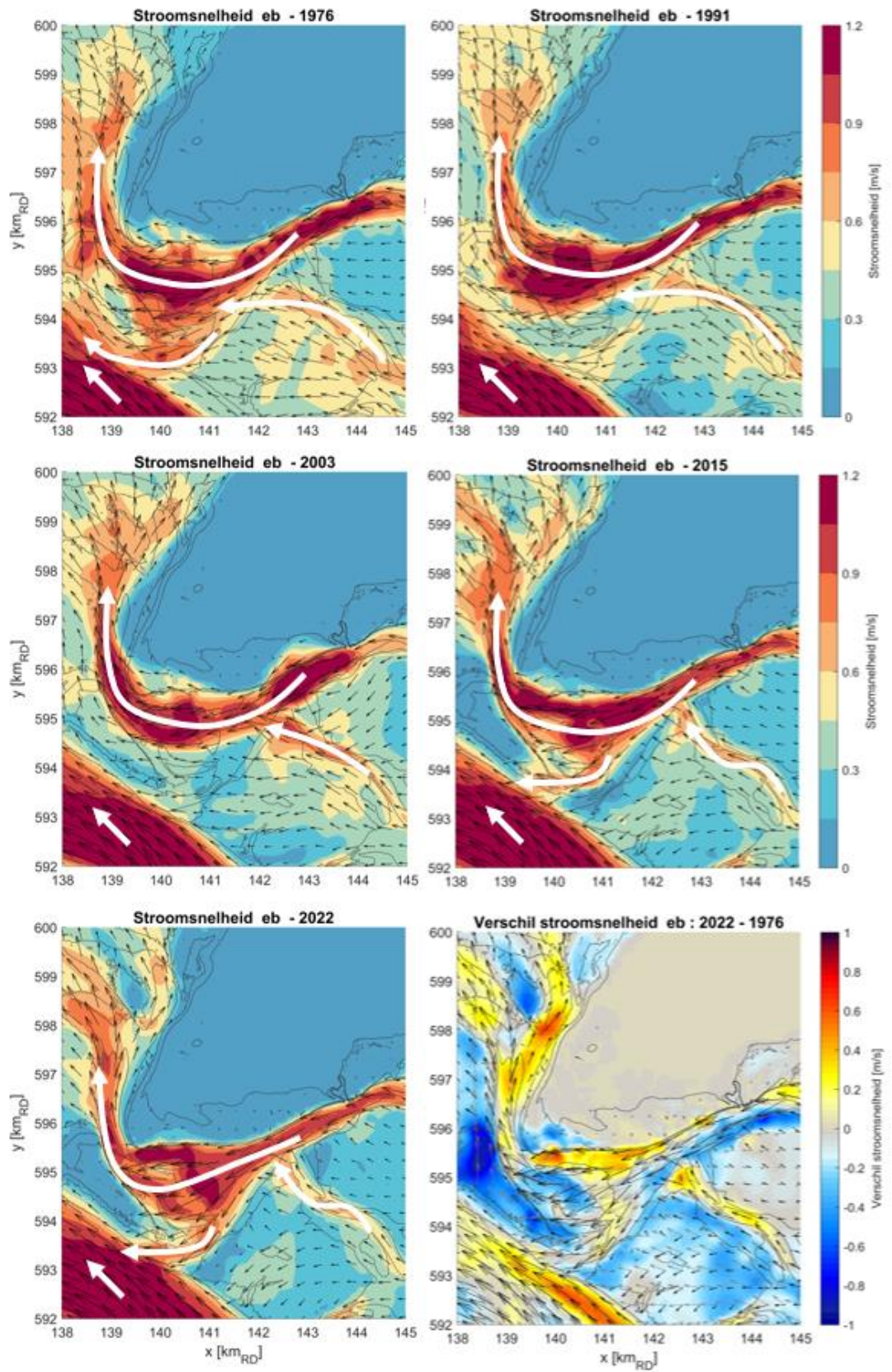
B Resultaten hydrodynamische modellering

B.1 Stromingspatronen tijdens eb rondom Vlieland



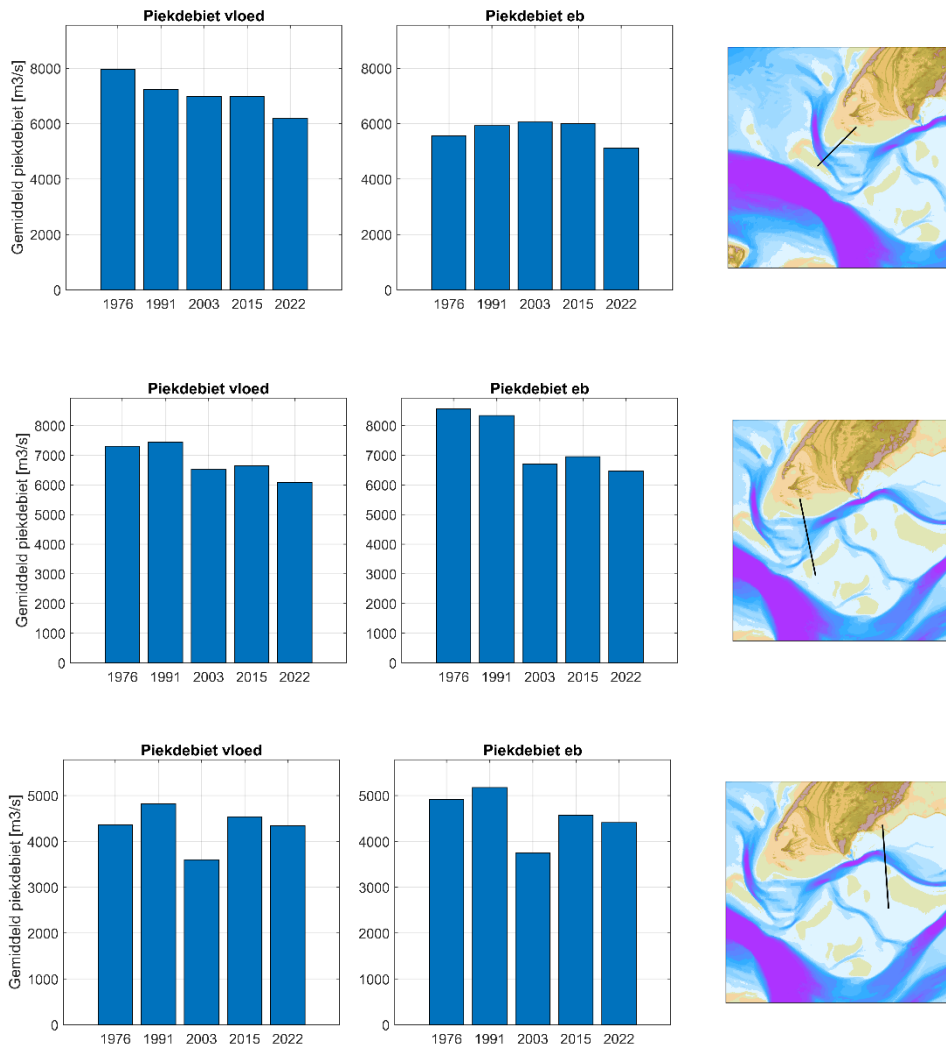
Figuur B- 1. Stromingspatronen rondom eilandkop tijdens eb voor de modelsimulaties van 1976 – 2022.

B.2 Stromingspatronen tijdens eb rondom Terschelling



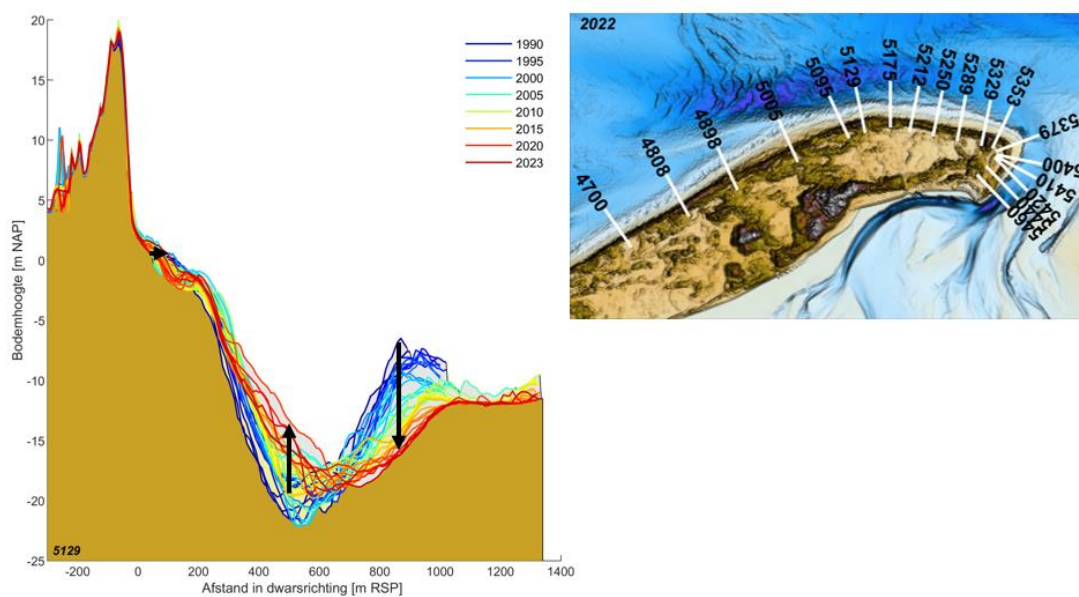
Figuur B- 2. Stromingspatronen rondom eilandkop tijdens vloed voor de modelsimulaties van 1976 – 2022.

B.3 Verandering piekdebieten Terschelling

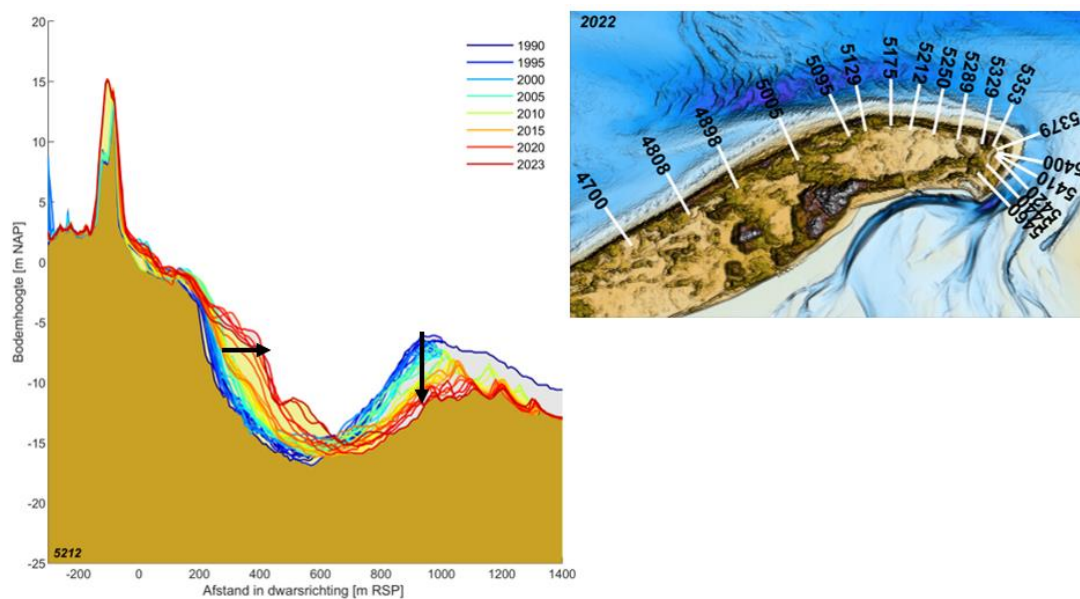


Figuur B- 3. Verandering van het piekdebiet tijdens vloed en eb door Boomkensdiep en Schuitengat.

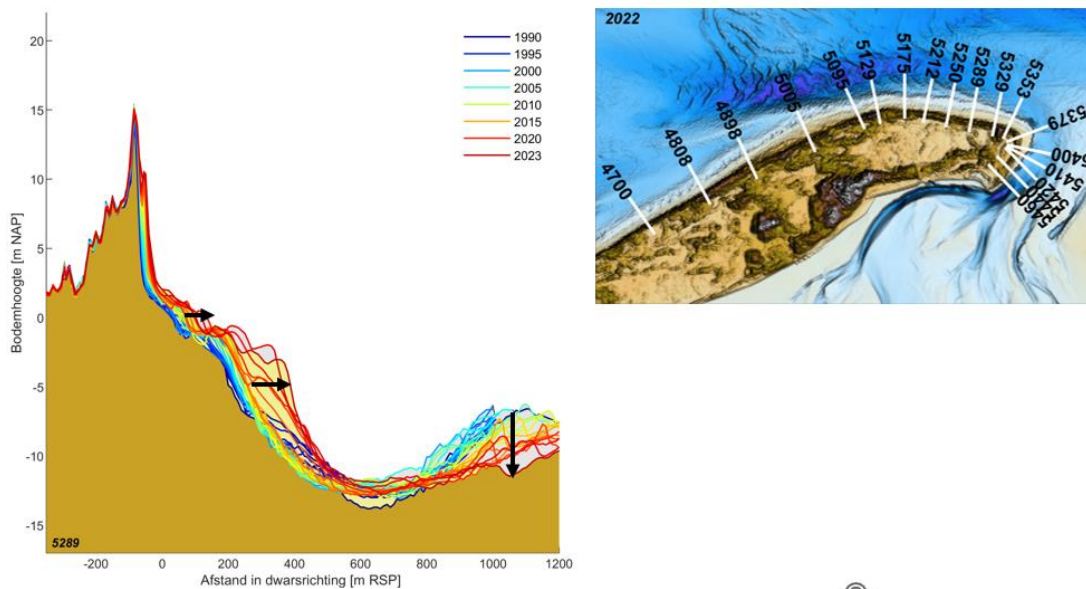
C Jarkus profielen Vlieland



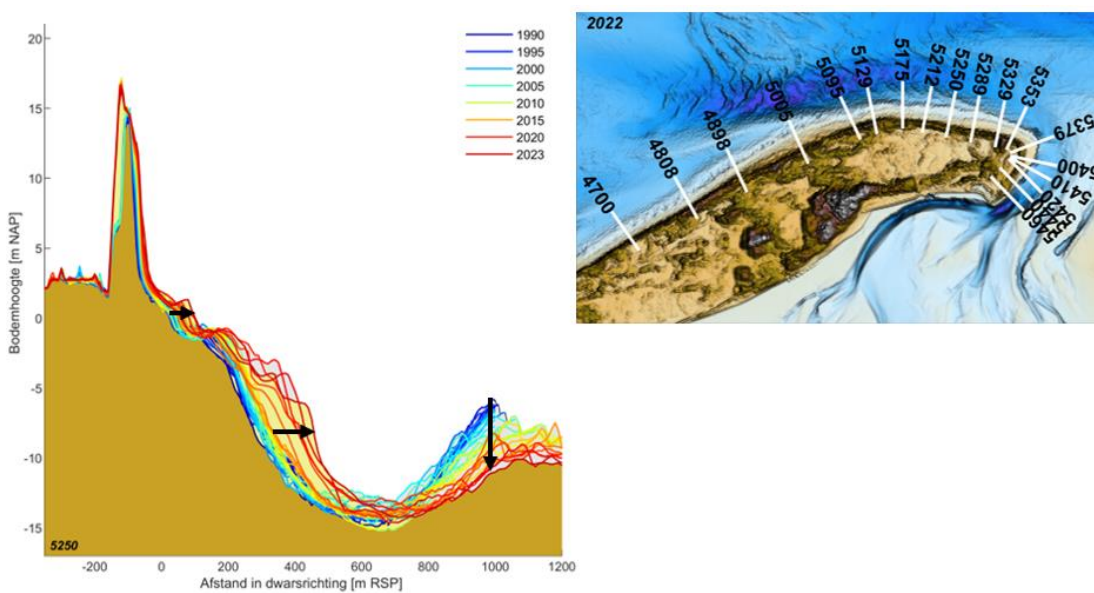
Figuur C- 1. Overzicht van de ontwikkeling van raai 5129, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.



Figuur C- 2. Overzicht van de ontwikkeling van raai 5212, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.

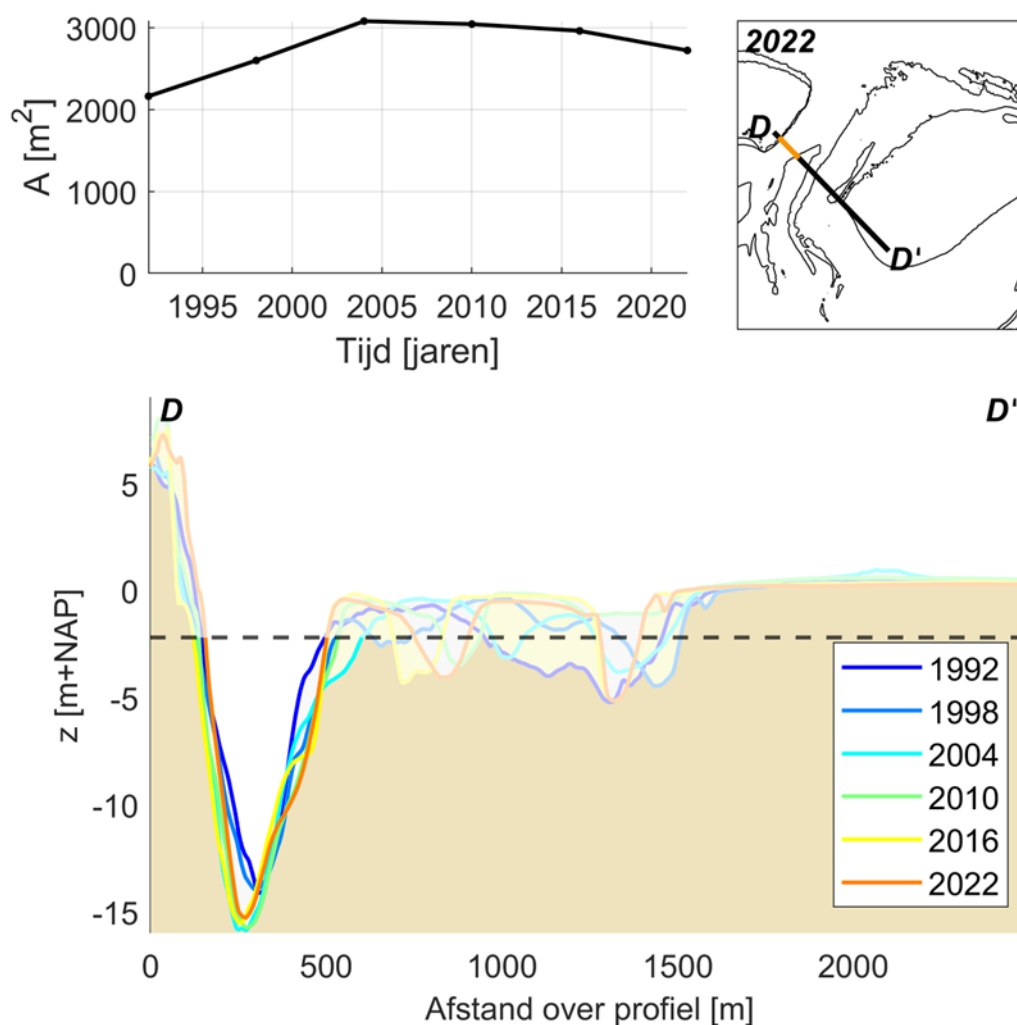


Figuur C- 3. Overzicht van de ontwikkeling van raai 5289, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.

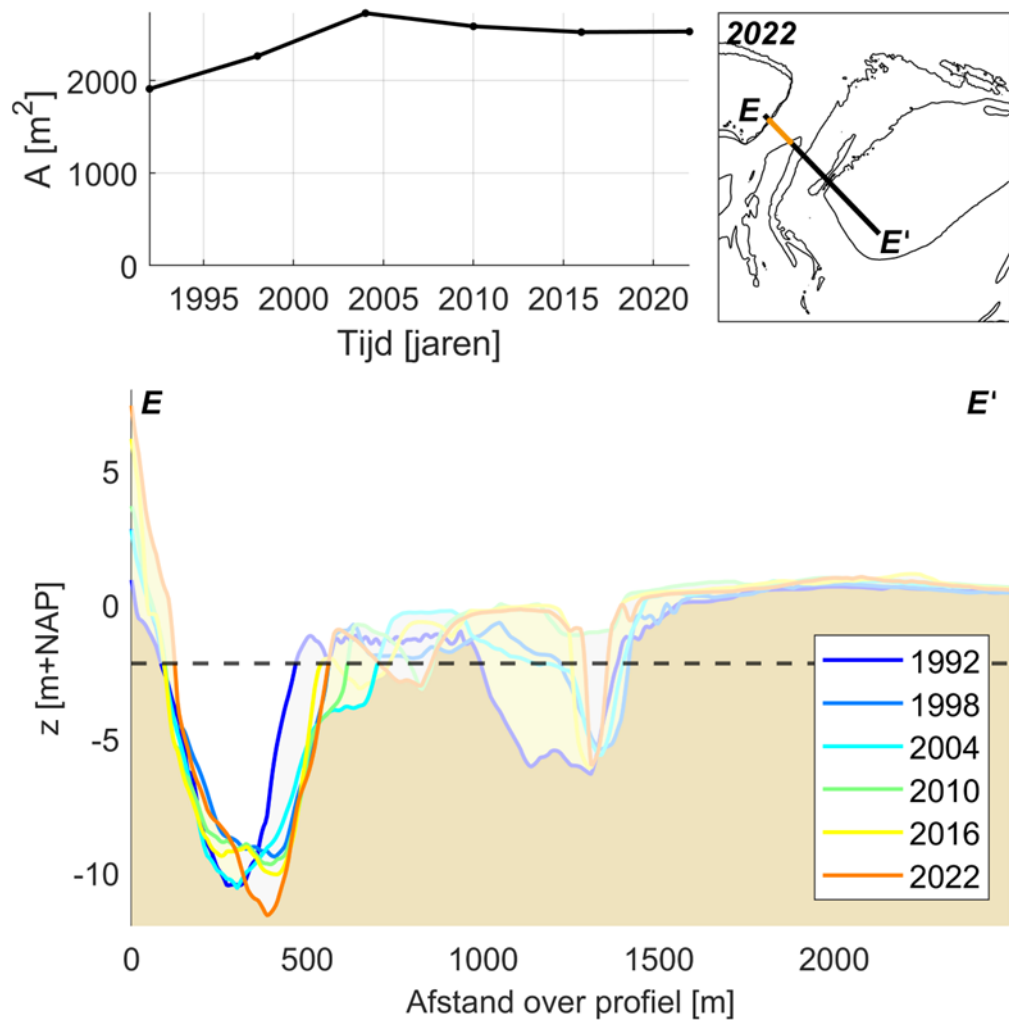


Figuur C- 4. Overzicht van de ontwikkeling van raai 5250, op basis van Jarkus-data voor 1990-2023. Het bruine vlak geeft de minimale bodemligging sinds 1990 weer, het grijze vlak de maximale bodemligging sinds 1990, en de gele vlakke de meest recente 2023 bodemligging.

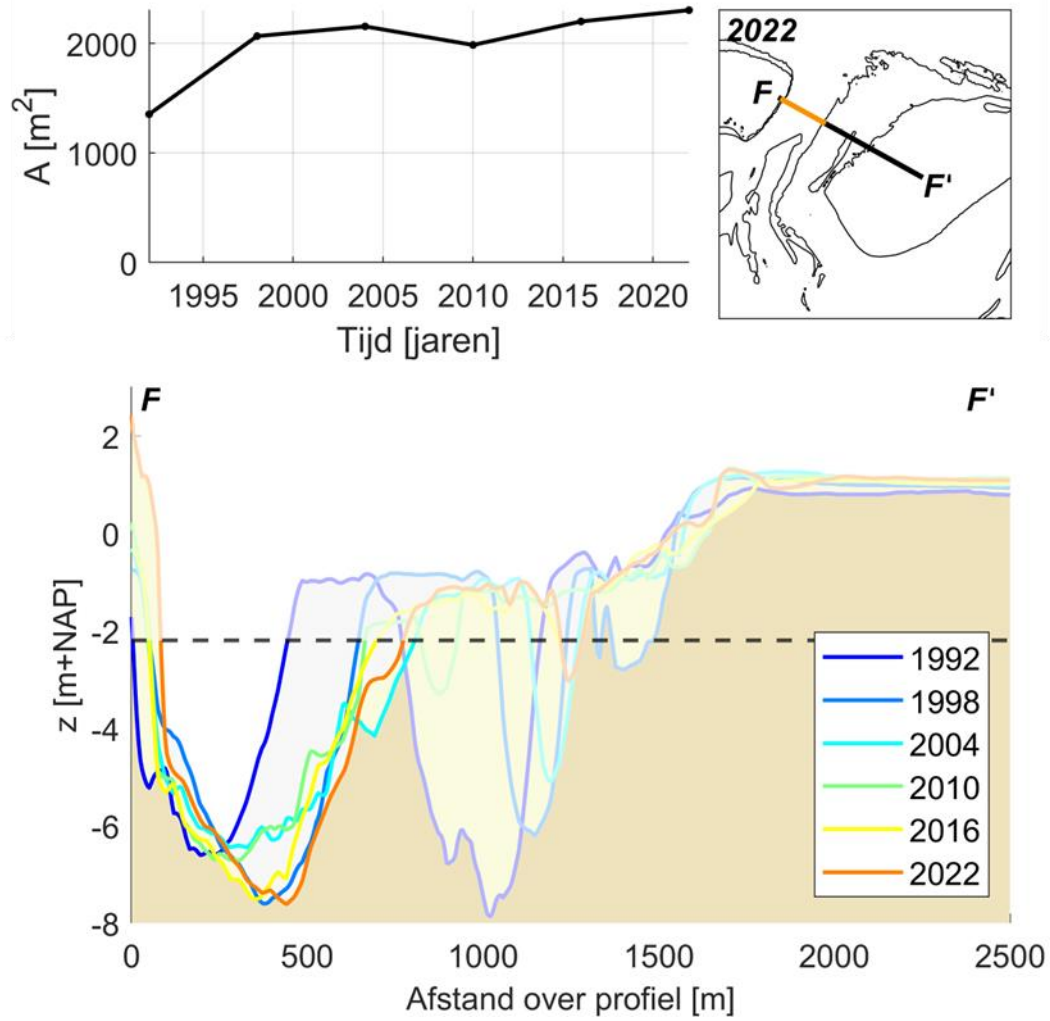
D Doorstroomoppervlakte Vliesloot



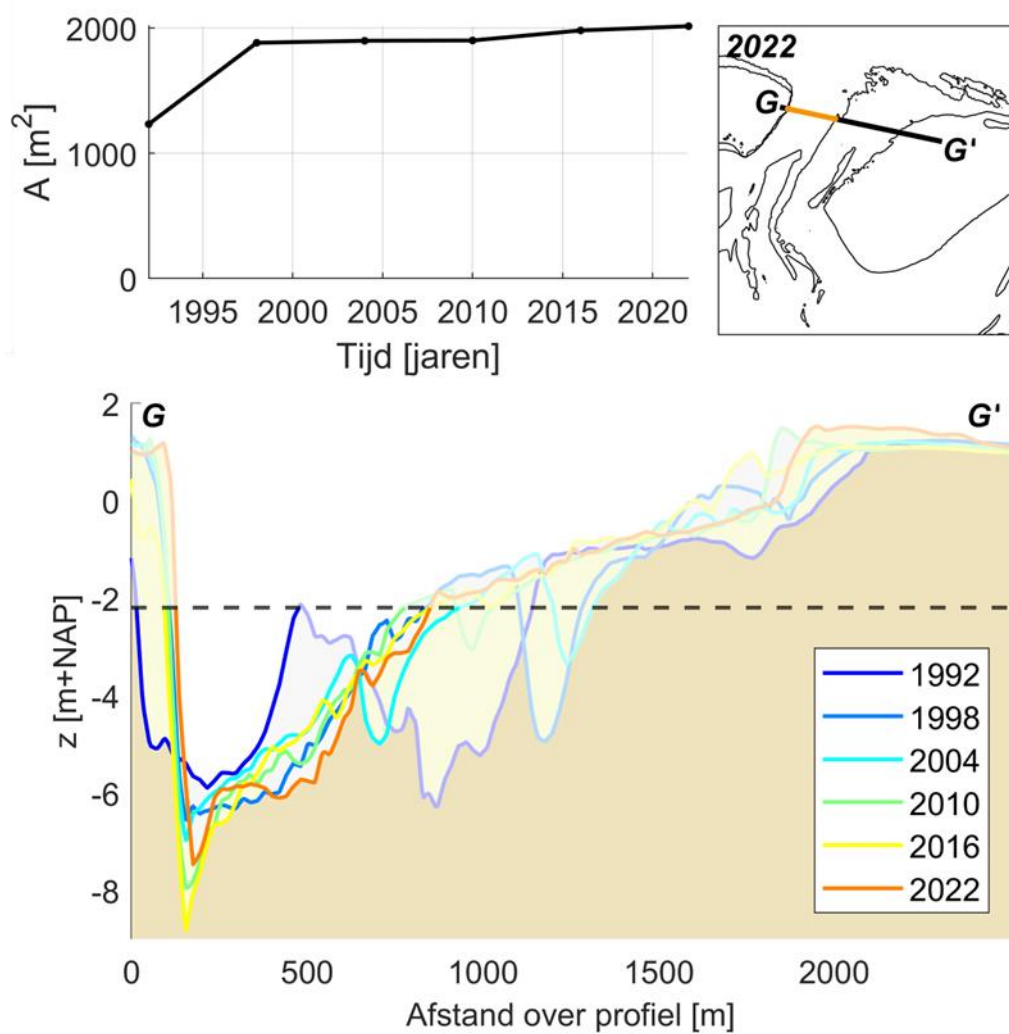
Figuur D- 1. Ontwikkeling van het doorstroomoppervlakte (onder de -2.2 m) door de Vliesloot.



Figuur D- 2. Ontwikkeling van het doorstroomoppervlakte (onder de -2.2 m) door de Vliesloot.

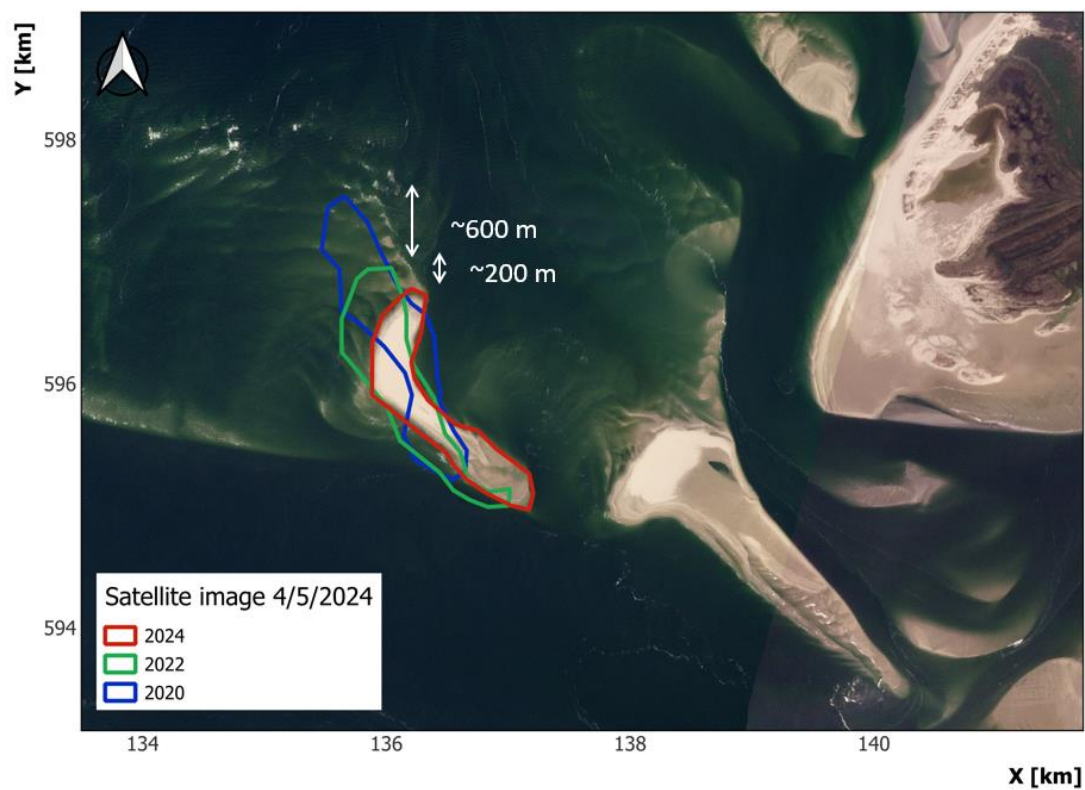


Figuur D- 3. Ontwikkeling van het doorstroomoppervlakte (onder de -2.2 m) door de Vliesloot.



Figuur D- 4. Ontwikkeling van het doorstroomoppervlakte (onder de -2.2 m) door de Vliesloot.

E Engelschhoek



Figuur E- 1. Ligging van de nieuwe bank tussen 2020 en 2024 op basis van satellietbeelden tijdens laagwater.

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

Deltares

www.deltares.nl