

Morfologische ontwikkeling Vlieland Noordoost



Morfologische ontwikkeling Vlieland Noordoost

Auteur(s)
Edwin Elias

Morfologische ontwikkeling Vlieland Noordoost

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Stefan Plus
Referenties	
Trefwoorden	Waddenzee, Vlieland, suppleties, stranderosie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	31-12-2021
Projectnummer	11206794-004
Document ID	11206794-001-ZKS-0002
Pagina's	59
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Edwin Elias	Ellen Quatart	Toon Segeren	

Samenvatting

Aan de noordoostzijde van Vlieland bevindt zich al langere tijd een probleemgebied met betrekking tot de handhaving van de kustlijn. Tussen raaien 4700 en 5095 worden al sinds 1997 frequent suppleties uitgevoerd. Deze suppleties zijn echter niet toereikend om de overschrijding van de basiskustlijn te voorkomen. In dit rapport worden de morfologische ontwikkelingen van dit probleemgebied in detail onderzocht met als doel om de maatgevende processen en de invloed van de uitgevoerde suppleties op deze processen in kaart te brengen. Ook wordt vooruitgekeken naar de verwachtingen voor toekomstige kustlijnontwikkeling en een aanbeveling voor een mogelijke systeemsuppletie gegeven. Het doel van de systeemsuppletie is om de kustlijn duurzamer, met meer gebruik van de natuurlijke processen, te handhaven.

Een uitgebreide analyse van de Jarkus, LiDAR en Vaklodingen data laat zien dat de erosie gerelateerd is aan het vloedgeultjes die in de vooroever voorkomen. Het dichtzetten van het vloedgeultje in 2009 middels een vooroeversuppletie heeft niet geleid tot een oplossing voor de terugtrekking van de kustlijn. Een nieuw kustlangs (vloed)geultje is gevormd en dit geultje is verantwoordelijk voor de erosie van de kustlijn. Het is niet de verwachting dat de huidige processen op korte termijn (5 jaar) zullen veranderen.

Het aanbrengen van klassieke strandsuppleties in het kustlangse geultje, zoals uitgevoerd in 2013 en 2018, lijkt niet de juiste suppletiestrategie te zijn om de kustlijn in dit gebied te handhaven. Het gesuppleerde zandvolume wordt snel kustlangs afgevoerd en blijft niet behouden in de kustzone tussen raaien 4700 en 5095. Mogelijk zou een systeemsuppletie gericht op het verminderen van de kustlangse (vloed)stroming hier een oplossing vormen. De in dit rapport voorgestelde suppletie bestaat uit een strandsuppletie van 2 miljoen m³ en een systeemsuppletie van 3 miljoen m³. De strandsuppletie zorgt ervoor dat de kustlijn zich weer zeewaarts verplaatst en er voldoende zandvolume aanwezig is. De systeemsuppletie vult de geul tussen de strandsuppletie en het voorliggende bankje in tot een hoogte van -2m NAP. Het doel van de systeemsuppletie is de erosie van de strandsuppletie te reduceren, waardoor de levensduur verlengd wordt en de kustlijn voor een langere periode gehandhaafd wordt.

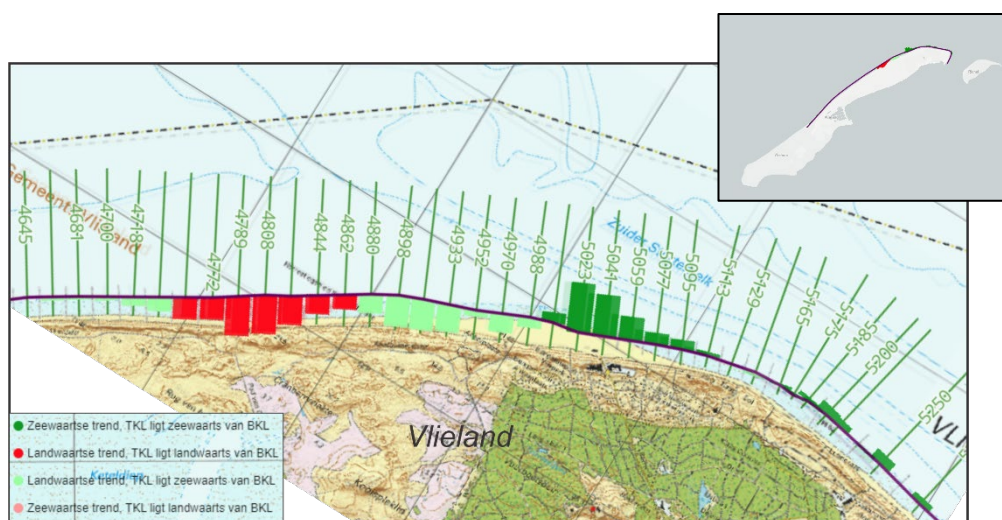
Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	6
1.1	Probleem- en vraagstelling	6
1.2	Aanpak	6
1.3	Leeswijzer	7
2	Een overzicht van geulen, platen en kustverdediging	8
2.1	Geulen en platen	8
2.2	Kustverdediging	9
2.2.1	Strandhoofden	9
2.2.2	Suppleties	10
3	Grootschalige morfologische veranderingen van Vliestroom en Zuiderstortemelk	11
3.1	Buitendelta	11
3.2	Kustlijn van Vlieland	14
3.3	Lange-termijn ontwikkeling van duinvoet, gemiddelde hoog- en laagwaterlijn	15
4	Gedetailleerde analyse van de kustlijn en suppleties (raaien 4700-5095)	17
4.1	Overzicht van de huidige bodemligging	17
4.2	Ontwikkeling van geulen en kust sinds 1965	19
4.3	Detailanalyses van geselecteerde raaien	22
4.3.1	Centrale eilandkust (raai 4500 en 4609)	22
4.3.2	Overgangsgebied tussen eilandkust en Zuiderstortemelk (raai 4700)	25
4.3.3	Ontwikkeling onder invloed van het vloedgeultje (raai 4808 en 4898)	27
4.3.4	Ontwikkeling van het Zuiderstortemelk (raai 5005 - 5095)	30
4.4	Duin en droge strandontwikkeling in detail	33
5	Synthese	35
6	Beantwoording onderzoeksvragen en vooruitzichten	37
	Literatuur	39
A	Jarkus data	40
A.1	Jarkus grids	40
A.2	Dwarsprofielen	49
B	LiDAR data	51
C	Uitwerking systemsuppletie	56

1 Introductie

1.1 Probleem- en vraagstelling

Aan de noordoostzijde van Vlieland bevindt zich al langere tijd een probleemgebied met betrekking tot de handhaving van de kustlijn. Terugkijkend in de kustlijnkaartenboeken komt een duidelijk beeld van een stabiele centrale eilandkust en een gebied met structurele erosie aan de noordoostzijde van het eiland en aan de oostelijke eilandkop (Appendix A, tabel A-1). Ook het 2021 Kustlijnkaartenboek (Rijkswaterstaat, 2020) geeft een overeenkomstig beeld. Hierin wordt vermeld dat tussen raaien 4000 en 4627 trajecten met licht zeewaarts en licht landwaarts gerichte trend elkaar afwisselen. Een landwaartse trend in kustlijnpositie is te zien in tussen raaien 4627 en 4988. De Basiskustlijn (BKL) wordt overschreden tussen raaien 4753 en 4862 (Figuur 1-1). Frequent terugkerende suppleties, waaronder de recentelijke strandsuppleties in o.a. 2013 en 2018, zijn nodig om de kustlijn te handhaven. De suppletie van 2013 was niet toereikend om op alle raaien de BKL overschrijding te compenseren. Ook de 2018 suppletie heeft dit niet bewerkstelligd.



Figuur 1-1: TKL trends van de noordoostzijde van Vlieland op basis van de Coastviewer 2021.

Middels dit onderzoek worden de morfologische ontwikkelingen tussen raai 4700 en 5095 in detail onderzocht met als doel de beantwoording van onderstaande onderzoeksvragen:

1. Wat zijn de maatgevende processen die in dit kustvak spelen?
2. Hebben de eerder uitgevoerde suppleties een invloed op dit gedrag?
3. Wat is de verwachting voor de kustlijnontwikkeling en welke morfologische ontwikkelingen van de buitendelta zijn te verwachten die de toekomstige kustlijnontwikkeling mogelijk beïnvloeden?
4. Welke suppleties zijn er mogelijk om de kustlijn te handhaven?

1.2 Aanpak

De beantwoording van de onderzoeksvragen is gebaseerd op een uitgebreide analyse van de beschikbare meetdata. Naast de Vaklodingen zijn hiervoor ook de Jarkus en LiDAR metingen gebruikt. Dit onderzoek is een verdiepingsslag binnen het grootschalige onderzoek naar de werking van het Zeegat van het Vlie. De grootschalige ontwikkeling en werking van het zeegat wordt dan ook aan het overkoepelende onderzoek ontleend (Elias, 2021).

In deze rapportage ligt de focus op een uitgebreide analyse van de Jarkus metingen. De Jarkus data worden sinds 1965 jaarlijks ingewonnen. Ze vormen de basis voor de berekening van de volumeverandering van de kustzone en kustindicatoren zoals GLW (Gemiddeld LaagWaterlijn), GHW (Gemiddeld HoogWaterlijn), DV (Duinvoet) en MKL (Momentane KustLijn). De analyse van de Jarkus grids en profielen geeft een gedetailleerd beeld van de ontwikkeling van de kustzone en de veranderingen die hierin zijn opgetreden.

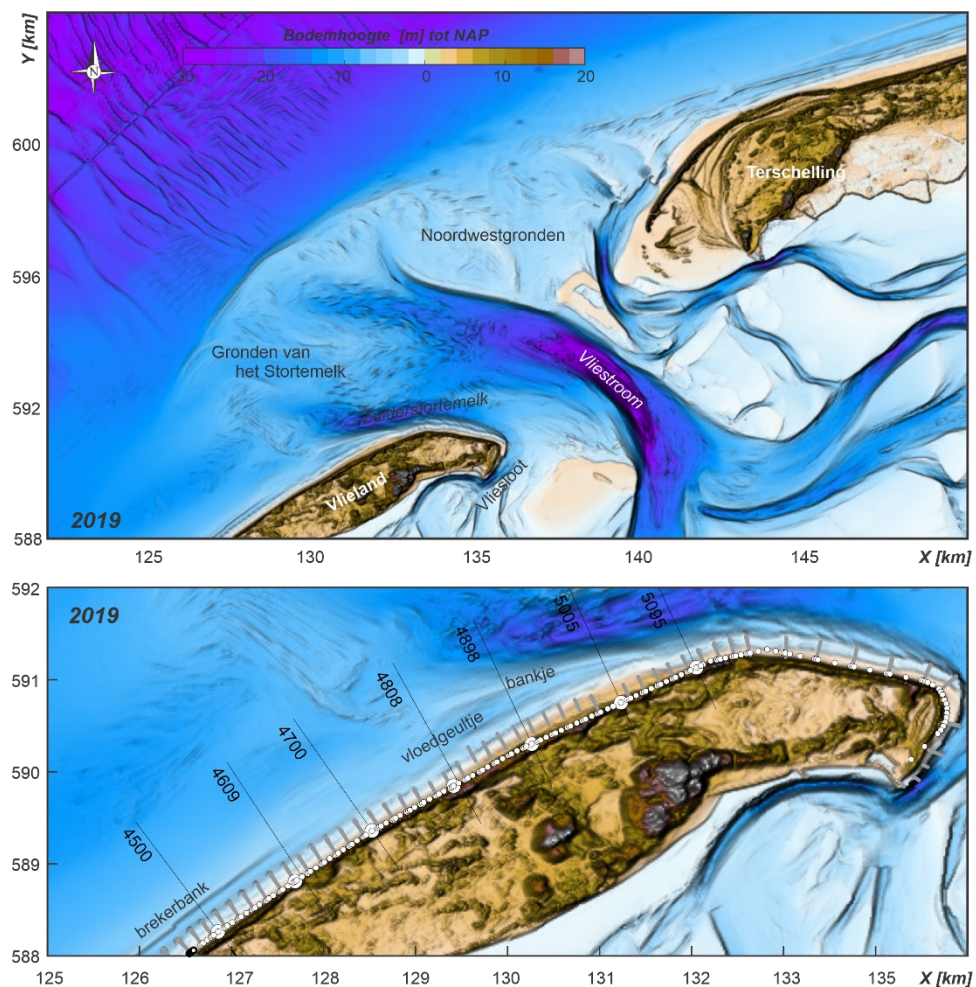
1.3 Leeswijzer

Naast de inleiding bestaat dit rapport uit 5 aanvullende hoofdstukken. Hoofdstuk 2 en 3 geven een beknopte beschrijving van het Zeegat van het Vlie en de uitgevoerde ingrepen. Deze hoofdstukken zijn gebaseerd op Elias (2021), waaruit de ontwikkelingen van het zuidelijke deel van de buitendelta (het Zuiderstortemelk) verder zijn toegelicht. Hoofdstuk 4 geeft een gedetailleerde beschouwing van de kustzone van Noordoost Vlieland (raai 4700 – 5095). Dit hoofdstuk is vooral gebaseerd op analyse van de Jarkus grids, profielen en strandlijnen. In Hoofdstuk 5 worden de verkregen inzichten bediscussieerd. De conclusies staan in Hoofdstuk 6 in de vorm van een beantwoording van de onderzoeksvragen.

2 Een overzicht van geulen, platen en kustverdediging

2.1 Geulen en platen

Het zeegat van het Vlie ligt ingeklemd tussen de eilanden Terschelling en Vlieland (Figuur 2-1). In de keel van het zeegat vormt de Vliestroom de hoofdgeul. Langs de kust van Vlieland bevindt zich nog een tweede, kleinere geul het Zuiderstortemelk. Deze geul omsluit de noordzijde van het eiland en maakt verbinding met de in het bekken liggende Vliesloot. Ten noorden van raai 5095 raakt het Zuiderstortemelk de kust. Ten zuiden van deze raai ligt de geul verder zeewaarts. Langs de zuidzijde van de geul is een langgerekt, smal bankje gevormd (zie Figuur 2-1, onder). Ingeklemd tussen dit bankje en de kust is nog een ondiep vloedgeultje te onderscheiden. Tussen raaien 4808 en 4609 ligt het overgangsgebied van de buitendelta naar de gestrekte eilandkust, waarna ten zuiden van raai 4609 de invloed van het zeegat beperkt is en een enkele langgerekte brekerbank aanwezig is.



Figuur 2-1: Overzicht van de buitendelta van het Zeegat van het Vlie (boven) en een detailbeeld van de noordelijke eilandkop van Vlieland (onder) op basis van de meest recente Vakloding (2019). De witte punten geven de ligging van de RSP lijn weer. Zwarte lijnen representeren een aantal geselecteerde raaien.

2.2 Kustverdediging

2.2.1 Strandhoofden

In het verleden, voor 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. De eerste strandhoofden werden aangelegd nabij raai 4300, waarna deze oostelijk werden uitgebreid tot raai 5374. In de periode 1957-1959 zijn dan nog strandhoofden aangelegd tussen raaien 4100 en 4300. De laatste 2 korte strandhoofden zijn vrij recentelijk 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 dan 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 aanleg van nieuwe hoofden gecompenseerd moest worden.



Figuur 2-2: Boven: ligging van de strekdammen aan de hand van een kaart uit Visser (1946). Onder: Impressie van de strandhoofden 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.

2.2.2 Suppleties

Naast de aanleg van strandhoofden is er sinds 1995 ook veelvuldig gesuppleerd. De suppleties zijn onder te verdelen in twee gebieden. Vele kleine suppleties zijn uitgevoerd net ten noorden van de haven van Vlieland. Door de ligging van de geul Vliesloot, direct langs de kust is het hier vrijwel niet mogelijk om grote hoeveelheden aan te brengen. Hierdoor moeten er veelvuldig kleine suppleties worden aangebracht.

Aan de zeezijde van het eiland, tussen raai 4600 en 5100, is er sinds 1997 in de vorm van vooroever- en strandsuppleties meer dan 8 miljoen m³ zand aangebracht. Een bijzondere suppletie is de vooroeversuppletie die in 2017 in het Zuiderstortemelk is aangebracht. Met deze suppletie werd bijna 1,5 miljoen m³ zand op de geulwand van het Zuiderstortemelk aangebracht tussen raaien 5100 en 5360. Deze geulwandsuppletie heeft geen aantoonbaar effect gehad op de kustlijnontwikkelingen in het interessegebied.

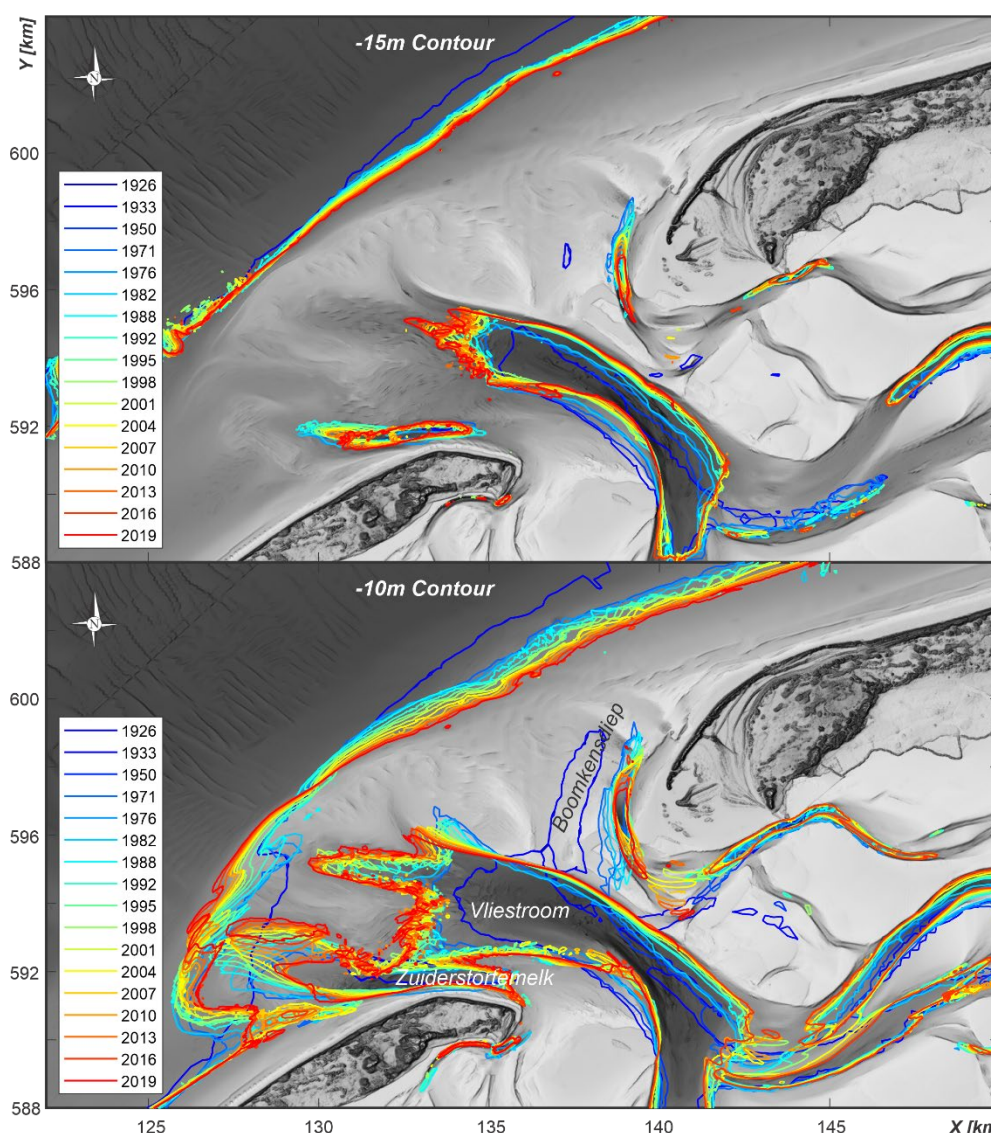
Tabel 2-1: Overzicht suppleties uitgevoerd op Vlieland gebaseerd op de suppletiedatabase t/m 2021.

		Jaar	Raai (km)		Type suppletie	Volume (m ³)
1	Noordoosthoek	1995	53,70	54,40	strand-duinsuppletie	80.000
2	Noordoosthoek	1995	53,70	54,40	strand-duinsuppletie	111.000
3	Havenstrand	2001	54,55	54,85	strandsuppletie	20.478
4	Havenstrand	2005	54,60	54,85	strandsuppletie	20.000
5	Havenstrand	2007	54,60	54,85	duinverzwarend	30.000
6	Havenstrand	2009	54,60	54,85	strandsuppletie	20.000
7	Havenstrand	2013	54,60	54,80	strandsuppletie	20.000
8	Depot Havenstrand	2018	54,10	54,20	strandsuppletie	20.000
9	Vlieland Havenstrand	2018	54,40	54,80	strandsuppletie	20.000
Totaal Vlieland - Haven						341.478
		Jaar	Raai (km)		Type suppletie	Volume (m ³)
1	Noordzeestrand	1997	46,72	48,44	strandsuppletie	279.621
2	Vlieland-oost	2001	48,90	50,10	strandsuppletie	499.579
3	Vlieland-oost	2001	46,00	48,80	vooroeversuppletie	831.892
4	Oost	2005	48,60	50,20	vooroeversuppletie	1.008.032
5	Oost	2009	47,00	50,00	vooroeversuppletie	1.780.870
6	Oost	2013	46,63	50,05	strandsuppletie	1.000.000
7	Manege	2018	50,59	50,77	strandsuppletie	20.000
8	Vlieland oost	2018	46,63	50,59	strandsuppletie	1.000.000
9	Vlieland midden	2021	43,07	46,09	vooroeversuppletie	1.600.000
Totaal Vlieland Oost						8.019.994
		Jaar	Raai (km)		Type suppletie	Volume (m ³)
1	Vlieland-Stortemelk	2017	51,10	53,60	geulwandsuppletie	1.467.000
Totaal kop - Zuiderstortemelk						1.467.000

3 Grootschalige morfologische veranderingen van Vliestroom en Zuiderstortemelk

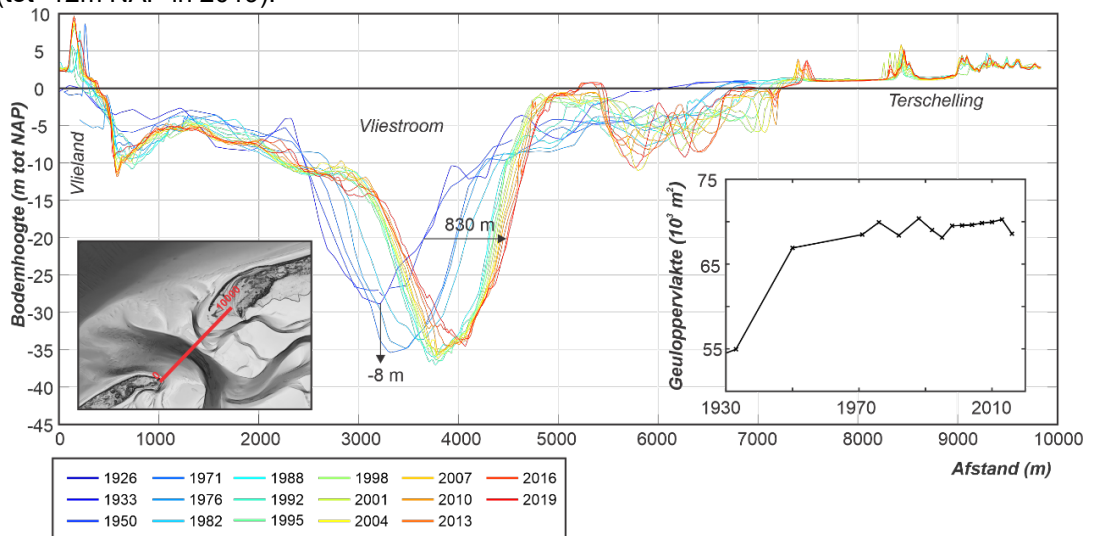
3.1 Buitendelta

Een uitvoerige beschrijving van de grootschalige morfologische ontwikkeling van het zeegat van het Vlie wordt gegeven in Elias (2021). In dit hoofdstuk worden de belangrijkste inzichten samengevat. Voor afsluiting van de Zuiderzee wisselden perioden met een enkele hoofdduitstroom (het Boomkensdiep) en twee hoofdgeulen (Boomkensdiep en Vliestroom) elkaar af. De kust van Vlieland vertoont dan een afwisseling van een eroderende kust (tot ruwweg 1850), een sterk uitbouwende kust in de periode 1850-1900 en een eroderende kust sinds 1900. De kust zit “krap in het zand” als de geulen Stortemelk-Sloot en Zuiderstortemelk-Vliesloot een verbinding hebben. Het eiland kan uitbouwen als Stortemelk en Vliesloot verbinding maken met de Vliestroom.



Figuur 3-1: Verplaatsing van de -15m (boven) en -10m (onder) contouren over de periode 1926-2019. De onderliggende bodemkaart is gebaseerd op de 2016-2019 Vaklodging.

Na afsluiting van de Zuiderzee (voltooid in 1932) ontwikkelt de Vliestroom zich als dominante ebgeul met een noordwestelijke uitstroom (Figuur 3-1). Het Zuiderstortemelk blijft dan dicht langs de kust liggen en de noordoostzijde van Vlieland is dan aan structurele erosie onderhevig. In de keel van het zeegat beweegt de Vliestroom zich langzaam richting de kust van Terschelling (Figuur 3-2). Voor de kust van Vlieland is de kleinere geul Zuiderstortemelk van direct belang. De geul ligt direct tegen de kust aan en is daarbij sterk in diepte toegenomen (tot -12m NAP in 2019).

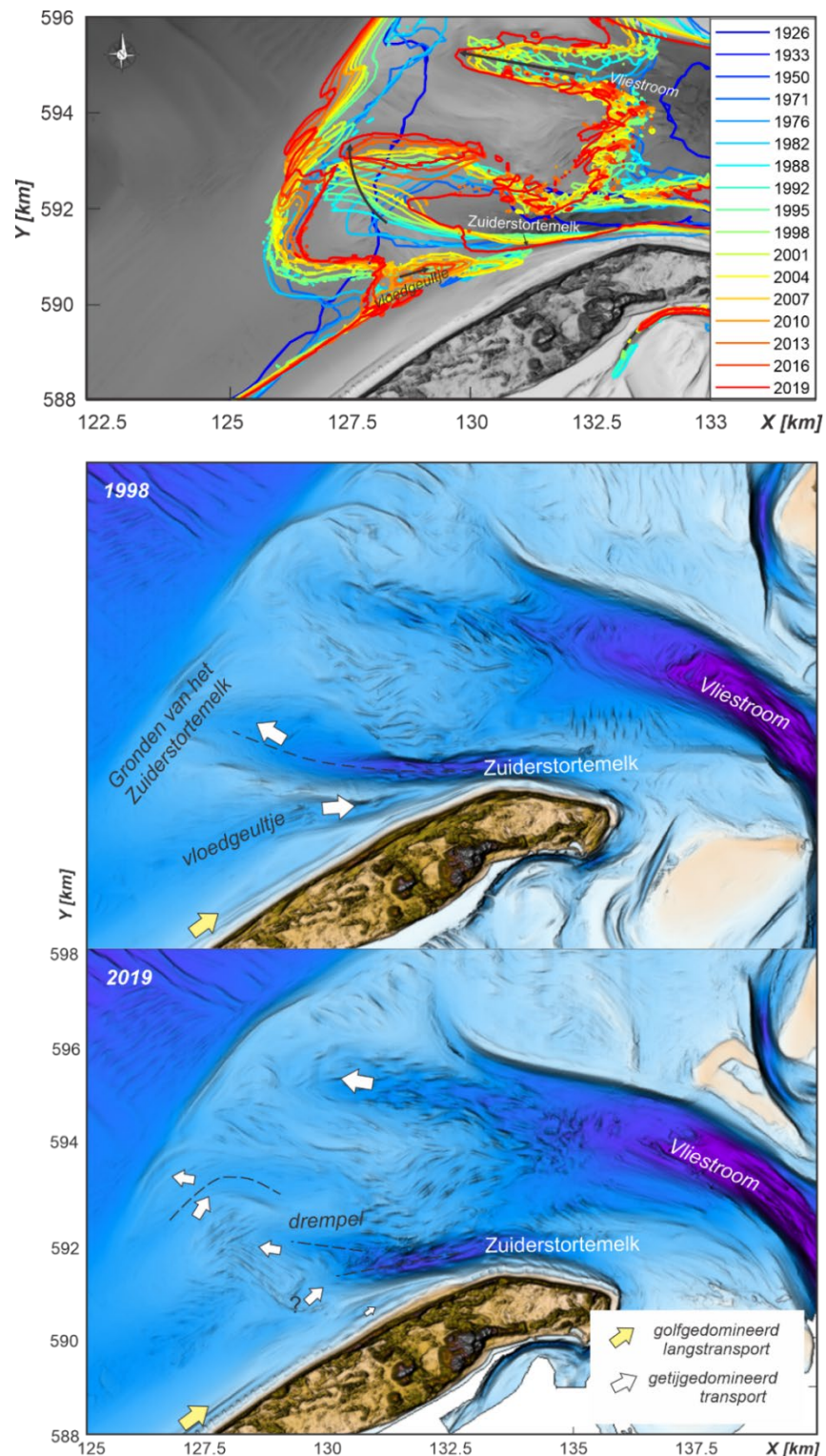


Figuur 3-2: Ontwikkeling van de Vliestroom aan de hand van een dwarsprofiel door de keel van het zeegat. De subfiguur geeft de locatie van de meetraai (links) en geuloppervlakte onder NAP (rechts).

De ontwikkelingen op het zuidelijke deel van de buitendelta worden in detail geïllustreerd in Figuur 3-3. In deze figuur worden de -10m NAP dieptecontour en de bodemligging in 1998 en 2019 weergegeven. In beide bodems zijn er twee grote geulen aanwezig zijn. De Vliestroom ligt daarbij het meest noordelijk. Deze geul is van direct belang voor het noordelijke deel van de buitendelta, maar de ontwikkeling van deze geul heeft geen direct effect op de kustlijn van Vlieland. Het Zuiderstortemelk beïnvloedt de kustlijn van Vlieland wel rechtstreeks. De geul raakt de noordoost- en oostzijde van het eiland. Het diepere deel van de geul heeft zich sinds 1926 landwaarts bewogen, waardoor de naastliggende kustlijn is uitgeschuurd en er een steile landwaartse geulwand ontstaat. Het zeewaartse deel, de uitstroom van de geul, vertoont een tegenovergestelde beweging. De uitstroom van het Zuiderstortemelk op de buitendelta is naar het noorden geroteerd. In 1998 was er dan nog een doorgaande, gekromde geul zichtbaar, maar in 2019 lijkt er een tweedeling in de geul te zijn ontstaan. De oorspronkelijke, noordelijke uitstroming van het Zuiderstortemelk wordt door een drempel gescheiden van het zuidelijke deel (Figuur 3-3, onder). Het diepere, zuidelijke deel van het Zuiderstortemelk heeft dan een meer westelijke oriëntatie gekregen en er zijn twee uitstroomopeningen zichtbaar. Het voorliggende ebschild lijkt erop te wijzen dat de meest noordelijke uitstroom ebdominant is. De dominantie van het zuidelijke uitstroomgeultje is niet direct duidelijk. Het ontbreken (opruimen) van de bank voor de meer landwaartse geul zou er op kunnen duiden dat deze uitstroom zich ontwikkelt als een vloeddominante geul.

Naast deze twee grote geulen is er in 1998 nog een tweede, kleiner geultje aanwezig. Het geultje ligt ingeklemd tussen het Zuiderstortemelk en de kust en is waarschijnlijk vloedgedomineerd. Aan weerszijden van het geultje bevinden zich kleine banken. De brekerbank die zich langs de eilandkust van Vlieland uitstrekt gaat dan eigenlijk over in deze banken waardoor hier een vrij ondiep gebied ontstaat. De ontwikkeling van de dieptecontouren laat zien dat dit vloedgeultje lange tijd aanwezig was (Figuur 3-3, boven). Het geultje verdwijnt na de uitgevoerde vooroeversuppletie in 2009 (zie Hoofdstuk 4). In de 2019 bodem zijn het

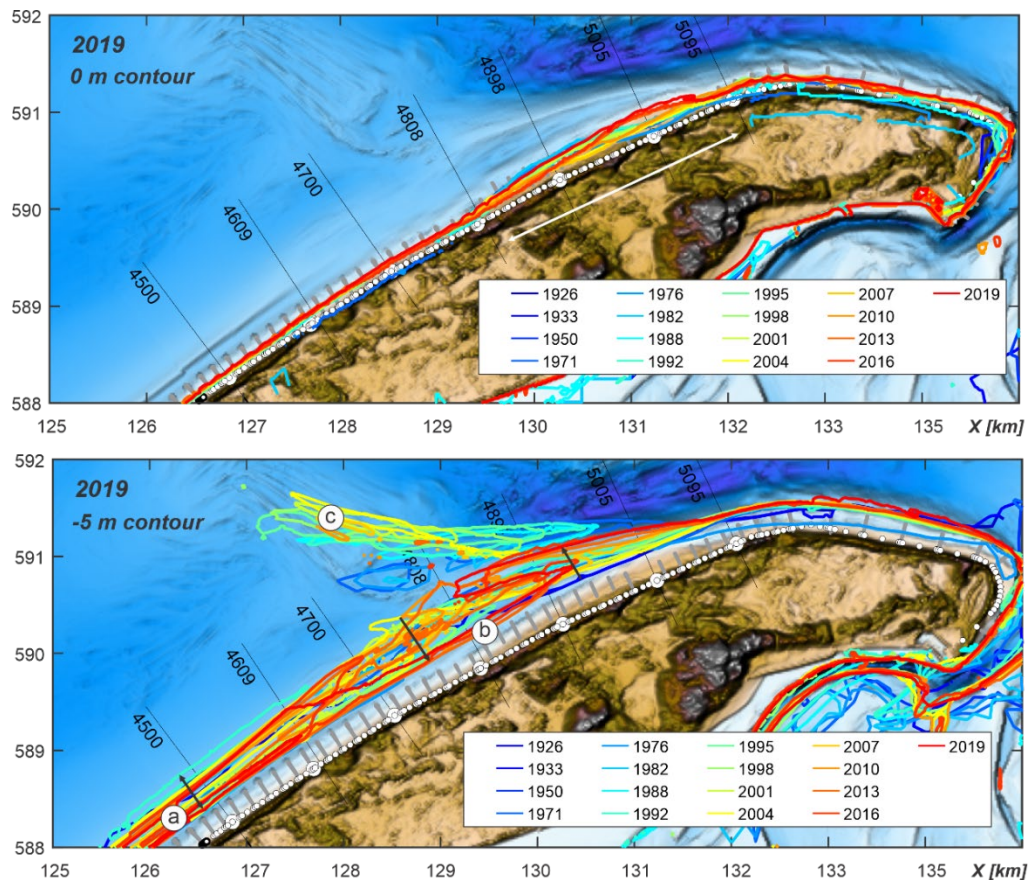
geultje en deze ondiepte niet meer zichtbaar. Langs de zuidzijde van het Zuiderstortemelk bevindt zich dan een langgerekte bank. Tussen deze bank en de kust is dan een nieuw (vloed)geultje ontwikkeld. Op de schaal van de buitendelta is deze ontwikkeling waarschijnlijk onbelangrijk, maar voor de lokale kustlijn (zie Figuur 3-4) domineren het geultje en het verdwijnen ervan de ontwikkelingen. In Hoofdstuk 4 wordt dit uitvoerig bekeken aan de hand van de Jarkus bodemmetingen.



Figuur 3-3: Langetermijn ontwikkeling van het Zuiderstortemelk (boven) aan de hand van de -10m contour. Visualisatie van de bodemligging in 1998 (midden) en 2019 (onder).

3.2 Kustlijn van Vlieland

De lange termijn ontwikkeling van de kustlijn wordt in Figuur 3-4 weergegeven aan de hand van de 0m contour (boven) en -5m contour (onder), op basis van de Vaklodingen. De 0m contour laat eigenlijk een vrij stabiele ligging zien, waarbij de recente kustlijnen over het algemeen iets zeewaarts liggen van de oudere opnamen. De strandhoofden houden hier de kustlijn op een min-of-meer vaste positie. Perioden met lichte kustuitbouw of terugtrekking treden op door langslappende (horizontale) zandgolven. Deze zandgolven ontstaan door aanlanding van banken op de Vliehors vanaf de buitendelta van het Eierlandse Gat. Het aangelande zand verplaatst zich onder de invloed van golven noordwaarts langs de kust. De kustlijn vertoont dan een langzame groei gevolgd door terugtrekking waardoor het lijkt of er een zandgolf langs propageert (Bakker, 1968; Walhout, 1998). Ten zuiden van raai 4808 en ten noorden van raai 5095 ligt de 0m contour ongeveer op de voet van de strandhoofden. Hier is de strandbreedte beperkt. Tussen raai 4808 en 5095 ligt de 0m contour wat verder zeewaarts en varieert dan sterk in de tijd. Dit gebied van lokale (beperkte) uitbouw varieert door de veranderingen van het voorliggende vloedgeultje, maar ook de uitgevoerde suppleties hebben hier een rol gespeeld.



Figuur 3-4: Ontwikkeling van de noordwestelijke kustlijn van Vlieland.

De -5 m contour geeft een beeld van de ontwikkeling van de vooroever. Ten zuiden van raai 4700 vertoont de contour een relatief grote variatie (zie a in Figuur 3-4). Deze variatie wordt veroorzaakt door het zeewaarts verplaatsen van de brekerbank. Tussen raai 4700 en 5095 is juist een afwisseling van terugtrekking en uitbouw te zien (zie b). Deze variabiliteit lijkt gerelateerd te zijn aan het verdwijnen van het vloedgeultje en de vorming van een nieuw bankje. Ten noorden van raai 5095 blijft de -5m contour stabiel en dicht op de kust liggen. Er lijkt een kleine uitbouw van de kust plaats te vinden. Dit is waarschijnlijk gerelateerd aan de verstelling van de geulwand; het diepere deel van het profiel neemt in diepte toe en verplaatst landwaarts terwijl het ondiepere deel dan wat zeewaarts beweegt (zie Hoofdstuk 4)

3.3 Lange-termijn ontwikkeling van duinvoet, gemiddelde hoog- en laagwaterlijn

Metingen van duinvoet (DV), de gemiddeld laagwaterlijn (GLW) en de gemiddeld hoogwaterlijn zijn voor een aantal raaien beschikbaar sinds 1858 (Figuur 3-5). Deze raaien geven een goed beeld van de reductie van kustlijn terugtrekking na aanleg van de strandhoofden.

Raai 4700 vertoont een knik in de strandlijnen rond 1865. De strandhoofden reduceren de erosie aanzienlijk. Er volgt nog wel een periode van lichte kustlijn terugtrekking tot ongeveer 1910. Daarna lijken de strandlijnen lange tijd te fluctueren rond een vaste positie. Vanaf 1985 ligt de GLW stabiel maar verplaatst de duinvoet iets zeewaarts.

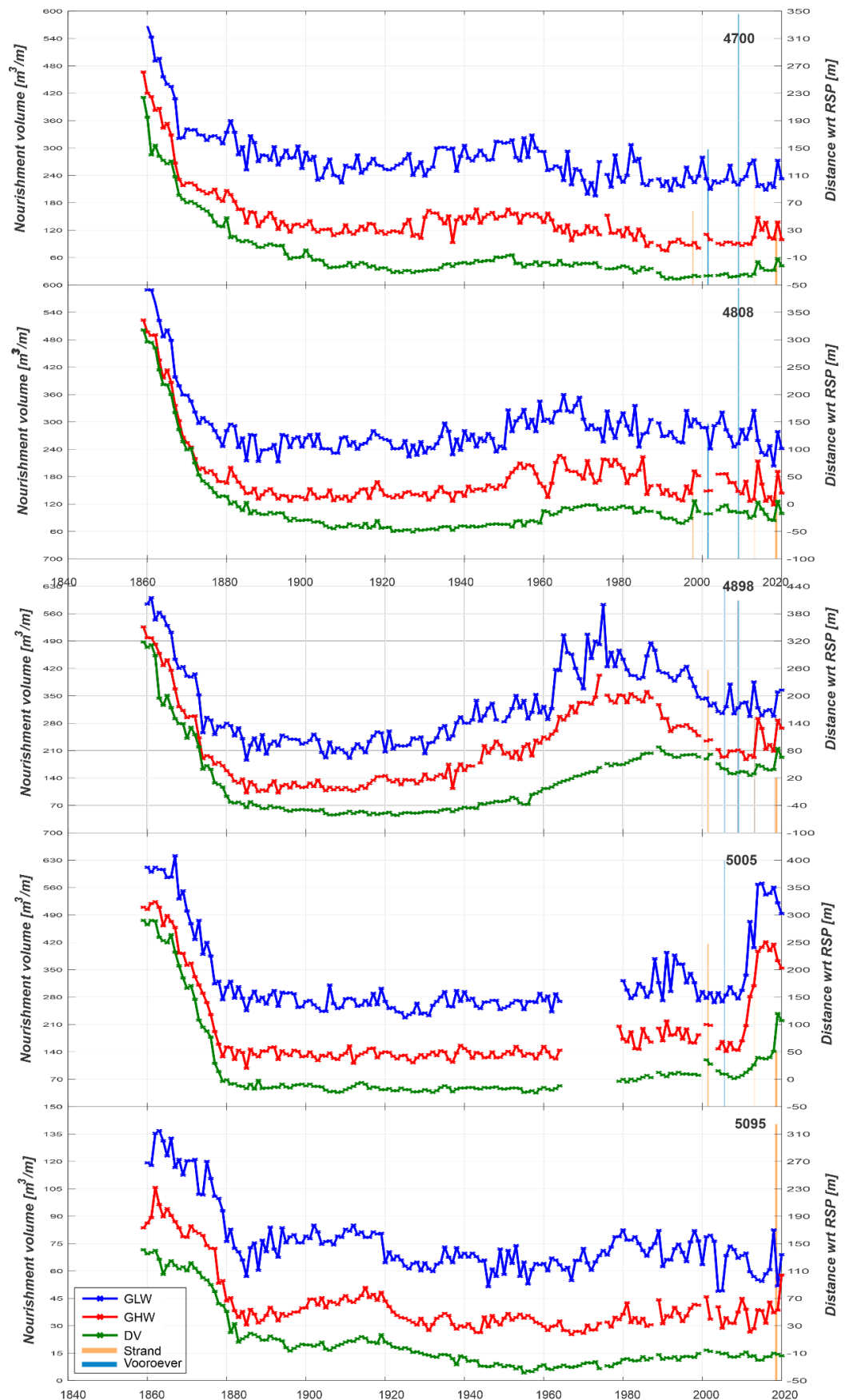
Bij *raai 4808* zijn de strandhoofden in 1874 aangebracht. Na aanleg stabiliseren ook hier de kustlijnliggingen. Sinds 1950 vertoont de kustlijn grotere variaties. Naast jaarlijkse fluctuaties zijn er perioden met langdurige vooruitgang en terugtrekking zichtbaar. De meest recente metingen (2013-2020) vertonen een achteruitgang in GLW positie.

Raai 4898 vertoont een grotere variatie dan de omliggende raaien. Hier zijn de strandhoofden in 1876 aangelegd. Na aanleg stabiliseert de kust om vervolgens vanaf 1920 tot ongeveer 1980 zeewaarts te verplaatsen. Vanaf 2010 volgt dan weer een terugtrekking van zowel GLW en GHW. De duinvoet bouwt tot 1990 nog zeewaarts uit om vervolgens iets terug te trekken. Vanaf 2010 volgt dan weer een kleine uitbouw. Met een uitbouwende duinvoet en een terugtrekkende GLW en GHW zal het MKL volume sterk af nemen.

In *raai 5005* zijn de strandhoofden in 1880 voltooid. Tot 1980 blijven de strandlijnen dan opmerkelijk stabiel. Tussen 1980 en 2010 treden er variaties in de GLW op. Vanaf 2010 verplaatsen zowel de GLW, GHW en DV sterk zeewaarts.

Ook in *raai 5095* neemt de erosie van de strandlijnen sterk af na aanleg van de strandhoofden. Sindsdien blijft de GLW een lichte trend van terugtrekking vertonen. Alhoewel perioden van uitbouw en terugtrekking elkaar afwisselen lijkt er vanaf 1980 een structurele erosie plaats te vinden. Deze erosie is waarschijnlijk gerelateerd aan het landwaarts opschuiven van het Zuiderstortemelk. De GLW en DV vertonen een terugtrekking tot de jaren zestig. Sindsdien lijken deze juist iets zeewaarts te verplaatsen.

De lange-termijn strandlijnliggingen bevestigen de conclusie dat de aanleg van strandhoofden de kustlijn achteruitgang sterk gereduceerd of zelfs geheel gestopt heeft. Ook de meerjarige fluctuaties in lichte terugtrekking en vooruitgang door langstreckende zandgolven zijn duidelijk zichtbaar. Variabiliteit in kustlijnligging is het grootst bij raaien 4898 – 5005. De centrale eilandkust, maar ook het deel van de kust direct grenzend aan het Zuiderstortemelk vertonen kleinere variaties.



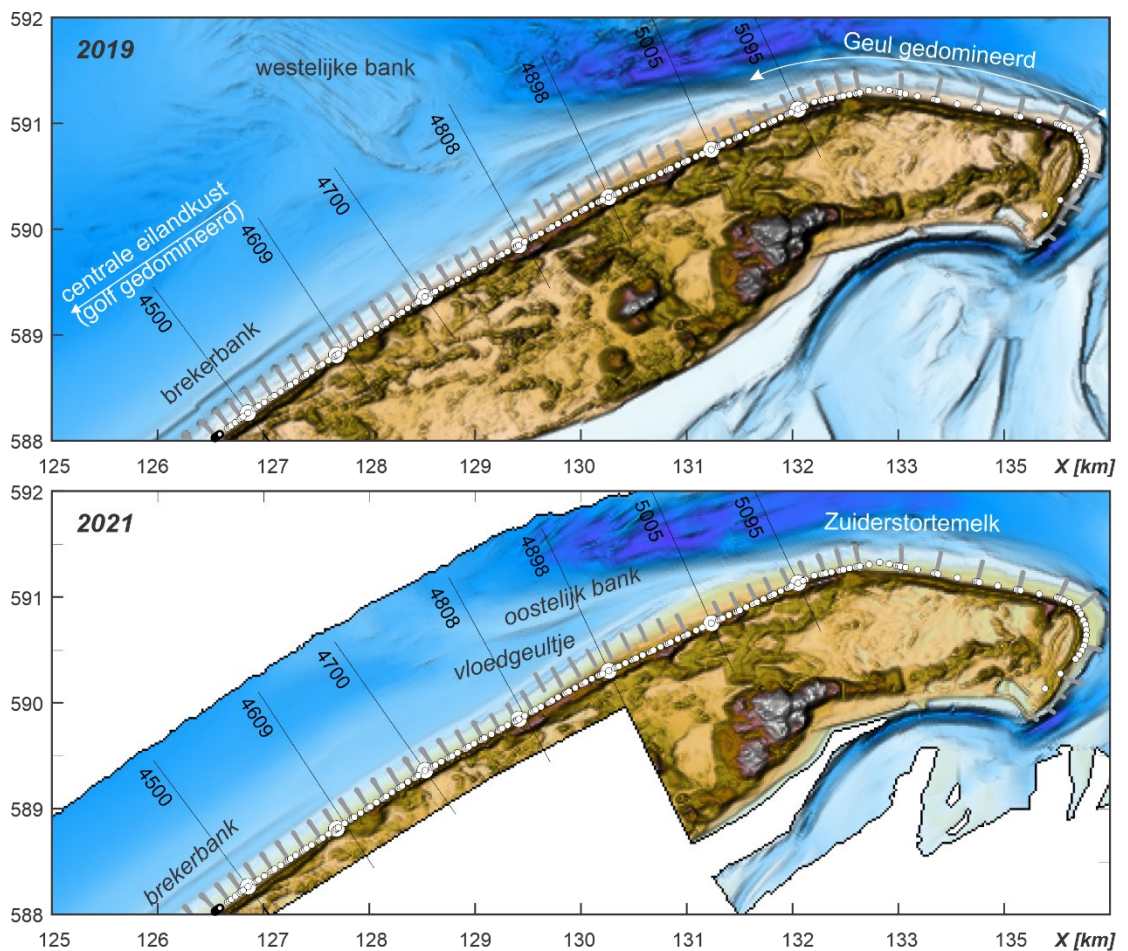
Figuur 3-5: Ontwikkeling van metingen van duinvoet (DV), de gemiddeld laagwaterlijn (GLW) en de gemiddelde hoogwaterlijn over de periode 1858-2020.

4 Gedetailleerde analyse van de kustlijn en suppleties (raaien 4700-5095)

4.1 Overzicht van de huidige bodemligging

Figuur 4-1 toont een overzicht van de recente kustlijnligging op basis van de 2019 Vakloding (boven) en de 2021 Jarkus opname (onder). Op basis van de huidige morfologische kenmerken is de kustzone onder te verdelen in 3 gebieden:

1. de (golf-gedomineerde) centrale eilandkust (ten zuiden van raai 4609)
2. het overgangsgebied van eilandkust naar getijgeul (tussen raai 4609 en 5059).
3. het zeegat ofwel geul-gedomineerde eilandkop (ten oosten van raai 5059)



Figuur 4-1: overzicht van de noordoostelijk kust van Vlieland in 2019 en 2021.

In het gebied ten zuiden van raai 4609 speelt de buitendelta geen directe rol. Op de vooroever bevindt zich een langgerekte (enkele) brekerbank. De sedimenttransporten worden hier gedomineerd door de golven. In theorie zou de buitendelta wel een rol kunnen spelen in het golfveld dat optreedt langs de kust door golfafscherming van golven uit noordoostelijke richting. Deze golven komen echter weinig voor. De kustlijn vertoont hier, na aanleg van de strandhoofden, perioden van groei en aanzanding (zie H.4.2).

Ten oosten van raai 5059 grenst het Zuiderstortemelk direct aan de kust. Hier worden de sedimenttransporten gedomineerd door de getijstrooming in de geul. Golfbreking van hoge golven op de buitendelta zorgt ervoor dat de kust afgeschermd wordt tegen golfaanval tijdens stormen. Dit wil niet zeggen dat golven geen rol spelen. Kleinere golven kunnen nog steeds ongestoord tot de kust doordringen. Deze golven zorgen ervoor dat er toch strandafslag kan optreden. Dit zand wordt dan effectief kustlangs afgevoerd door de getijstrooming. Dit proces is waarschijnlijk een belangrijke reden waarom de kust hier krap in het zand zit. In het verleden zijn hier dan ook veelvuldig kustverdedigingsmaatregelen getroffen zoals duinverzwaringen, plaatsing van palenrijen en strandhoofden (Steyaert, 1999; van Heuvel, 1999; Teerenstra 1999).

In de (zeewaartse) uitstroom van het Zuiderstortemelk overheerst waarschijnlijk een ebdominant transport. Dit is af te leiden uit de vorming van het westelijke deel van de Gronden van het Zuiderstortemelk. Deze bank ligt als een hoefijzer om de uitstroom heen en Gronden ontstaat door de depositie van zand aangevoerd door de ebstroming vanuit het Zuiderstortemelk. Het Zuiderstortemelk ligt direct langs de kust tot raai 5059, maar ten zuiden hiervan neemt de afstand tussen de geul en de kust toe. De geulconfiguratie lijkt op die van het Zeegat van Texel. Ook daar ligt het Nieuwe Schulpengat direct langs de kust bij het Zeegat, maar ontstaat er in zuidelijk richting een klein platform tussen de geul en de kust. Op dit platform overheerst een vloeddominant transport. Gedetailleerde modellering van het Zeegat van Texel (Elias, 2006) laat zien dat deze vloedstromingen samenhangen met het faseverschil tussen de strooming in het Zeegat en die op de Noordzee. Kentering van het getij in het Zeegat en op de Noordzee vindt niet direct op hetzelfde moment plaats. Er staat nog een grote ebstroming in het zeegat als de vloedstroming vanuit de Noordzee al richting het zeegat propageert. Deze vloedstroming wordt dan tussen de hoofdstroom van de eb en de kust geduwd. Er ontstaat zo een smalle zone van vloedgedomineerd transport direct langs de kust. Ook in het Zeegat van het Vlie zal dit een belangrijk proces zijn. Dit wordt bevestigd door de aanwezigheid van de langgerekte bank die zich aan de zuidzijde van het Stortemelk bevindt. Dit soort langgerekte, smalle banken vormen zich vaak tussen geulen met verschillende dominantie. De bank ligt enigszins schuin op de kust waardoor een soort trechtvorm ontstaat en de doorstroomoppervlakte aan de noordzijde (raai 5005) kleiner is dan aan de zuidzijde van de bank (raai 4808). Dit kan dan voor een toename van de stroomsnelheid en daardoor ook de zandverliezen zorgen.

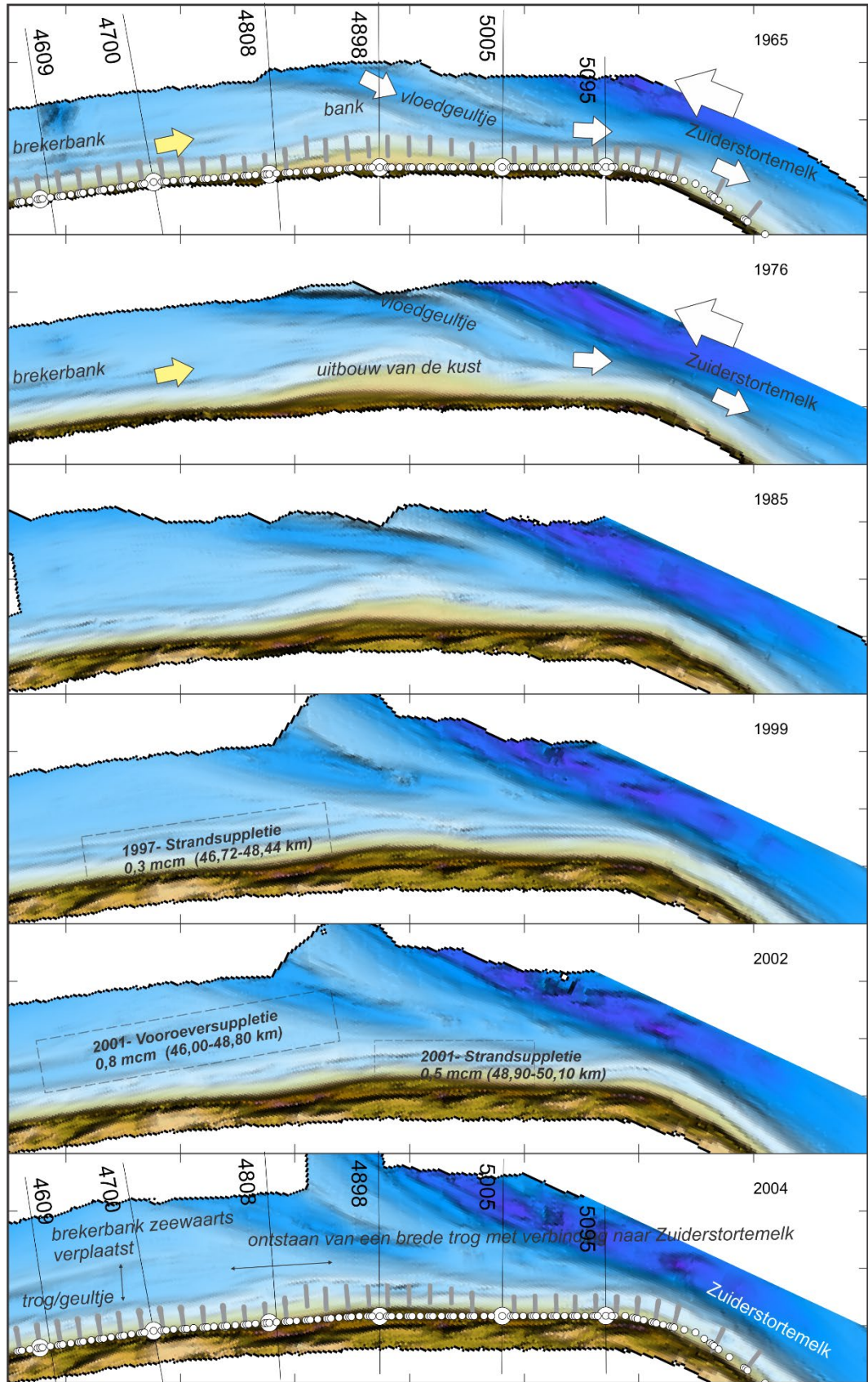
4.2 Ontwikkeling van geulen en kust sinds 1965

Op de schaal van het zeegat lijken de veranderingen in geul- en plaatligging beperkt. Het Zuiderstortemelk ligt eigenlijk al voor afsluiting van de Zuiderzee om de noordoostzijde van Vlieland heen (Hoofdstuk 3). Toch hebben zich de afgelopen decennia wel kleinschalige veranderingen voorgedaan die van belang zijn voor de opgetreden kustlijnontwikkeling. Met behulp van de Jarkus grids kunnen deze kleinschalige morfologische veranderingen in detail weergegeven worden (Figuur 4-2 en Figuur 4-3).

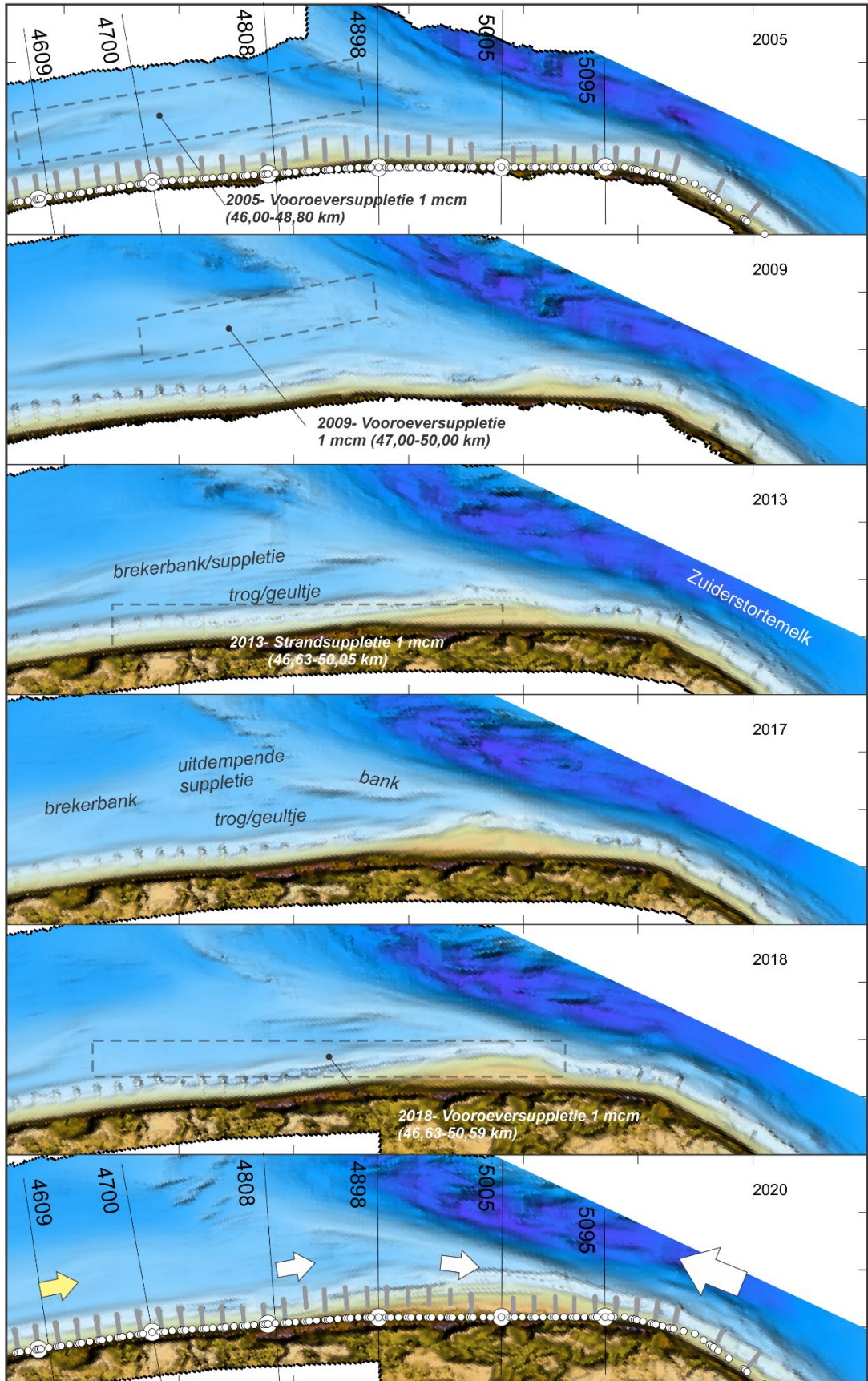
Een vergelijking van de 1965 en 2020 bodems (Figuur 4-2 en Figuur 4-3) laat zien dat er naast overeenkomsten ook een duidelijk verschil in bodemligging aanwezig is. In 1965 strekt de brekerbank zich ver richting het zeegat uit. Ter hoogte van raai 4898 gaat de bank dan over in een ondiepe bank die zich landwaarts van het naastliggende geultje heeft gevormd. Dit geultje is echter niet het Zuiderstortemelk, maar een vloedgeultje dat zich gescheiden door een langgerekte bank, evenwijdig aan het Zuiderstortemelk uitstrekt (zie ook Figuur 3-3). Deze configuratie blijft lange tijd behouden. Wel zijn er perioden aanwezig waarbij de kust lokaal, ter hoogte van raai 4898, uitbouwt (zie bijvoorbeeld de opname van 1976). Ook in de bodem van 1999 is het vloedgeultje nog aanwezig in de vooroever. De in 1997 uitgevoerde strandsuppletie is in deze bodem niet direct zichtbaar. Wel heeft het geultje zich iets vergroot en is daarbij richting de kust geroteerd. Het Zuiderstortemelk is in diepte toegenomen (zie raai 5095) waardoor de kust hier sterk is geërodeerd. Wat in deze bodemopname ook opvalt is de langgerekte brekerbank die zich vanaf de centrale eilandkust ver richting het zeegat uitstrekt. Rond raai 4898 raakt deze bank de zuidelijk rand van het Zuiderstortemelk. Langs de kust is er oostelijk van raai 4898 dan nog een klein brekerbankje tussen Zuiderstortemelk en de kust te onderscheiden. Dit bankje zet zich tot iets noordelijk van raai 5095 door.

In de periode 1999-2005 treden dan ineens grote veranderingen op. De uitgevoerde suppleties lijken hierin een rol te spelen. Na de vooroeversuppletie uitgevoerd in 2001 verplaatst de brekerbank zeewaarts. Er ontstaat dan een brede trog tussen de brekerbank en de kust in. Deze brede trog of kustlangse geul handhaaft zich in de volgende jaren. In de 2004 en 2005 bodem is dan al te zien dat het geultje zich naar het oosten heeft uitgebreid en nu verbinding maakt met het Zuiderstortemelk. Ook na de 2005 en 2009 vooroeversuppletie blijft het geultje aanwezig (Figuur 4-3). Zeewaarts hiervan doen zich echter grote veranderingen voor. De 2009 vooroeversuppletie heeft het voorliggende vloedgeultje dichtgezet. Het afgesloten geultje verzandt dan volledig in de volgende jaren en de huidige bodemconfiguratie ontstaat. Het lijkt waarschijnlijk dat met het dichtzetten van het vloedgeultje de vloedstroming een alternatieve route gaat volgen. Het geultje direct langs de kust lijkt dan een logische weg. Dit geultje blijft in de volgende jaren dan ook gehandhaafd.

Langs de rand van het Zuiderstortemelk wordt langzaam een nieuw bankje opgebouwd (zie bijvoorbeeld de 2017 bodem). Tussen dit bankje en de kust blijft het geultje aanwezig. Deze situatie blijft tot 2020 bestaan. Het bankje lijkt zich te verlengen en verbindt zich rond raai 5005 met de kust. De suppletie uitgevoerd in 2018 geeft geen zichtbare verandering van de vooroever.



Figuur 4-2: Ontwikkeling van de kustzone tussen raaien 4609 en 5095 in de periode 1965-2004. In Appendix B-1 worden alle jaren getoond.



Figuur 4-3: Ontwikkeling van de kustzone tussen raaien 4609 en 5095 in de periode 2005-2020. In Appendix B-1 worden alle jaren getoond. Zie Figuur 4-1 voor de 2021 opname.

4.3 Detailanalyses van geselecteerde raaien

4.3.1 Centrale eilandkust (raai 4500 en 4609)

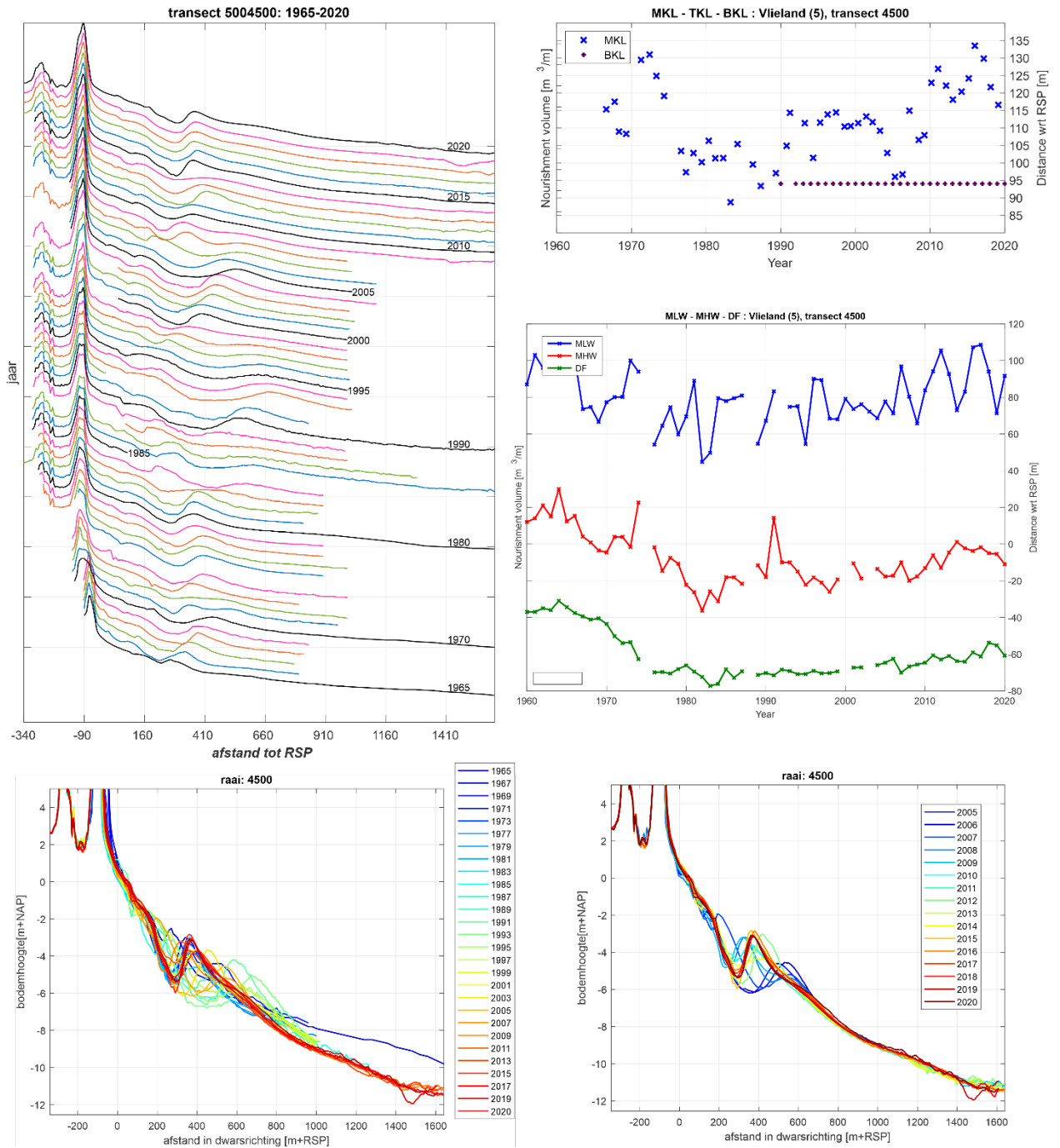
Raaien 4500 en 4609 geven beide een representatief beeld van de eilandkust buiten de directe invloedssfeer van het Zeegat. In beide raaien fluctueert de MKL in positie, maar ligt sinds 1990 zeewaarts van de BKL. In raai 4500 blijft de MKL sinds 2010 dan minimaal zo'n 20-30m zeewaarts van de BKL (Figuur 4-4). De MKL lag maximaal zeewaarts in 2016, sindsdien vindt er wel een continue terugtrekking plaats, waardoor de positie in 2020 ongeveer gelijk is aan 2013. Het iets oostelijker gelegen profiel 4609 vertoont een vergelijkbaar beeld van terugtrekking tot ongeveer 1990. Vanaf 1990 bouwt de MKL hier continu uit. De omslag van terugtrekking naar uitbouw vindt hier iets later plaats. Dit komt waarschijnlijk doordat de kustuitbouw samenhangt met het verplaatsen van horizontale zandgolven van west naar oost langs het eiland.

De strandlijnen (GHW, GLW en DV) vertonen in beide profielen een vergelijkbaar verloop. De strandlijnen verplaatsen landwaarts tot 1980-1990, om vervolgens zeewaarts te verplaatsen. De GLW ligt in 2020 dan vrijwel gelijk aan de 1965 positie. De duinvoet en GHW-lijn zijn over de gehele periode 20m landwaarts verplaatst.

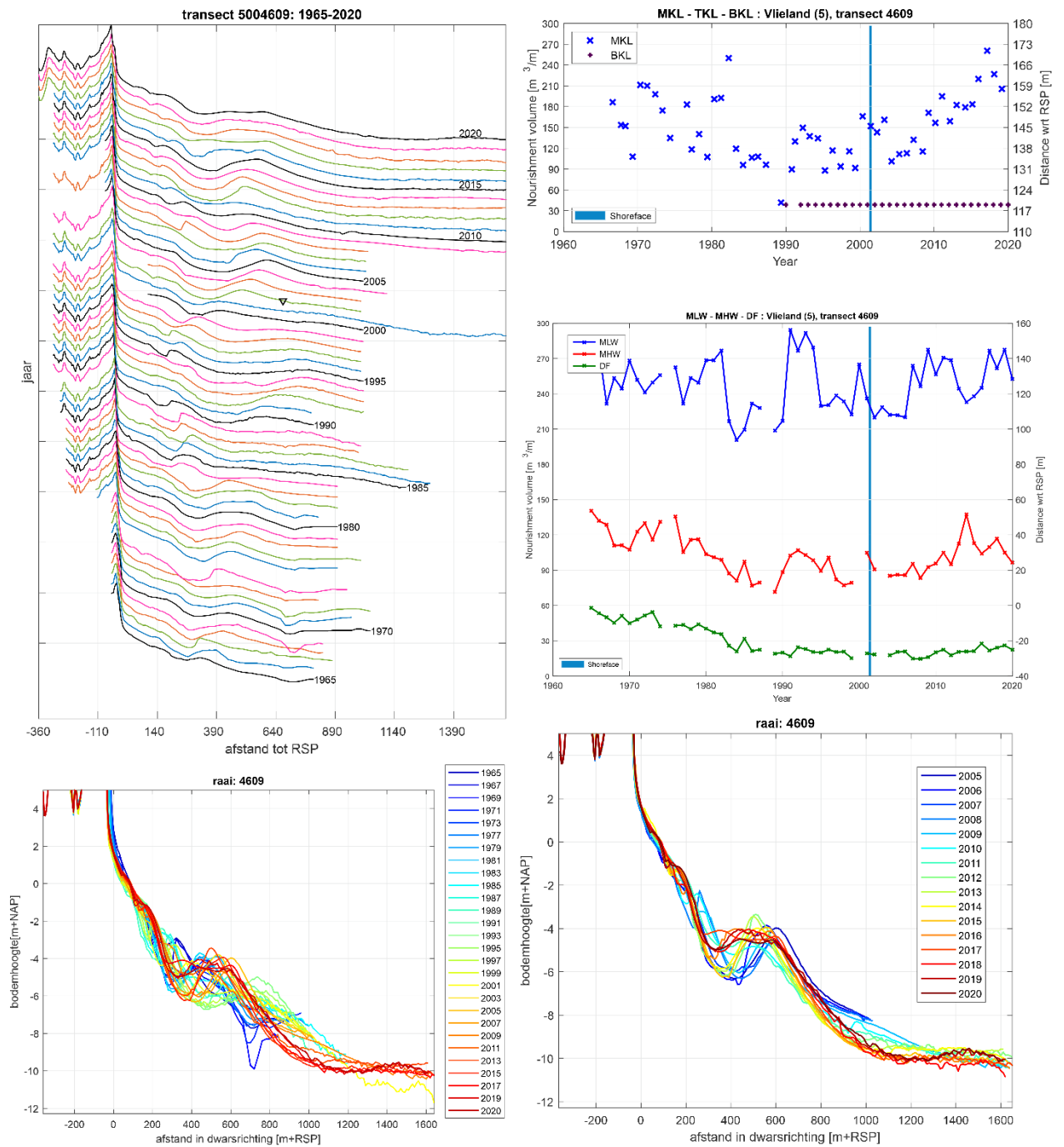
De timestacks van profielontwikkeling geven een duidelijk beeld van het bankgedrag. Met name in raai 4500 (Figuur 4-4) is de brekerbank duidelijk zichtbaar. Opvallend is de afwisseling tussen een stabiele en een migrerende bankligging. In de periode 1970-1983 lag de buitenbank eigenlijk vrijwel stabiel op een afstand van 350m tot de RSP. Tussen 1983 en 1990 herschikken de banken zich, waarbij 1 bank richting de kust migreert en rond 1990 verheeld. Een tweede bank migreert zeewaarts en dempt uit (rond 1995). Dit herschikken van de banken correspondeert met de grote fluctuaties in de MKL ligging gedurende deze periode. Vanaf 1995 ontwikkelt zich een nieuwe brekerbank. Deze ontstaat aan de kust en migreert dan langzaam zeewaarts. Rond 2005 wordt een maximale hoogte bereikt, waarna de bank snel uitdempt. Langs de kust heeft zich een kleine nieuwe bank ontwikkeld. Deze bank migreert tot 2010 zeewaarts, waarna deze stabiliseert rond de 390m tot de RSP. De bijbehorende trog is daarbij ook zeewaarts verplaatst. Tussen de trog en de kust is er dan relatief veel zand aanwezig, waardoor ook de MKL ver zeewaarts ligt. De dip in MKL ligging rond 2006-2007 correspondeert met het hervormen van de banken.

Concluderend

Het MKL verloop van de kust lijkt hier rechtstreeks gecorreleerd te zijn met de stabiliteit van de voorliggende banken. In periodes met een stabiele bankligging, ligt de MKL vrij ver zeewaarts. Tussen de trog en de duinen is er dan een groot volume zand aanwezig. In periodes met dynamisch bankgedrag doen zich juist grote fluctuaties in MKL ligging voor. Vooral tijdens de vorming van banken is er tijdelijk een dip in de MKL te observeren. Het bankgedrag wordt wel duidelijk gereflecteerd in de MKL, maar niet in de overige strandlijnen. Met name de duinvoet en GHW vertonen sinds 1990 een vrijwel continue trend van (kleine) zeewaartse verplaatsing.



Figuur 4-4: Een overzicht van de ontwikkeling van raai 4500 aan de hand van timestack, MKL, strandlijnen en dwarsprofielen.



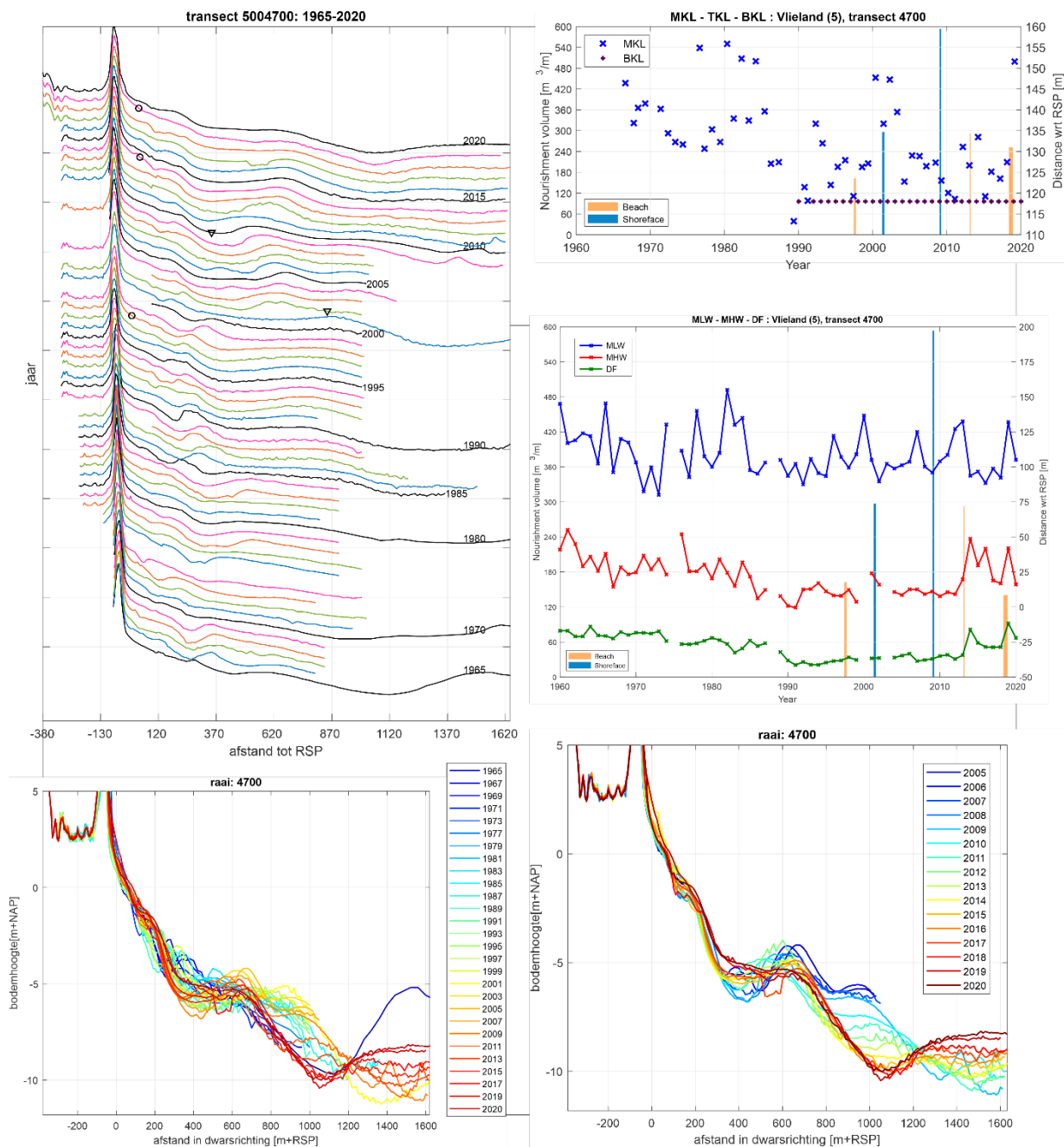
Figuur 4-5: Een overzicht van de ontwikkeling van raai 4609 aan de hand van timestack, MKL, strandlijnen en dwarsprofielen. In de timestack zijn de strand- en vooroeversuppleties aangegeven door driehoekjes en cirkels.

4.3.2 Overgangsgebied tussen eilandkust en Zuiderstortemelk (raai 4700)

Oostelijk van raai 4645 ligt de MKL dicht bij de BKL. Hier begint ook het gebied van frequent suppleren. In raai 4681 en 4700 zorgen de suppleties ervoor dat de BKL niet meer wordt overschreden. Wel vertoont het MKL-verloop grote variaties. Na suppletie verplaatst de MKL tot 30m zeewaarts om in de opeenvolgende jaren weer terugtrekken. Suppleties worden dan om de 4 jaar herhaald.

In raai 4700 blijft de MKL, waarschijnlijk mede door de suppleties nog zeewaarts van de BKL, maar oostelijk hiervan (raai 4808) verplaatst de MKL tot 80m landwaarts van de BKL. In deze profielen wordt de invloed van de voorliggende banken en geulen van de buitendelta meer zichtbaar. Een duidelijk verschil met de meer westelijk gelegen profielen is dat de brekerbanken in dit profiel minder ontwikkeld zijn. Daarnaast vertoont het diepe deel van het profiel, zone tussen de -5m en -10m, een grote verdieping, waardoor er een knikpunt in het profiel ontstaat rond de 1000m tot de RSP. Zeewaarts hiervan neemt de bodemhoogte toe waardoor er een platform ontstaat met een diepte van -8m. Deze verandering in dwarsprofiel is een goede indicatie dat het zeegat hier een invloed heeft op de processen.

Dit knikpunt is duidelijk zichtbaar in raai 4700. Rond de -10m NAP gaat de hellende vooroever over in een horizontaal platform. Tussen 1985 en 2000 bevindt er zich een kleine brekerbank op dit platform. De bank migreert langzaam landwaarts en ligt in 1995 dan dicht op de kust (200-300m tot RSP). Vanaf 1995 begint deze bank zich dan iets zeewaarts te verplaatsen. Na aanleg van de vooroeversuppletie in 2001 ontstaat een meer zeewaarts, 600-700m tot de RSP, gelegen brekerbank. Deze bank migreert eerst landwaarts. De 2009 vooroeversuppletie zorgt ervoor dat deze bank weer zeewaarts verplaatst.



Figuur 4-6: Een overzicht van de ontwikkeling van raai 4700 aan de hand van timestack, MKL, strandlijnen en dwarsprofielen. In de timestack zijn de strand- en vooroeversuppleties aangegeven door driehoekjes en cirkels.

4.3.3 Ontwikkeling onder invloed van het vloedgeultje (raai 4808 en 4898)

Oostelijk van raai 4718 kan de MKL niet zeewaarts van de BKL worden gehouden en vanaf raai 4735 begint dan een gebied tot ongeveer raai 4844, waarbij de MKL dan nog structureel terugtrekt. Hier ligt de MKL landwaarts van de BKL. . Suppleties zijn in dit gebied noodzakelijk voor kustlijnhandhaving getuige de suppletiegeschiedenis.

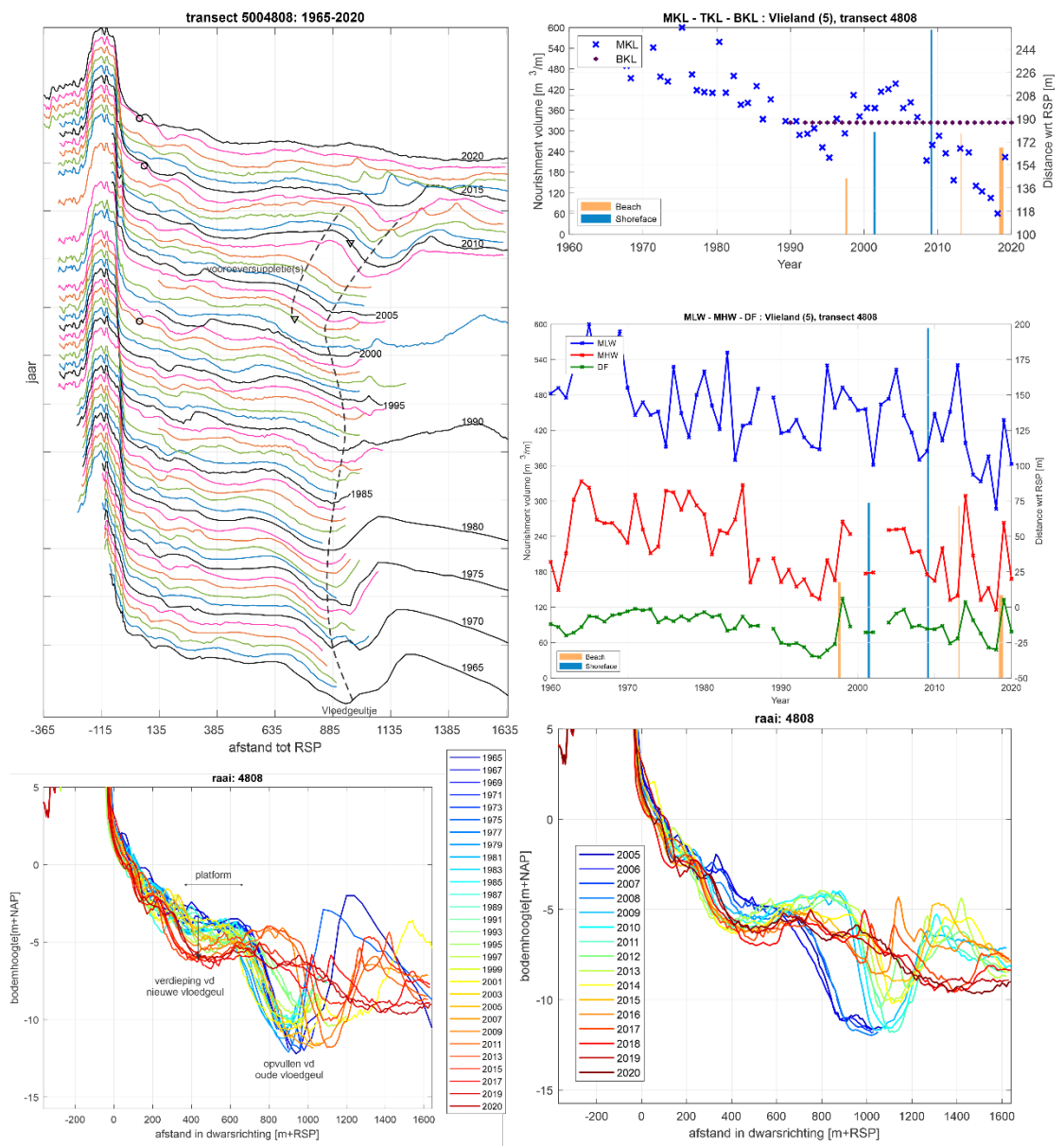
Raai 4808 illustreert deze ontwikkelingen (Figuur 4-7). In deze raai vertonen de oudere metingen een terugtrekking van de MKL. Deze terugtrekking zet zich door tot 1995. Tussen 1995 en 2005 verplaatst de MKL zich dan weer zeewaarts. In deze periode zijn ook een strand en vooroeversuppletie uitgevoerd die hieraan bijgedragen zullen hebben. Vanaf 2005 trekt de MKL zich consistent terug. In 2019 ligt de MKL dan 80m landwaarts van de BKL. Ook de strandlijnen (MLW, MHW en duinvoet) verplaatsen dan landwaarts.

De ontwikkelingen in het dwarsprofiel geven een goede verklaring voor het geobserveerde MKL-verloop. In 1965 bevindt zich een klein vloedgeultje op ongeveer 900m tot de RSP. Tussen dit geultje en de kust is het dwarsprofiel ondiep. Hier ligt een platform op -3 m NAP. Het vloedgeultje blijft tot 2001 continu in de vooroever aanwezig. Periodes met een kleine landwaartse en zeewaartse verplaatsing wisselen zich af. De geuldiepte blijft gedurende deze periode vrijwel stabiel rond de -12m NAP. Na 2001 verplaatst de geul zeewaarts en neemt dan snel in diepte af. Met name de suppletie uitgevoerd in 2009 heeft een groot effect, omdat deze suppletie het geultje vrijwel geheel opvult. De afgesloten delen van de geul vullen dan snel verder in met sediment. Voor de MKL is vooral de ontwikkeling op het platform gelegen tussen het vloedgeultje en het strand van belang. Tussen 1965-2005 varieerde dit platform in diepte met een gemiddelde ligging rond de -3 / -4 m NAP. Vanaf 2005 neemt de diepte toe en een maximale diepte is zichtbaar in 2019, waarna de diepte weer afneemt. Deze toename van de diepte en de bijbehorende verstelling van het kustprofiel verklaren voor een groot deel de continue afname van de MKL sinds 2005.

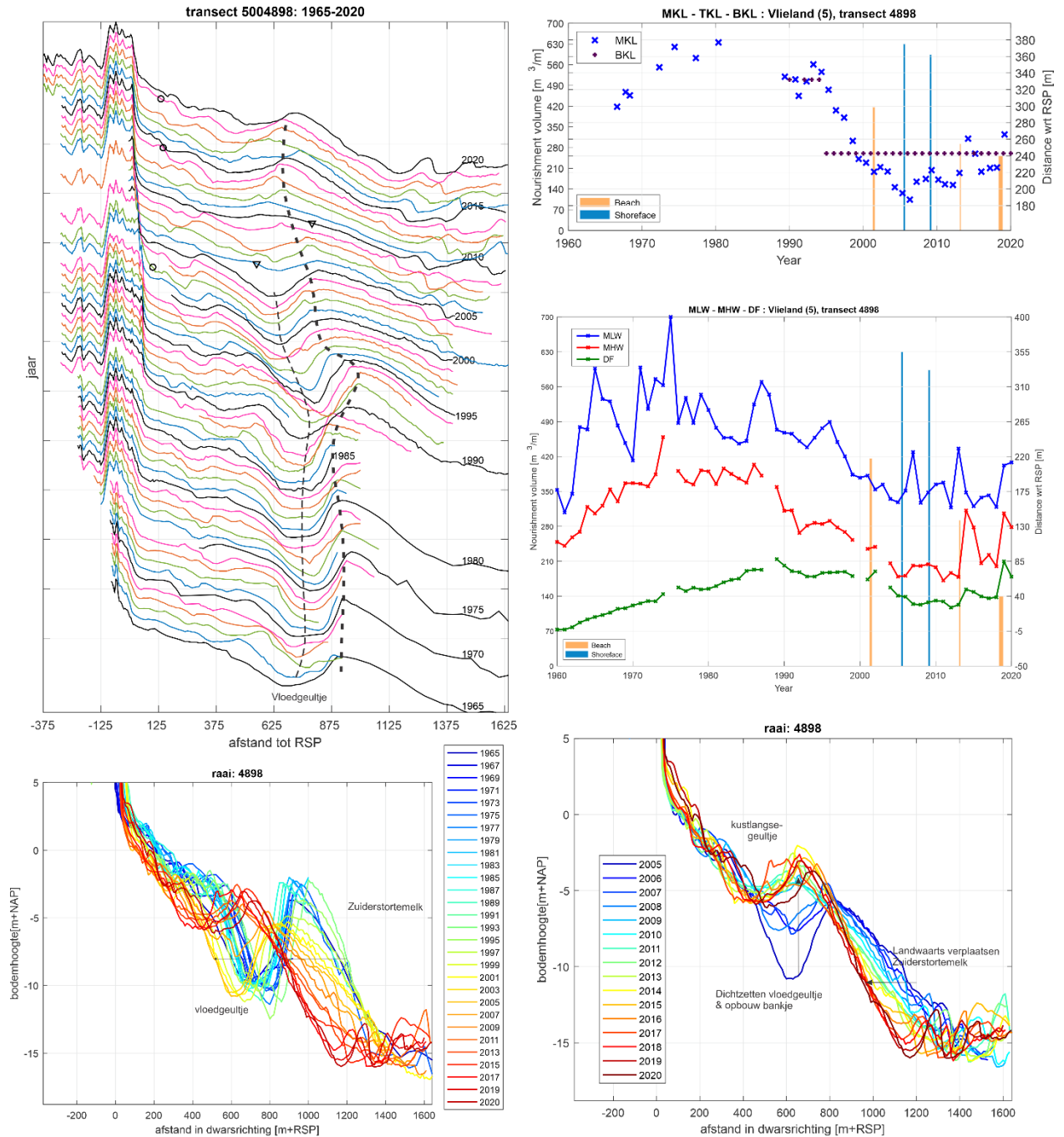
De ontwikkelingen van het vloedgeultje en het aanliggende Zuiderstortemelk zijn ook duidelijk zichtbaar in raai 4898. De ontwikkeling van de dwarsprofielen en timestack geven een goed beeld van het geulontwikkelingen. In totaal zijn er 3 geulen aanwezig in het profiel. Het meest zeewaarts ligt het Zuiderstortemelk. Het Zuiderstortemelk wordt door een bankje gescheiden van het landwaarts gelegen vloedgeultje. Dit vloedgeultje had lange tijd een stabiele ligging (1965-1985). In 1985 volgt dan een zeewaartse verplaatsing en vanaf 1997 een landwaartse verplaatsing. Deze landwaartse verplaatsing stopt met het dichtzetten van de geul in 2005. Een derde, ondiepe, geul vormt direct langs het strand. Dit geultje is in de oudere metingen niet meer dan de trog die zich achter de brekerbank bevindt. Afhankelijk van de ligging en hoogte van de brekerbank is deze trog dan wat meer of minder ontwikkeld. Het geultje ontwikkelt zich vooral na het dichtzetten van het vloedgeultje; zie de dwarsprofielontwikkeling in de periode 2005 en 2020. Aan de landwaartse zijde van het Zuiderstortemelk ontwikkelt zich dan een steeds hogere bank. Tussen de bank en de kust ontstaat zo een geultje met een diepte tot -6m NAP. De recente strandsuppleties (2013 en 2019) zetten dit geultje gedeeltelijk weer/ dicht.

De MKL was hier lange tijd stabiel. Pas vanaf 1994 vond een sterke afname van de MKL volumes plaats. Deze zette zich ondanks een uitgevoerde strandsuppletie in 2001 door tot 2006. Vanaf 2006 lijkt de MKL zich dan te stabiliseren en onder invloed van suppleties weer iets te herstellen. De MKL ligt dan nog wel landwaarts van de BKL. Pas na de meest recente suppletie ligt de MKL weer zeewaarts van de BKL. De strandlijnen voor MLW en MHW vertonen een overeenkomstig verloop. Wat echter wel opvalt is dat teruggang in strandlijnligging veel minder abrupt is en eigenlijk al rond 1975 in gang werd gezet. Na de 2005 suppletie lijken de strandlijnen zich te stabiliseren. Met name de duinvoet en MHW-lijn verplaatsen na 2010 zeewaarts.

Het verloop van de duinvoet is anders dan die van de MKL en strandlijnen. De duinvoet bouwt tussen 1965 en 1990 bijna 130m zeewaarts uit. Deze uitbouw wordt gevolgd door een terugtrekking van zo'n 100m tot 2007. Na een stabilisatie in de periode 2007-2013 ligt de recente duinvoet (2013-2020) dan weer duidelijk verder zeewaarts. De uitgevoerde strandsuppleties spelen hier zeker een rol. Na ieder strandsuppletie vertoont de duinvoet een sprong zeewaarts welke gevolgd wordt door een kleinere terugtrekking.



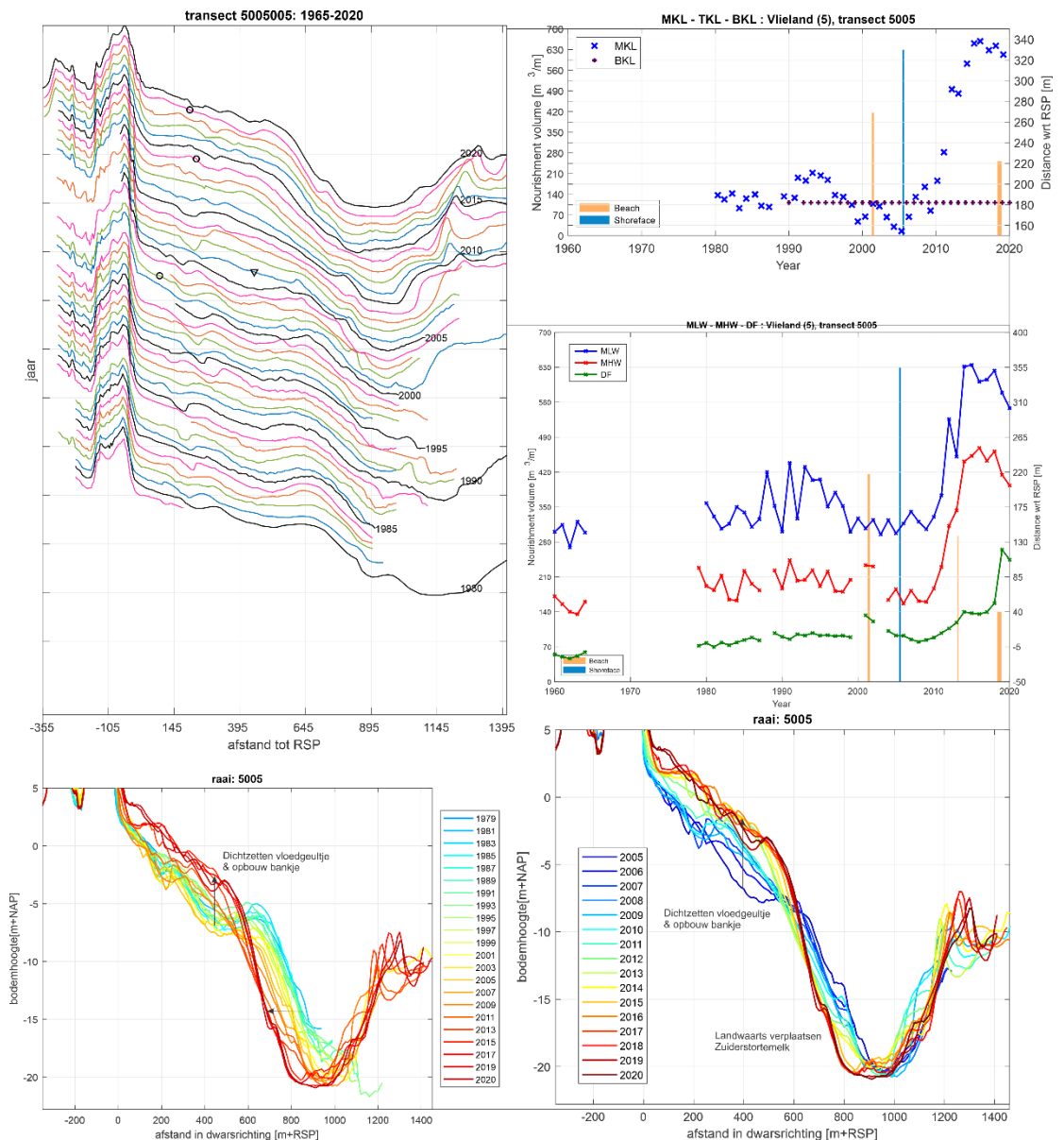
Figuur 4-7: Een overzicht van de ontwikkeling van raai 4808 aan de hand van timestack, MKL, strandlijnen en dwarsprofielen. In de timestack zijn de strand- en vooreversuppleties aangegeven door driehoekjes en cirkels.



Figuur 4-8: Een overzicht van de ontwikkeling van raai 4898 aan de hand van timestack, MKL, strandlijnen en dwarsprofielen. In de timestack zijn de strand- en vooroeversuppleties aangegeven door driehoekjes en cirkels.

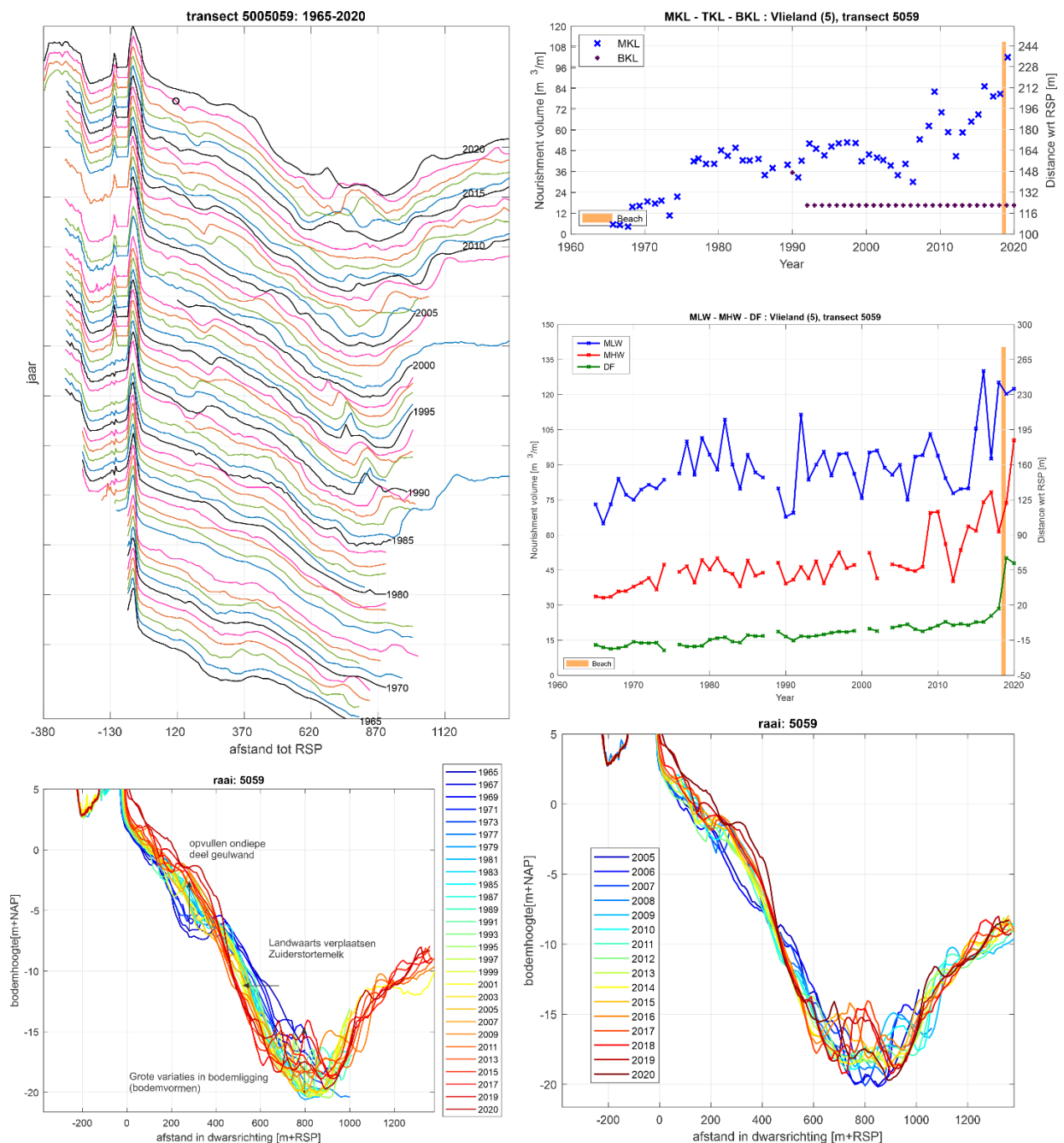
4.3.4 Ontwikkeling van het Zuiderstortemelk (raai 5005 - 5095)

Raai 5005 en 5059 illustreren de kustontwikkeling op de overgang naar het Zuiderstortemelk. In raai 5005 vertoont het Zuiderstortemelk een landwaartse verplaatsing tot 2015 (Figuur 4-9). De geulwand onder -7m NAP verplaatst over de gehele periode landwaarts. Het deel van de kustprofiel boven -7 m NAP neemt sinds 2005 in hoogte toe. Er ontstaat zo een vloeiend verlopende geulwand met een knikpunt rond de -4 m NAP. Het bovenste deel van de geulwand is minder steil dan het diepere deel. Het opbouwen van het ondiepe deel van de geulwand is ook in de MKL en strandlijnontwikkeling te observeren. Tot 1994 lag de MKL rond of zeewaarts van de BKL. In de periode 1994-2000 vindt dan een terugtrekking plaats waardoor de BKL wordt overschreden. De BKL blijft dan tot 2006 landwaarts van de BKL ondanks de uitgevoerde suppleties. Vanaf 2006 neemt de MKL sterk toe tot een maximale positie is bereikt in 2017. Ook in de strandlijnen is een overeenkomstig beeld te zien. Tussen 2008 en 2012 verplaatsen de MLW en MHW sterk zeewaarts. De duinvoet vertoont een doorgaande zeewaartse verplaatsing tot 2019, waarbij de uitgevoerde strandsuppletie verantwoordelijk is voor de grote sprong in ligging in 2019.



Figuur 4-9: Een overzicht van de ontwikkeling van raai 5005 aan de hand van timestack, MKL, strandlijnen en dwarsprofielen. In de timestack zijn de strand- en vooroeversuppleties aangegeven door driehoekjes en cirkels.

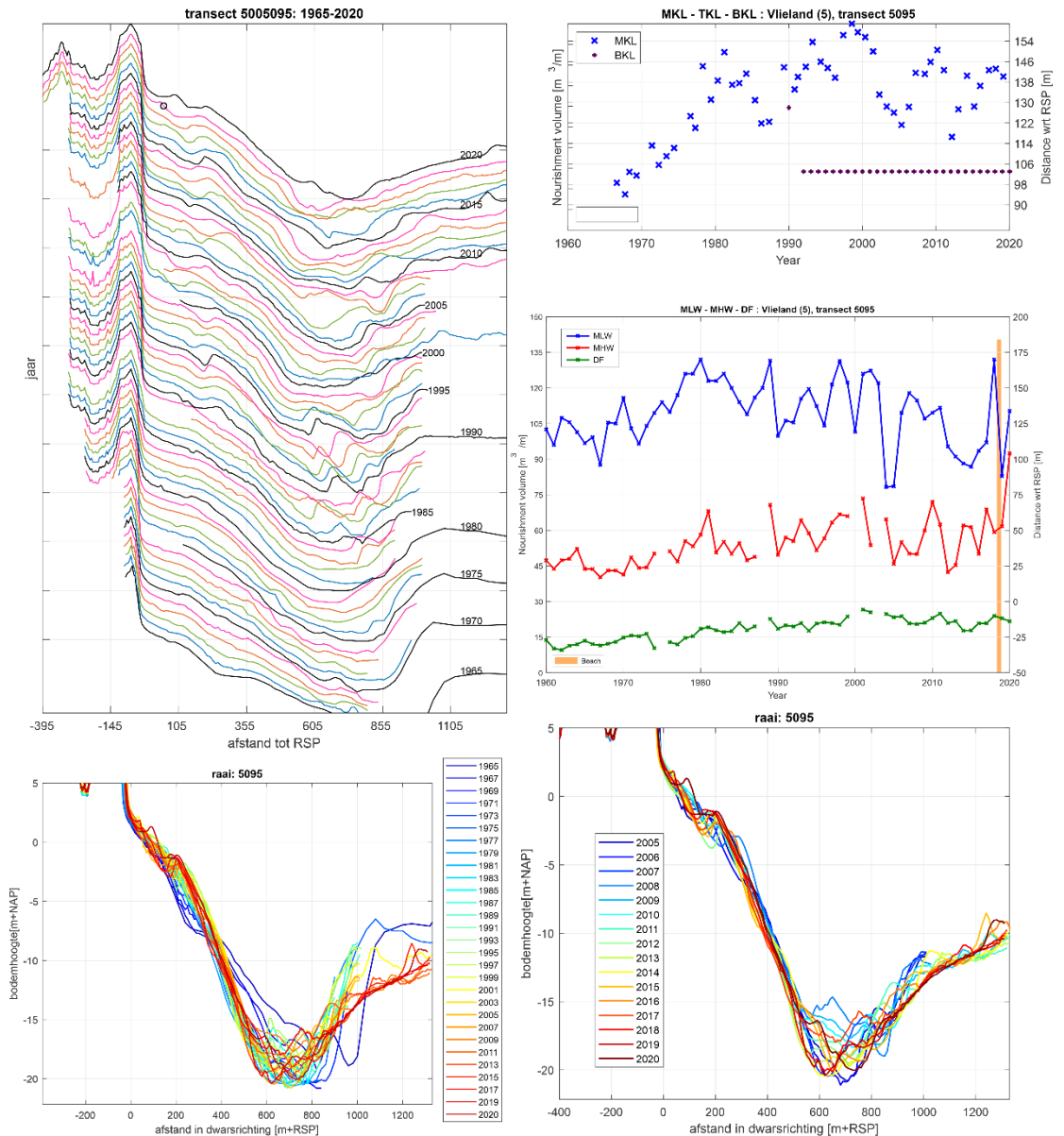
De morfologische ontwikkelingen in raai 5059 (Figuur 4-10) komen overeen met raai 5005. Het diepere deel van het Zuiderstortemelk verplaatst tot 2010 nog landwaarts, maar blijft sindsdien stabiel liggen. Op de geulbodem vallen de grote verticale variaties op die gerelateerd zijn aan migrerende bodemvormen. Het ondiepe deel van het geulprofiel (boven de -8 m NAP) neemt in hoogte toe. Vooral na 2006 en 2019 is er een sprong in hoogte waar te nemen. In tegenstelling tot de meer westelijk gelegen profielen is ligt de MKL hier in de periode 1980-2005 stabiel en zeewaarts van de BKL. Een minimum ligging wordt bereikt in 2006, sinds 2006 neemt de MKL dan sterk toe. Wel vindt er tussen 2010 en 2013 een tijdelijke terugtrekking plaats. Deze dip in MKL-ligging treedt ook in de MLW en MHW lijnen op. De duinvoet vertoont over de gehele periode een zeewaartse verplaatsing, met een grote sprong na de strandsuppletie van 2019.



Figuur 4-10: Een overzicht van de ontwikkeling van raai 5059 aan de hand van timestack, MKL, strandlijnen en dwarsprofielen. In de timestack zijn de strand- en vooroeversuppleties aangegeven door driehoekjes en cirkels.

In raai 5095 gaat het strand gelijk over in het Zuiderstortemelk. De geul heeft hier een maximale diepte van -20m NAP maar vertoont ook hier grote fluctuaties in diepte (tussen -16 en -20m NAP). De dwarsprofiel ontwikkeling laat zien dat de geulwand sinds 1965 steiler is geworden door landwaartse verplaatsing van het diepe deel en zeewaartse verplaatsing van het ondiepere deel (boven de -8 m NAP).

De MKL neemt initieel, tot 1980 sterk toe. Sinds 1980 wisselen perioden van groei en terugtrekking elkaar af. Ook in dit profiel verplaatst de duinvoet zich langzaam zeewaarts. De GLW lijn vertoont grotere variaties. Sinds 1980 trekt de GLW lijn zich gemiddeld terug.



Figuur 4-11: Een overzicht van de ontwikkeling van raai 5095 aan de hand van timestack, MKL, strandlijnen en dwarsprofielen. In de timestack zijn de strand- en vooroeversuppleties aangegeven door driehoekjes en cirkels.

4.4 Duin en droge strandontwikkeling in detail

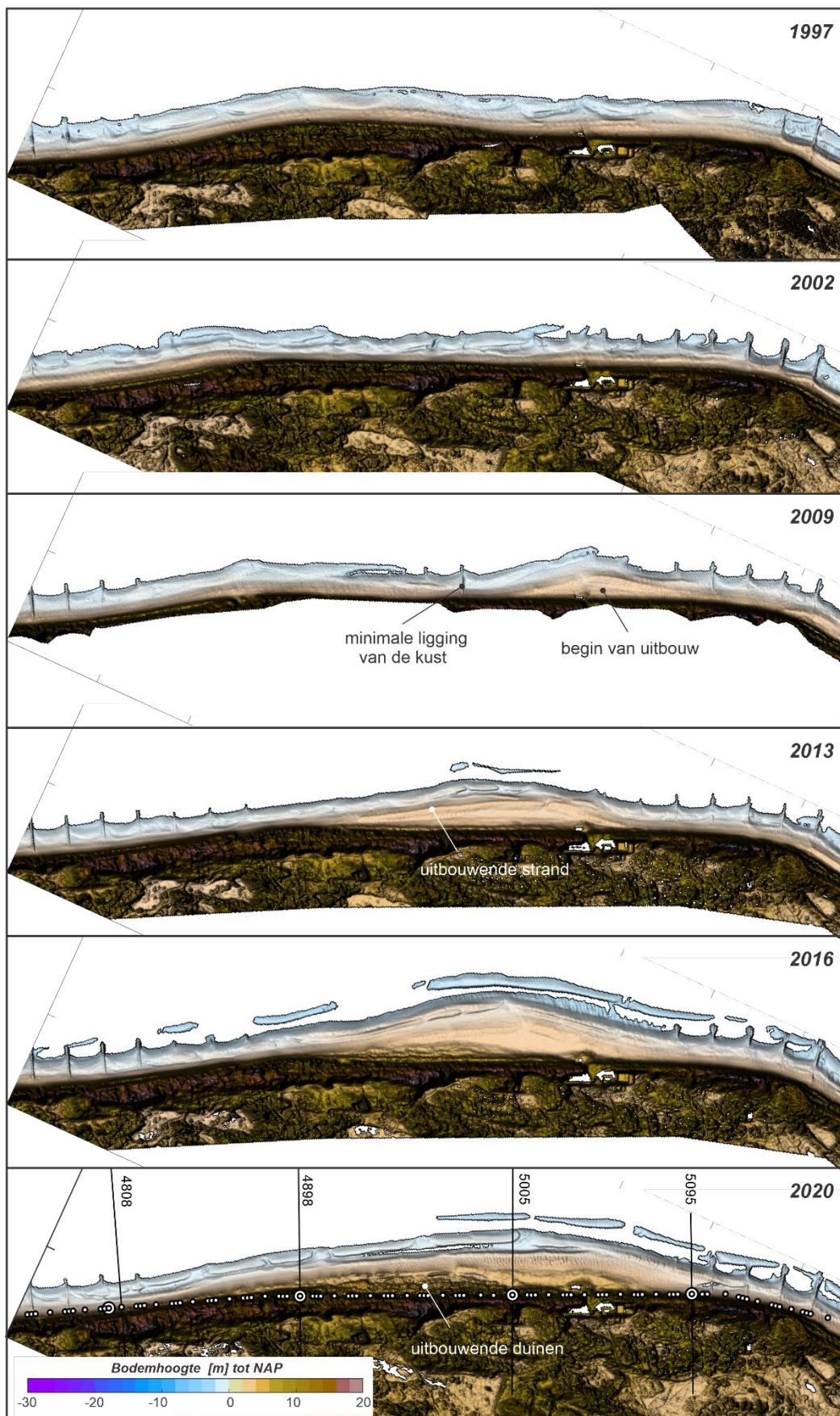
Een gedetailleerd beeld van de recente ontwikkeling van de kustlijn kan worden verkregen met behulp van de Kusthoogte (LiDAR) datasets. Als onderdeel van de Jarkus metingen, worden de hoogtewaarnemingen van het strand en de duinen sinds 1996 opgenomen met een laserscanner (LIDAR) aan boord van een vliegtuig. Na bewerking van de resultaten wordt een Digitaal Terrein Model (DTM) verkregen. De DTM wordt verwerkt in de Jarkus metingen, maar wordt ook in 5 m rasterresolutie gearchiveerd. Deze 5 m resolutie maakt het mogelijk een gedetailleerde weergave van het droogvallende strand en de duinen te maken.

De LiDAR metingen geven een goed beeld van de variabiliteit in kustlijnligging tussen raai 4808 en 5095 (Figuur 4-12 en Appendix C).

In 1997 vormen het strand en de duinenrij een vloeiende kustlijn. De duinen zijn tussen raai 4808 en 5005 wat verder zeewaarts uitgebouwd (Figuur 4-12). Een maximale uitbouw is zichtbaar ter hoogte van raai 4898. Bij raai 4898 en raai 5146 zit er een maximale zeewaartse ligging in de duinenrij. Het strand ligt tot 2009 evenwijdig aan de duinenrij. De knikpunten zijn dan ook in beide zichtbaar. In de volgende jaren vertoont de kust dan weinig veranderingen. Door aanleg van een strandsuppletie is er in de 2001 opname een grote verstoring te zien tussen raaien 4880 en 5005 (Appendix C). In de 2002 bodem is deze verstoring al geheel opgenomen in het kustprofiel en niet meer zichtbaar (Figuur 4-12). Het strand waar eerder de suppletie lag heeft in deze opname al weer een minimale breedte. Deze minimale strandligging blijft dan ook in de volgende jaren zichtbaar. Wel beginnen er lokaal kleine uitbouwingen van de kust zichtbaar te worden. In de 2009 bodem is zo'n uitbouw zichtbaar bij raai 5059. Net ten westen van deze uitbouw is het strand dan vrijwel geheel verdwenen en is het gehele strandhoofd zichtbaar (ter hoogte van raai 4952).

Na de 2009 vooroeversuppletie beginnen er grote veranderingen op te treden in de vooroever (zie voorgaande hoofdstukken). Waarschijnlijk is dit het gevolg van het ontstaan van het kustlangse geultje. Vanaf 2010 begint het strand begint uit te bouwen, en in de opname van 2013 is dit terug te zien (Figuur 4-12). Vanaf het knikpunt bij raai 4898 ontstaat een doorgaand strand met een maximale uitbouw bij raai 5059. De strandvlakte is maximaal uitgebouwd in 2016. In deze opname is ook zichtbaar dat er nieuwe duinen gevormd worden vóór de oorspronkelijke duinenrij. Deze opbouw van duinen zet zich ook door in de volgende jaren. De strandvlakte neemt tussen 2016 en 2020 snel in oppervlakte af. De hoogte van het strand net voor de duinen is in 2019 hoger (Appendix C). Dit is waarschijnlijk een effect van de uitgevoerde strandsuppletie. De meest recente opname van 2020 vertoont weer een doorgaand kustlijn.

Een duidelijk verschil tussen de 1997 en 2020 bodem is dat de duinenrij in het gebied tussen raai 4898 en 5005 zeewaarts is verplaatst. De kustzone bevat hier een groter volume zand, maar omdat dit in de uitbouw van de duinenrij zit, komt dit waarschijnlijk niet tot uitdrukking in de MKL positie.



Figuur 4-12: Een overzicht van de LiDAR metingen voor de metingen uit 1997, 2002, 2009, 2013, 2016 en 2020. Zie Appendix C voor een volledige weergave van de tijdserie van metingen.

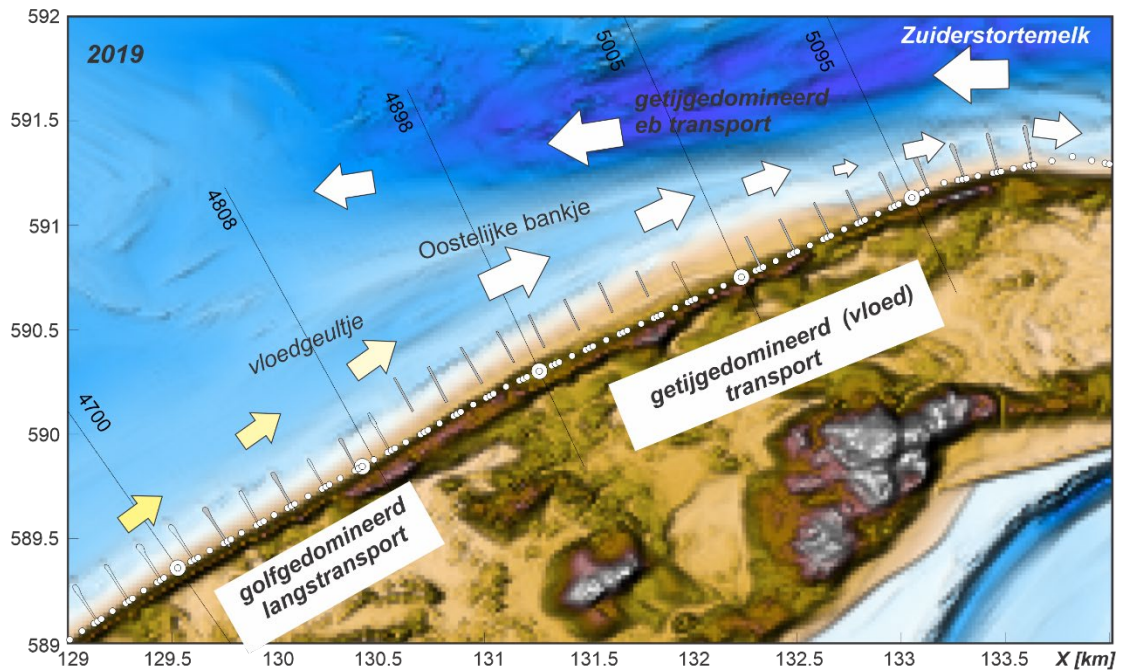
5 Synthese

In het verleden was het gehele eiland Vlieland aan sterke kusterosie onderhevig. Door de aanleg van strandhoofden is deze erosie sterk afgenomen. De centrale eilandkust blijft vrijwel stabiel in positie liggen. Langdurige periodes van een kleine uitbouw en terugtrekking wisselen elkaar af. Deze fluctuaties lijken gerelateerd te zijn aan aanlanding van banken vanuit de buitendelta van het Eierlandse Gat. Het aangelande zand propageert dan als een zandgolf langs de kust.

De noordoostzijde van het eiland vertoont structurele erosie. Hier ligt het Zuiderstortemelk direct langs de kust. Het Zuiderstortemelk is sinds afsluiting van de Zuiderzee naar het eiland gemigreerd, waardoor de diepe geul nu direct langs het strand ligt. Oostelijk van raai 5095 domineren de stromingen en transporten van het Zuiderstortemelk de kustlijnontwikkeling (Figuur 5-1). Hier zijn ook aanvullende verdedigingswerken aangelegd om deze erosie te ondervangen.

Het stukje kust tussen de raaien 4700 en 5095 vormt een overgangszone van de centrale eilandkust naar het geulgedomineerde zeegat (Figuur 5-1). Langs dit stukje kust treedt over het algemeen kusterosie op en zijn er suppleties nodig om deze te ondervangen. De kusterosie is gerelateerd aan de vloedstroming die tussen de ebstream in het Zuiderstortemelk en de kust wordt geperst. 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. De erosie wordt sinds 1997 bestreden met zandsuppleties. Het grootschalige beeld verandert niet, maar op een kleinere schaal is er wel een duidelijk verschil in bodemligging voor en na 2009. Vóór 2009 lag het Zuiderstortemelk iets meer zeewaarts. Landwaarts hiervan was nog een vloedgeultje aanwezig. Erosie van de kustlijn hangt dan samen met dit vloedgeultje. Het vloedgeultje is 2009 dichtgezet door een vooroeversuppletie. Met het dichtzetten van dit geultje begint zich de huidige kustlijn en vooroever te vormen. Belangrijk hierbij is de vorming van een kustparallel geultje tussen het Zuiderstortemelk en de kust in, ter hoogte van de trog van het brekerbanksysteem. Met het dichtzetten van het vloedgeultje is de vloedstroming niet verdwenen. Deze stroming moet een nieuwe toegang tot het Zuiderstortemelk vinden. Tussen de brekerbank en de kust is ruimte ontstaan, wat een nieuwe geulvorming mogelijk maakt. Vanuit dit oogpunt is ook de vooroeversuppletie uitgevoerd in 2005 van belang. Deze vooroeversuppletie zorgde ervoor dat de brekerbank zich zeewaarts verplaatste. Zo ontstond er een bredere trog tussen de brekerbank en de kust, welke open lag voor de vloedstroming, waardoor zich eenvoudig een nieuwe kustlangse geul kon vormen tussen het Zuiderstortemelk en de kust in. Ook deze geul veroorzaakt erosie van de naastliggende kustlijn.

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 5-1). 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.



Figuur 5-1: Een samenvatting van de processen langs de Noordwest kust van Schiermonnikoog.

Op basis van de uitgevoerde analyses kunnen een aantal belangrijke lessen worden getrokken met betrekking tot de uitgevoerde suppleties. De 2009 suppletie heeft succesvol het vloedgeultje dichtgezet. Deze suppletie heeft echter niet geresulteerd in het oplossen van de erosieproblematiek. Een nieuw (vloed)geultje is gevormd direct langs de kust, waardoor kusterosie nog steeds optreedt. De locaties zijn enigszins verschoven, maar de problematiek blijft bestaan.

De 2018 strandsuppletie is snel geërodeerd. Een belangrijke reden hiervoor is dat deze suppletie het doorstroomoppervlakte van het geultje verder verkleinde. Deze verkleining was niet genoeg om het geultje dicht te zetten, maar waarschijnlijk wel genoeg om de stroomsnelheden te laten toenemen. De suppletie verdwijnt snel door de toename in stroomsnelheden. In de toekomst een soortgelijke suppletie aanbrengen zal waarschijnlijk een soortgelijk gedrag opleveren.

Op deze locatie is het te overwegen een systeemsuppletie uit te voeren. Systeemsuppleties zijn zandsuppleties waarbij invloed wordt uitgeoefend op de natuurlijke hydraulische en morfologische processen om het systeemgedrag verandert. Doel is de kustlijn duurzamer, met meer gebruik van de natuurlijke processen, te handhaven. In Appendix C is een systeemsuppletie variant uitgewerkt die er op gericht is de vloedstroming door het geultje te reduceren.

6 Beantwoording onderzoeksvragen en vooruitzichten

Deze rapportage beoogt een gefundeerde analyse te geven van oorzaken van de morfologische veranderingen van het strand en de aangrenzende vooroever van Noordoost Vlieland (raaien 4700-5095). Hiervoor worden de onderstaande onderzoeksvragen beantwoordt:

1. Wat zijn de maatgevende processen die in dit kustvak spelen?
2. Hebben de eerder uitgevoerde suppleties een invloed op dit gedrag?
3. Wat is de verwachting voor de kustlijnontwikkeling en welke morfologische ontwikkelingen van de buitendelta zijn te verwachten die de toekomstige kustlijnontwikkeling mogelijk beïnvloeden?
4. Welke suppleties zijn er mogelijk om de kustlijn te handhaven?

1. Wat is het gedrag van de kustlijn tussen raai 4700 en 5095?

De kustlijn van Noordoost Vlieland tussen raaien 4700 en 5095 vertoont een tweedeling in gedrag. Het deel tussen raai 4700 en 4988 trekt terug. De terugtrekking tussen raaien 4700 en 4988 is gerelateerd aan de vorming van een kustlangs geultje. Dit geultje zorgt ervoor dat de vooroever dieper wordt. De MKL neemt hierdoor af. De duinenrij vertoont een tegenovergestelde trend. De duinen vertonen juist een zeewaarts uitbouw tussen raai 4898 en raai 5005. Tussen raaien 5005 en 5095 vindt uitbouw plaats door de vorming van een bank op de vooroever.

2. Hebben de eerder uitgevoerde suppleties een invloed op dit gedrag?

De suppleties hebben geen invloed op de processen die in en rond het zeegat spelen. Het verplaatsen van het Zuiderstortemelk en de veranderingen op de Gronden van het Zuiderstortemelk worden niet beïnvloedt door de suppleties. Het lokale kustgedrag en de huidige erosieproblematiek is echter sterk beïnvloedt door de uitgevoerde suppleties. De 2009 vooroeversuppletie heeft het dan aanwezige vloedgeultje dichtgezet. Dit heeft geresulteerd in de vorming van een nieuw kustlangs (vloed)geultje. Dit geultje dicteert de huidige kustlijninterugtrekking. Ook de 2005 vooroeversuppletie heeft waarschijnlijk een bijdrage geleverd aan de vorming van dit geultje. Deze suppletie heeft ervoor gezorgd dat de brekerbank zeewaarts is verplaatst waardoor er ruimte ontstaat om een vloedgeultje te vormen.

De in 2017 uitgevoerde geulwandsuppletie heeft geen aantoonbaar effect gehad op de kustlijnontwikkelingen in het interessegebied.

De 2013 en 2018 strandsuppleties hebben de processen niet wezenlijk beïnvloed. Deze suppleties hebben het kustlangse geultje niet dichtgezet. Door verkleining van het doorstroomoppervlakte is het waarschijnlijk dat de stromingen na suppletie toegenomen zijn. Hierdoor worden de suppleties snel opgeruimd.

3. Wat is de verwachting voor de kustlijnontwikkeling en welke morfologische ontwikkelingen van de buitendelta zijn te verwachten die de toekomstige kustlijnontwikkeling mogelijk beïnvloeden?

Op korte termijn (5 jaar) zullen de huidige processen zich doorzetten. Het Zuiderstortemelk vertoont wel een grote verandering in de uitstroming, maar het diepe, deel van deze geul dat aan de kust van Vlieland grenst, verandert weinig. De geul migreert wel iets dichter naar de

kust, waardoor lokaal de erosie kan toenemen. Tussen de kust en de geul vormt een langzaam een bankje. Zonder ingrijpen zal dit proces zich doorzetten. Hoe dit bankje en de uitstroming van het Zuiderstortemelk zich op langere termijn ontwikkelen is niet direct te voorspellen, hiervoor is frequente monitoring van belang. Afhankelijk van de exacte ligging van het bankje en de geulen kunnen de locaties van kusterosie en -uitbouw zich iets langs de kust verplaatsen.

4. Welke suppleties zijn er mogelijk om de BKL te handhaven?

Het uitvoeren van klassieke strandsuppleties in het kustlangse geultje lijkt hier niet de juiste strategie van suppleren te zijn. Deze suppleties worden snel kustlangs afgevoerd. Vooroever-suppleties zijn wel mogelijk ten westen van raai 4700, maar niet ten oosten ervan. Voor de geobserveerde kusterosie tussen raai 4700 en 4988 hebben deze waarschijnlijk een beperkt en mogelijk een negatief effect. De in 2005 uitgevoerde suppletie lijkt juist geulvorming te hebben bevorderd doordat de brekerbank zeewaarts verplaatst werd.

Een mogelijke suppletievariant zou het opvullen van het geultje zijn. Door dit opvullen wordt de vloedstroming zeewaarts geleid zodat deze rechtstreeks via het Zuiderstortemelk naar het zeegat loopt en minder langs de kust. In Appendix C is zo'n suppletie verder uitgewerkt.

Aanbevelingen

Deze studie wijst uit dat de suppleties het lokale kustgedrag van Noordoost Vlieland sterk beïnvloeden. De 2009 vooroever-suppletie toont aan dat het mogelijk is lokaal geulgedrag te beïnvloeden, zonder dat dit grootschalig grote effecten heeft. Deze suppletie heeft uit het oogpunt van kustlijnhandhaving echter niet het gewenste resultaat opgeleverd. Een systeem-suppletie gericht op het dichtzetten van het huidige kustlangse vloedgeultje kan mogelijk de kusterosie hier opheffen. De doelstelling is hier de vloedstroming van de kust af te leiden via de al aanwezig zeewaarts gelegen uitstroming van het Zuiderstortemelk. Met behulp van modellering kan de invloed van zo'n suppletie op de stromingen nauwkeurig in kaart worden gebracht.

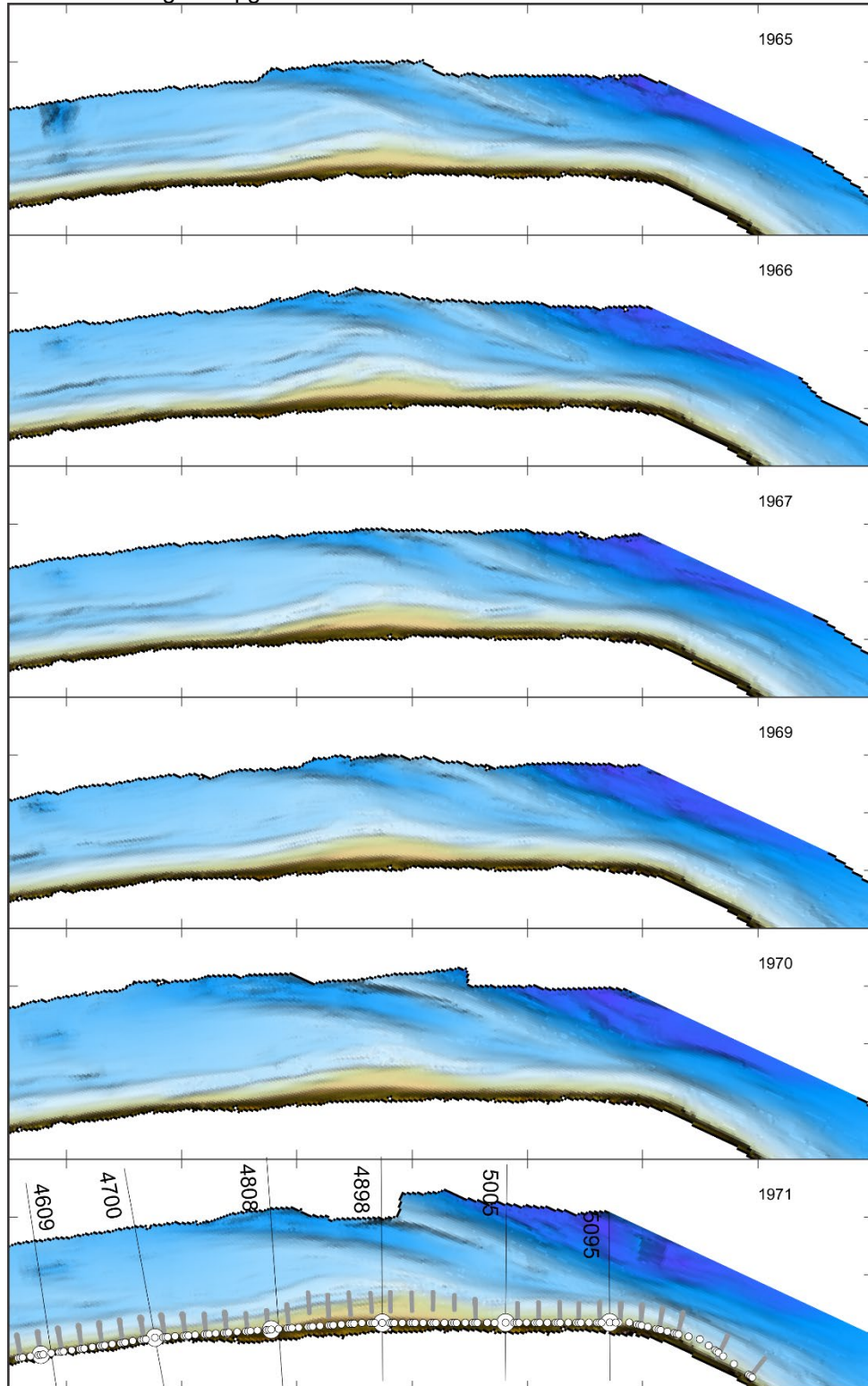
Naast de modellering van een toekomstige suppletie, is het ook belangrijk de veranderingen in stromingen door het aanbrengen van de 2005 en 2009 suppleties te modeleren. Deze modelsimulaties geven inzicht in hoe stromingen en transporten worden beïnvloedt als een geul geheel dichtgezet wordt. Dit inzicht is essentieel voor een gedegen ontwerp van een toekomstige systeem-suppletie.

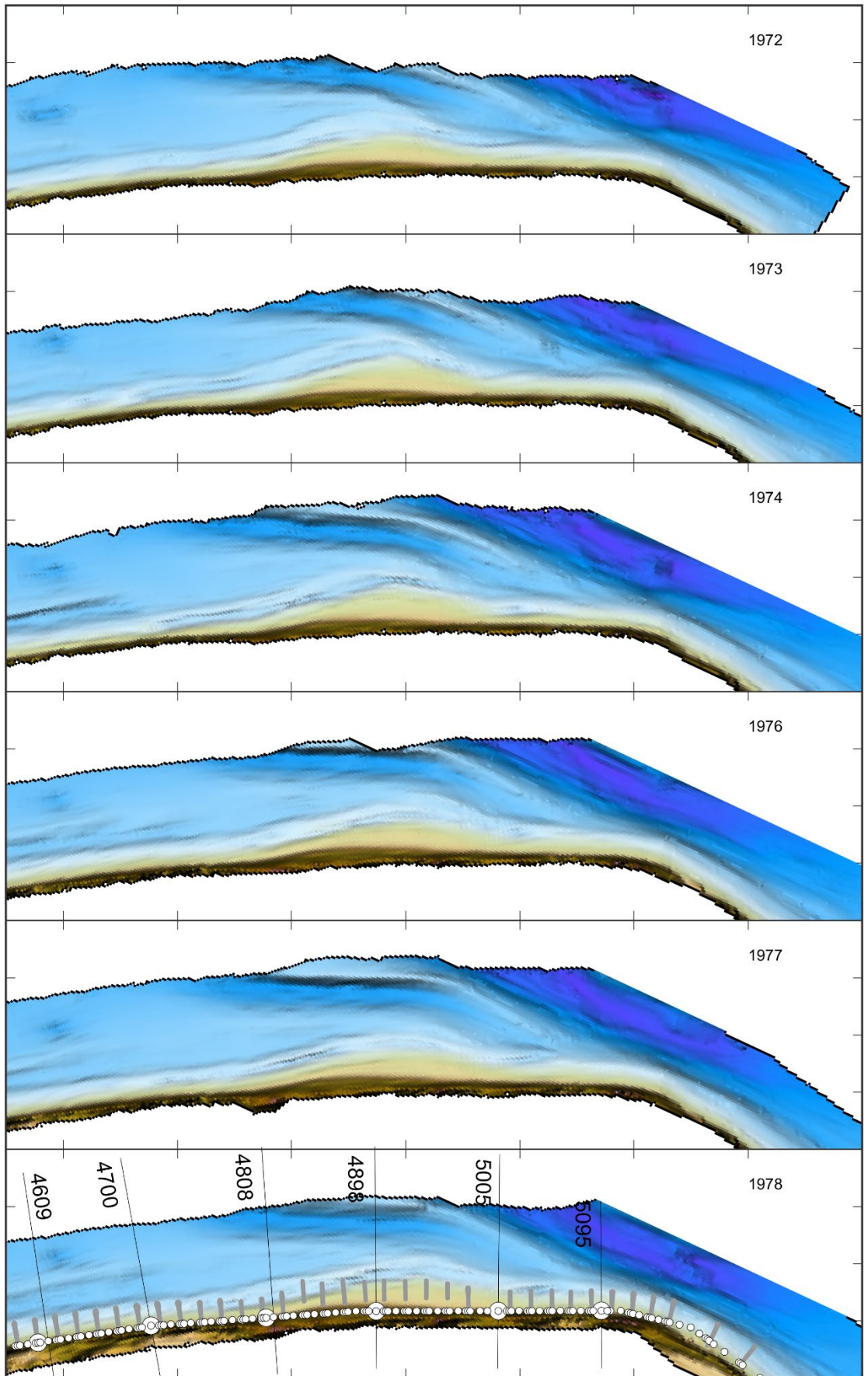
Literatuur

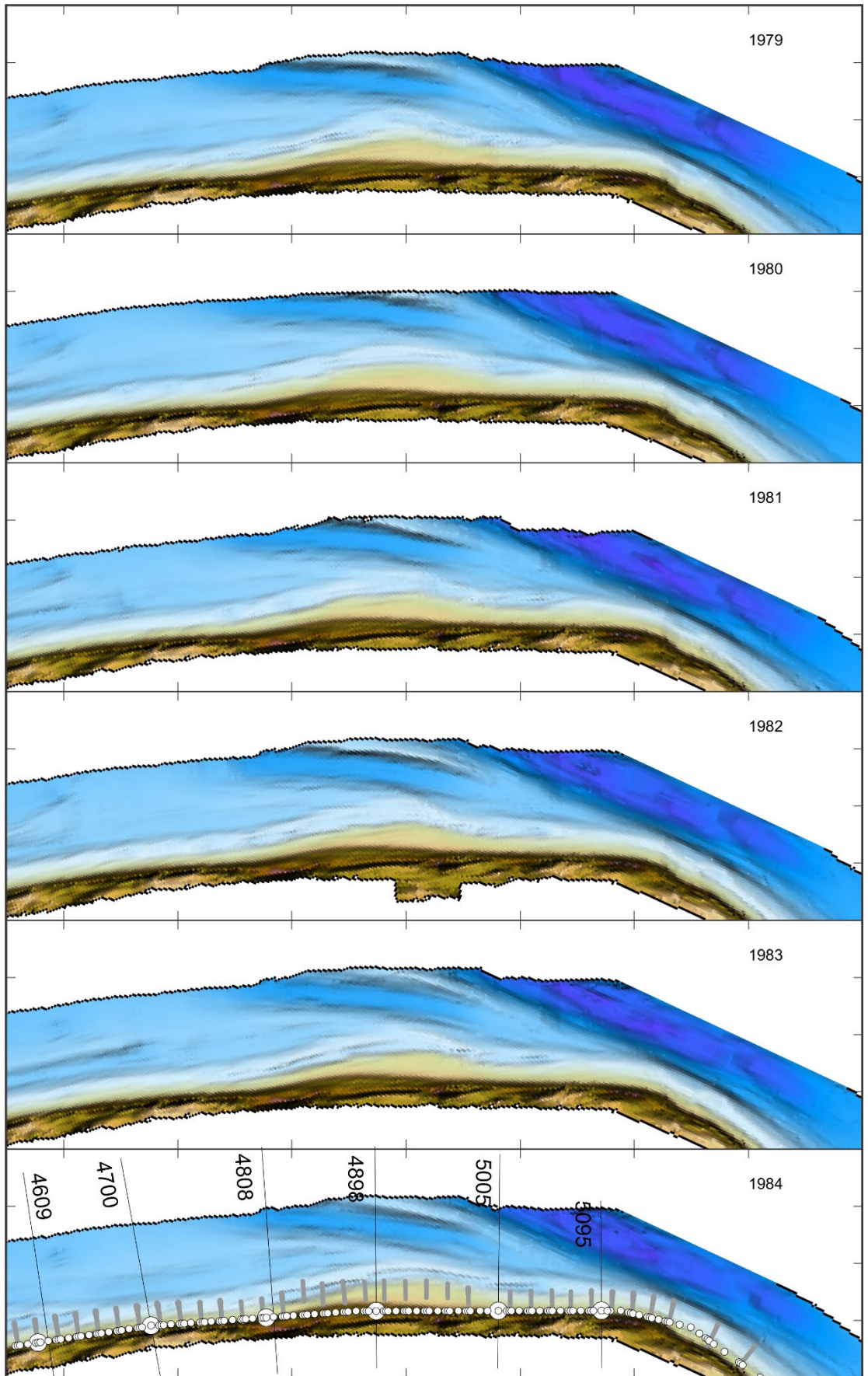
- Bakker, W.T. (1968). A mathematical Theory about sand waves and its application on the Dutch Wadden Isle of Vlieland. Shore and Beach, october 1968.
- Elias E.P.L. (2021). Morfologie van het Zeegat van het Vlie. Een overzicht van de morfologische ontwikkelingen over de periode 1831-2020. Concept rapportage, Deltares, Delft.
- Van Heuvel, Tj. (1999). Evaluatie van zeewaartse kustverdediging. Rapport RIKZ-99.009. Rijkswaterstaat RIKZ.
- Rakhorst, H.D., (1984), Werking strandhoofden Noord-Holland, Texel, Vlieland, Rijkswaterstaat, adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-84.H007, 15 pag., 16 bijlagen.
- Rijkswaterstaat (2020). Kustlijnkaarten 2021. Rijkswaterstaat, Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, 131 pp.
- Steyaert, F.H.I.M., Prakken, A., Nicolai, A. (1999) Kustverdediging Vlieland Noordoost. Nota ANZ 94.07, Rijksinstituut voor Kust en Zee & Directie Noord-Nederland.
- Teerenstra, G.L., (1999). Evaluatie zeewaartse projecten Vlieland & Ameland. Rapport Rijkswaterstaat Directie Noord-Nederland Afdeling ANZ, Leeuwarden.
- Verhagen, H. J. en van Rossum, H. (1990). Strandhoofden en paalrijen: evaluatie van hun werking. Min V&W, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Walhout, T (1998). Het kustgedrag van Vlieland van 1688- 1992 en de rol van de strandhoofden daarin. Werkdocument RIKZ RIKZ/AB-98.80.Kustlijnkaarten

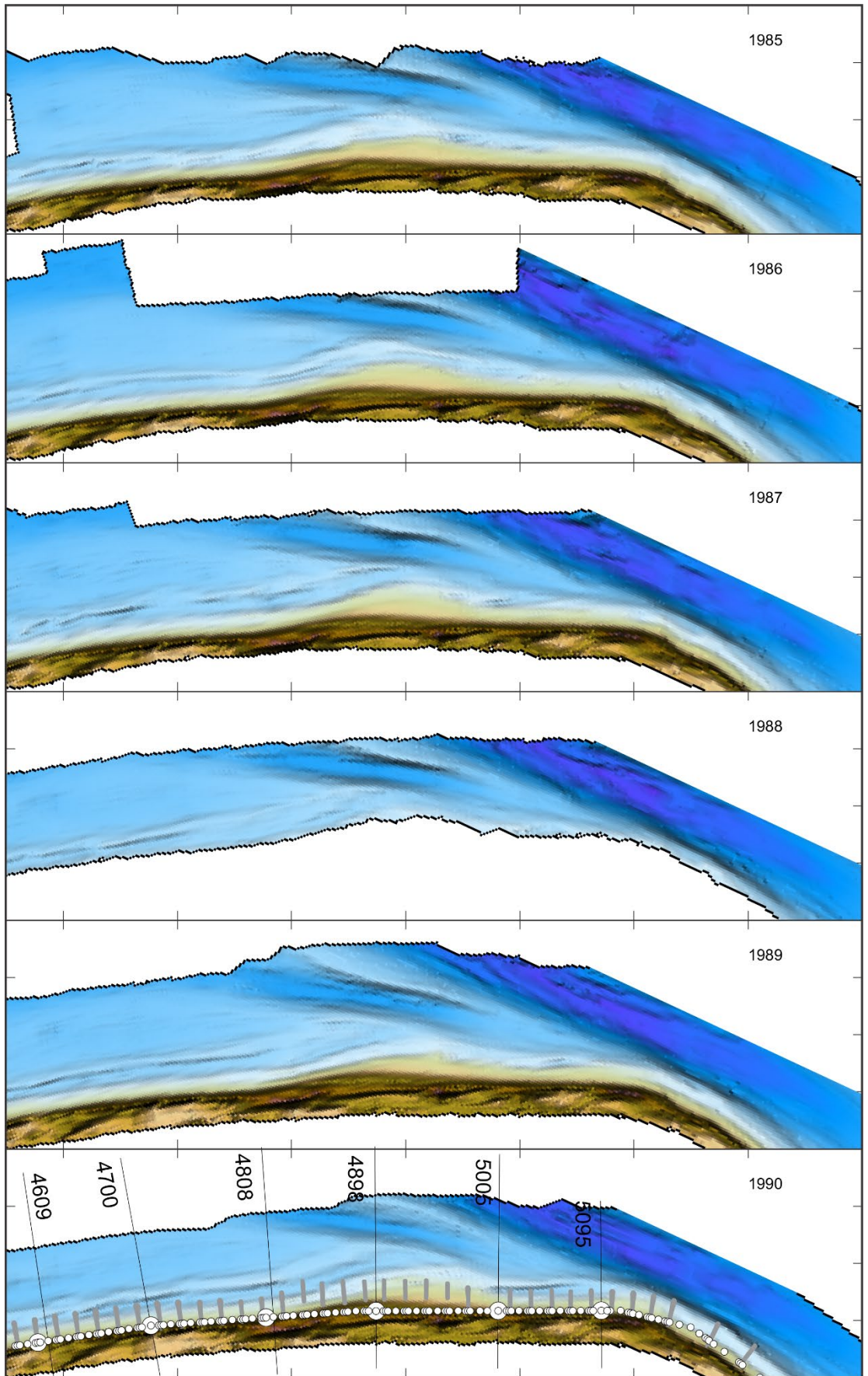
A Jarkus data

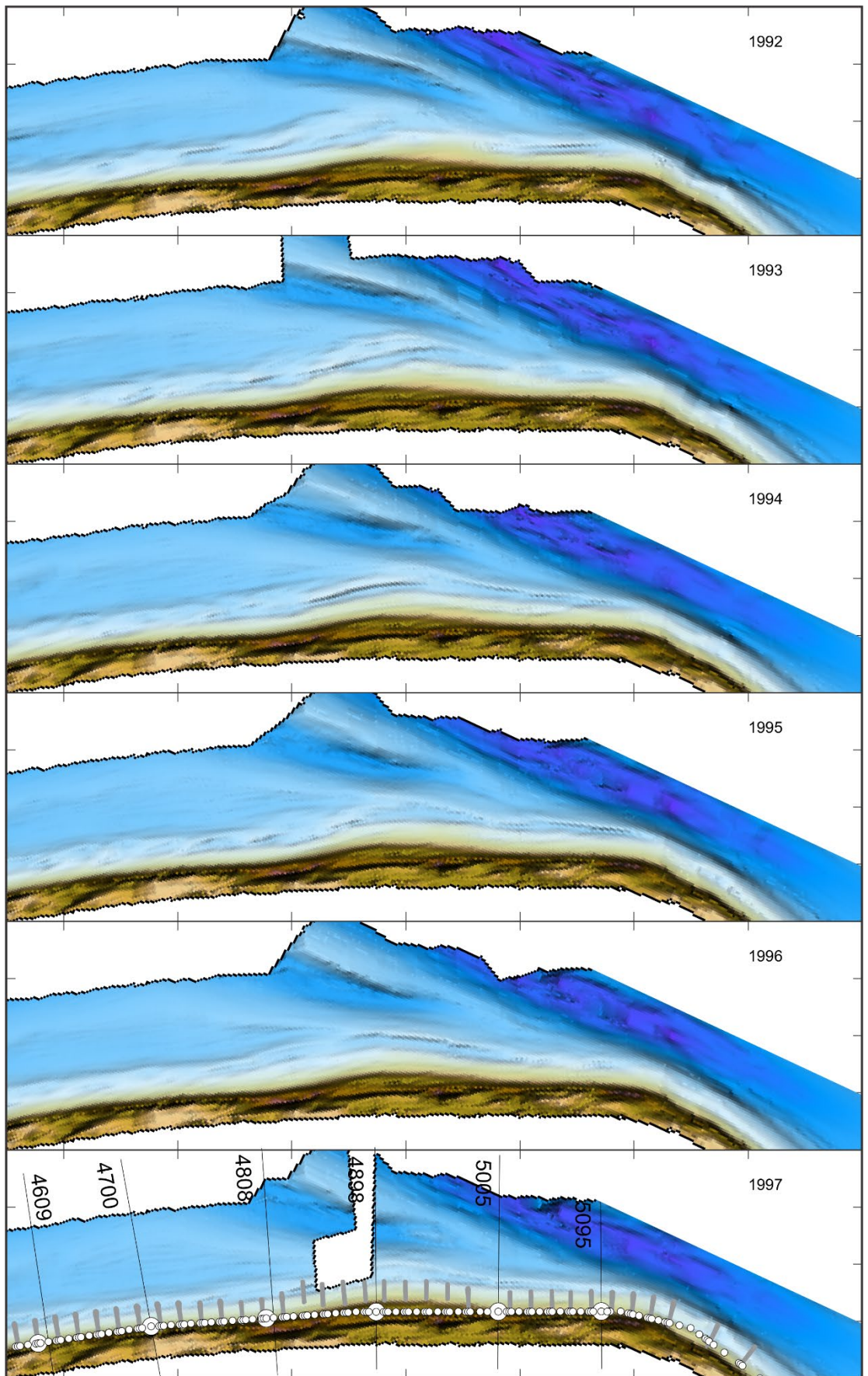
In onderstaande serie figuren wordt de ontwikkeling van kustlijn weergegeven aan de hand van de Jarkus grids opgenomen tussen 1965-2020.

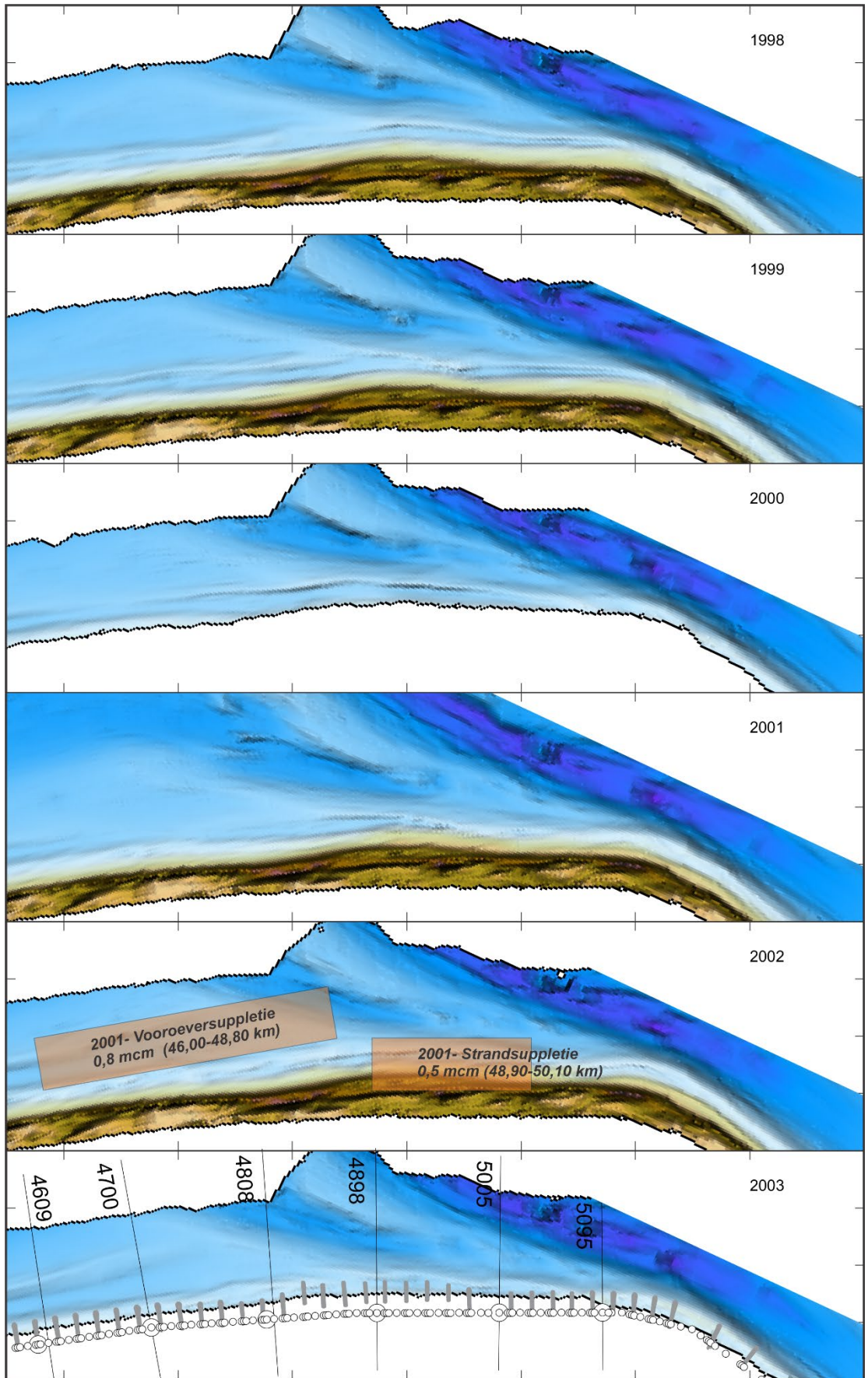


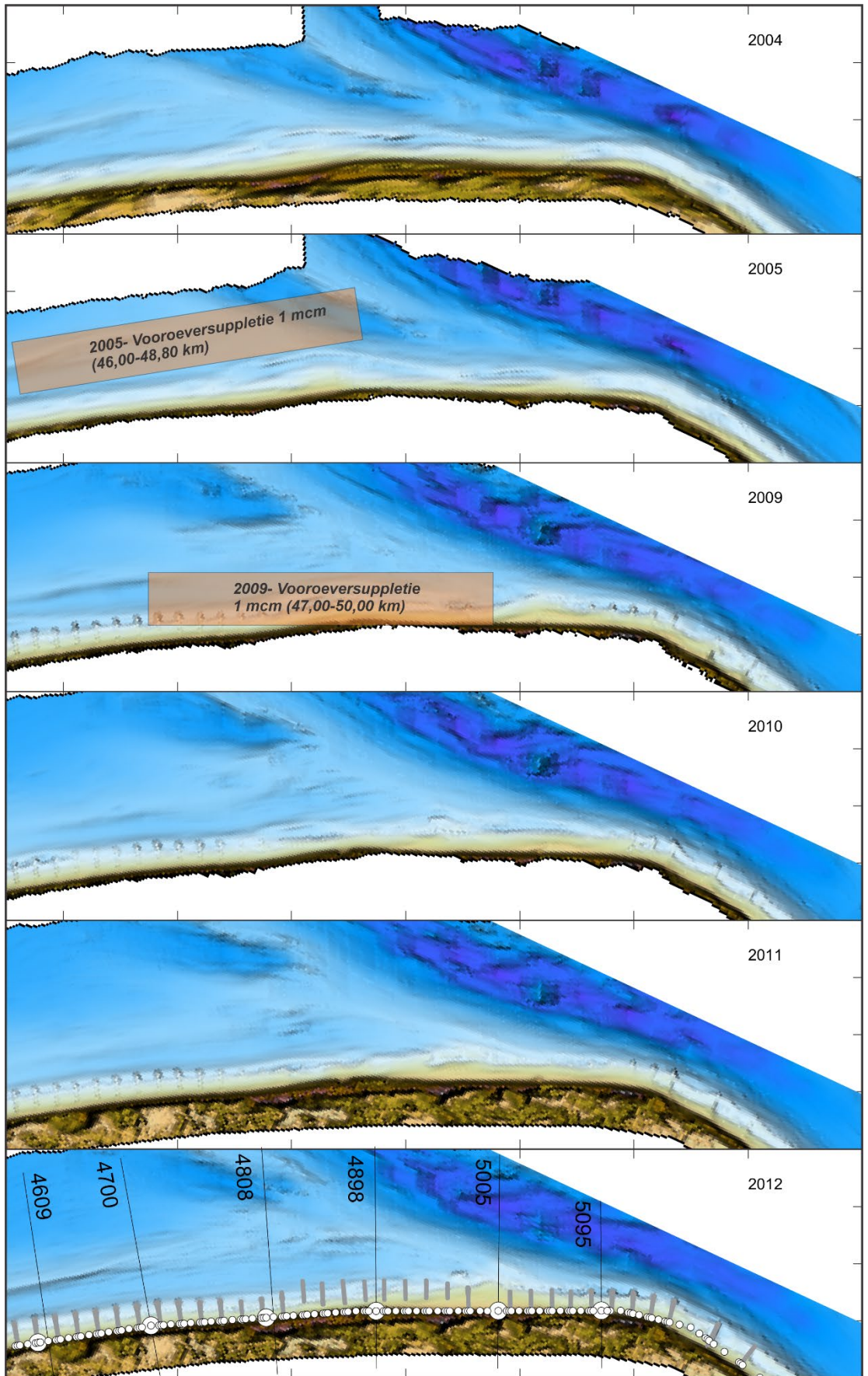


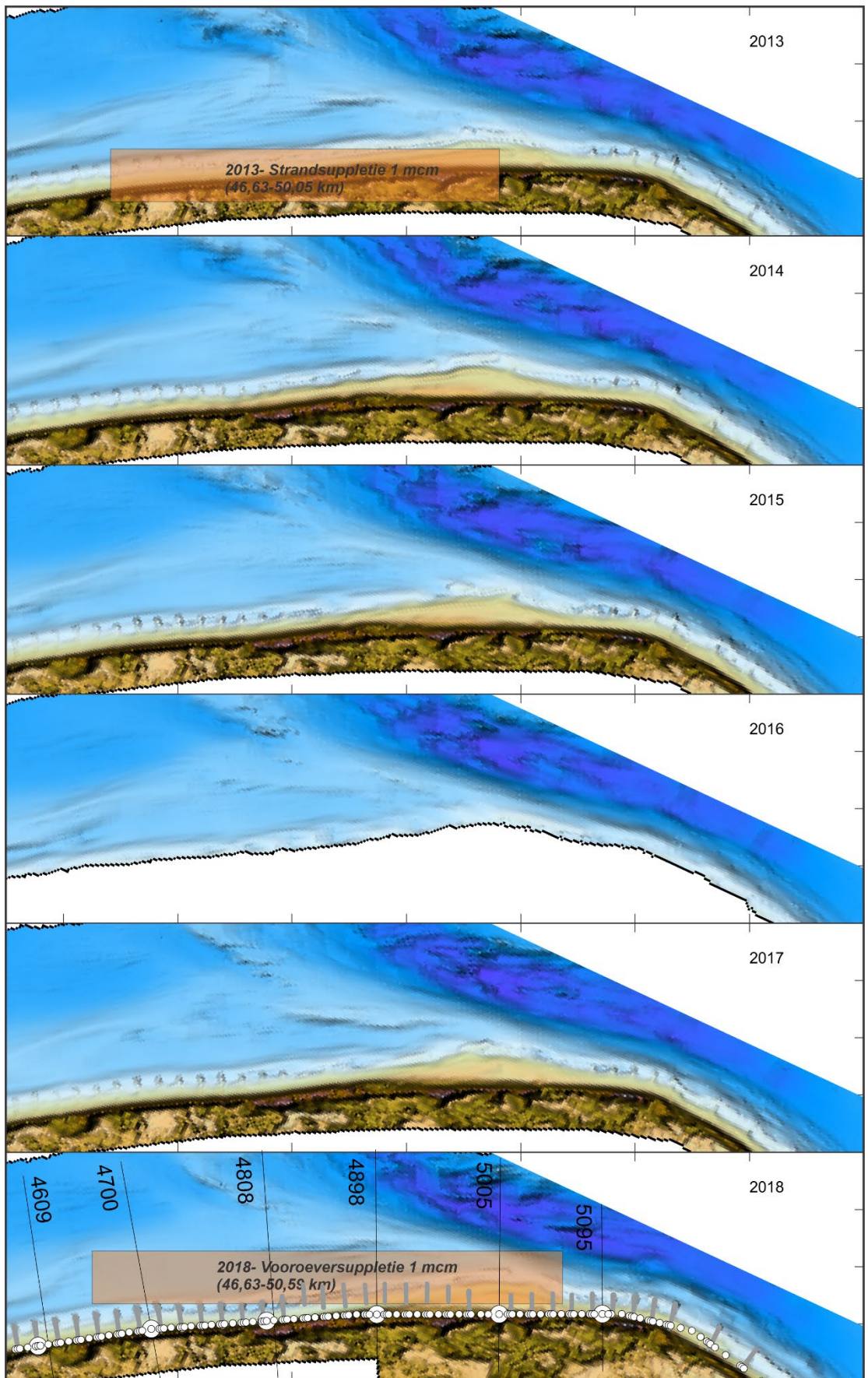


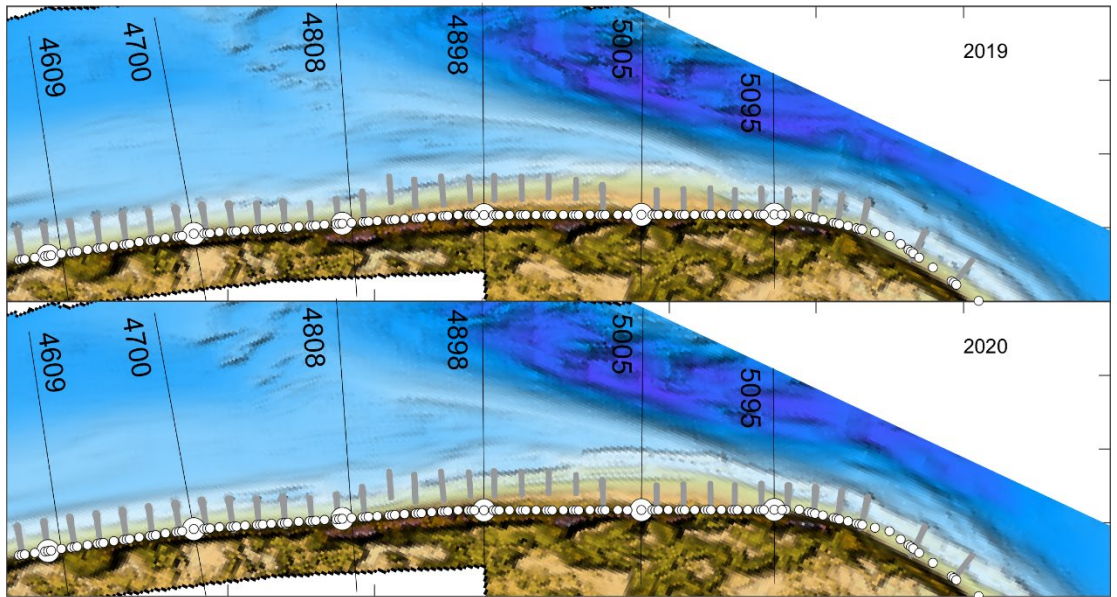


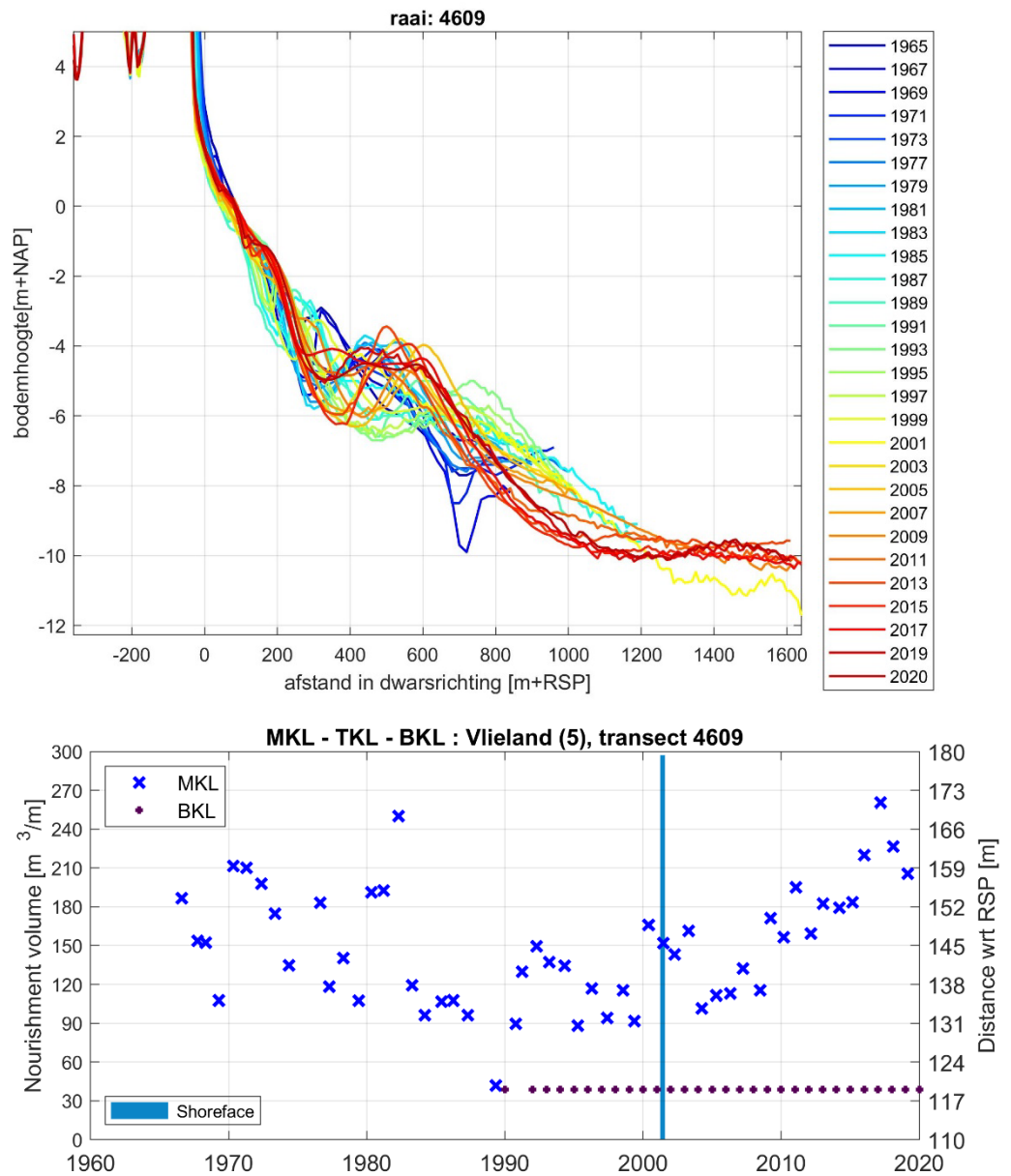






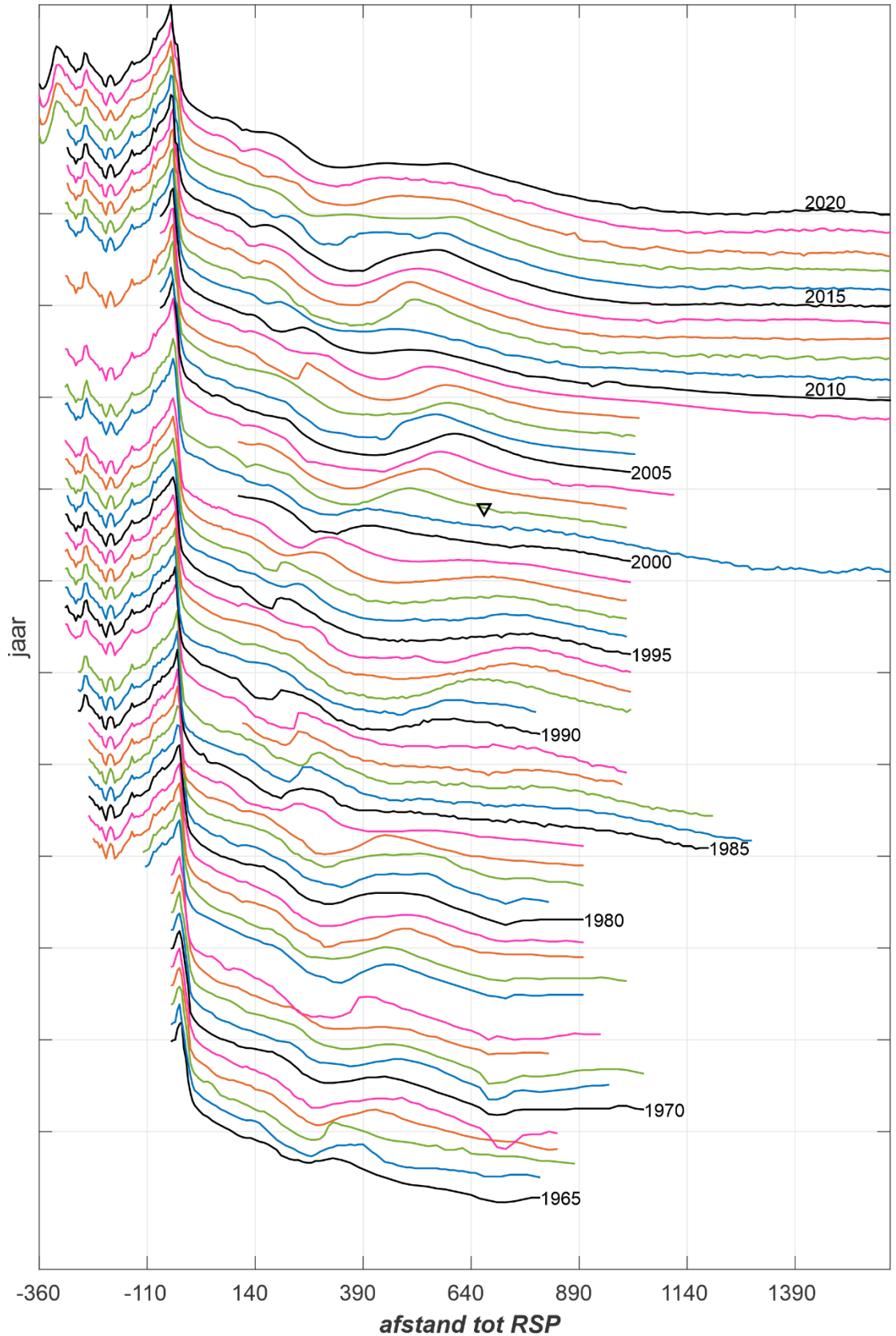






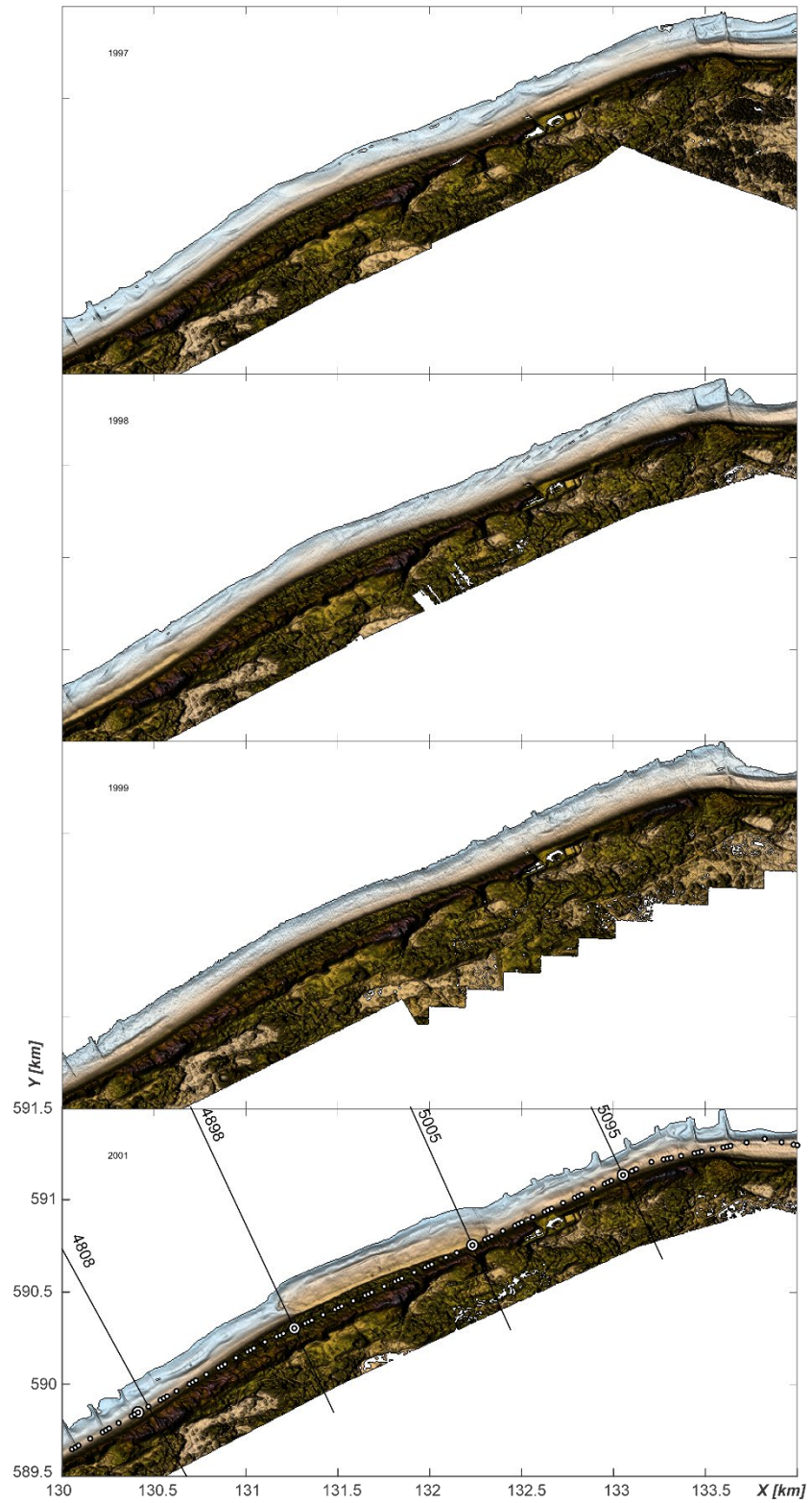
Figuur B- 1: Ontwikkeling van het dwarsprofiel en de MKL positie van raai 4609.

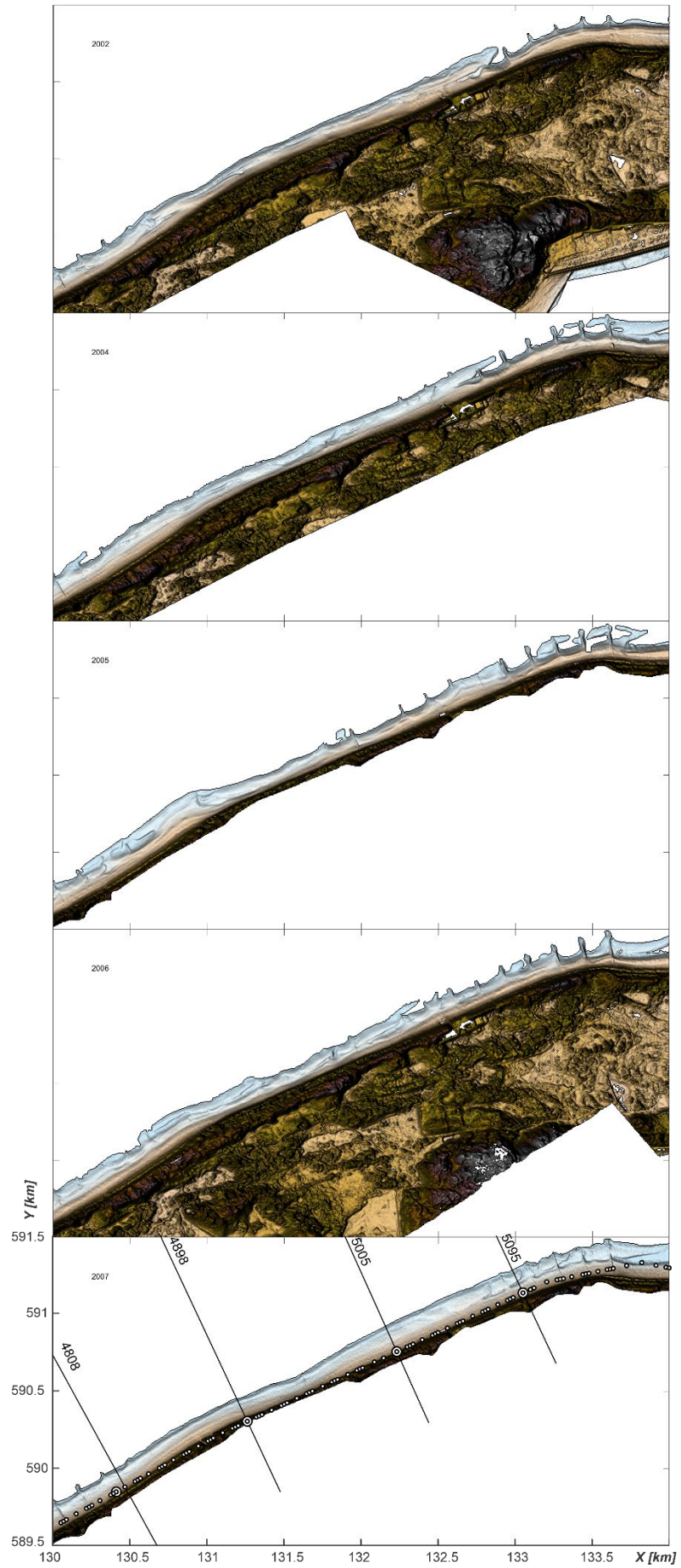
transect 5004609: 1965-2020

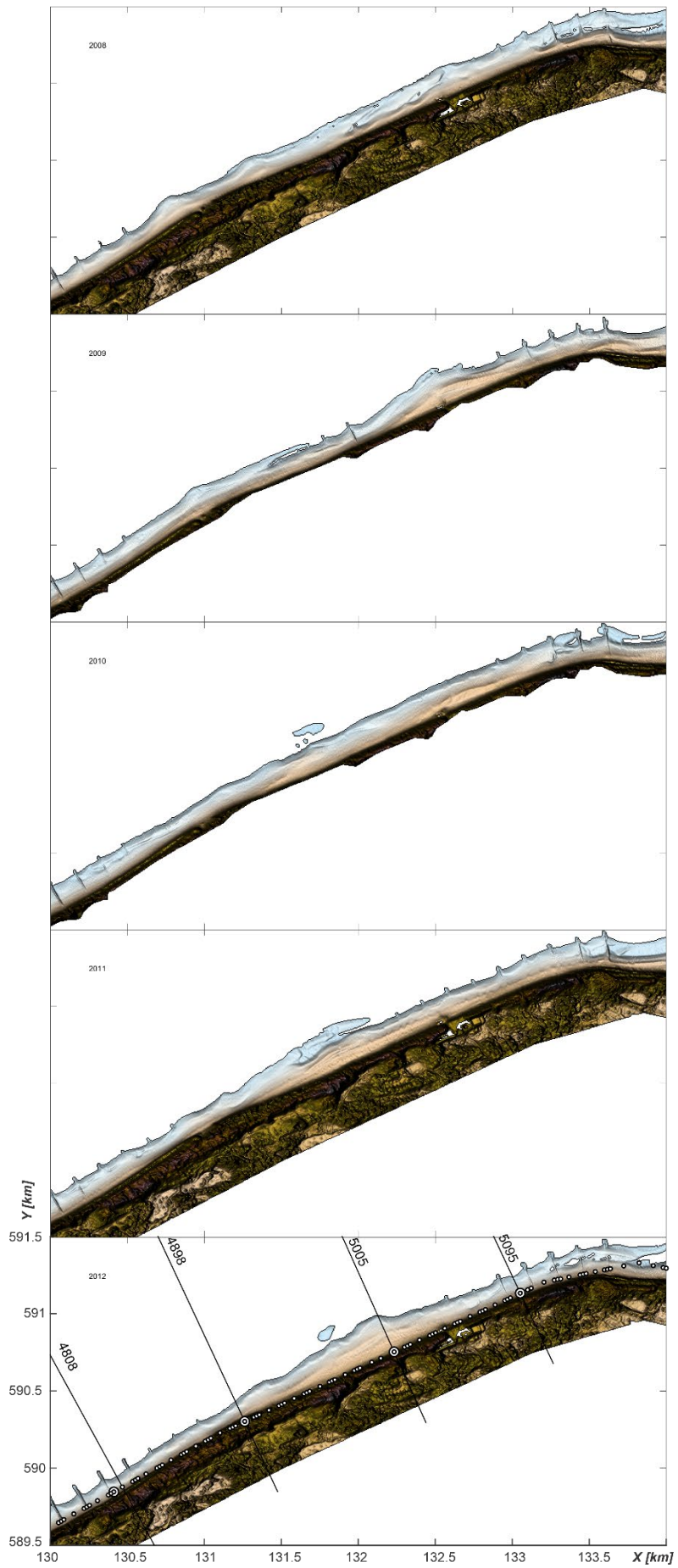


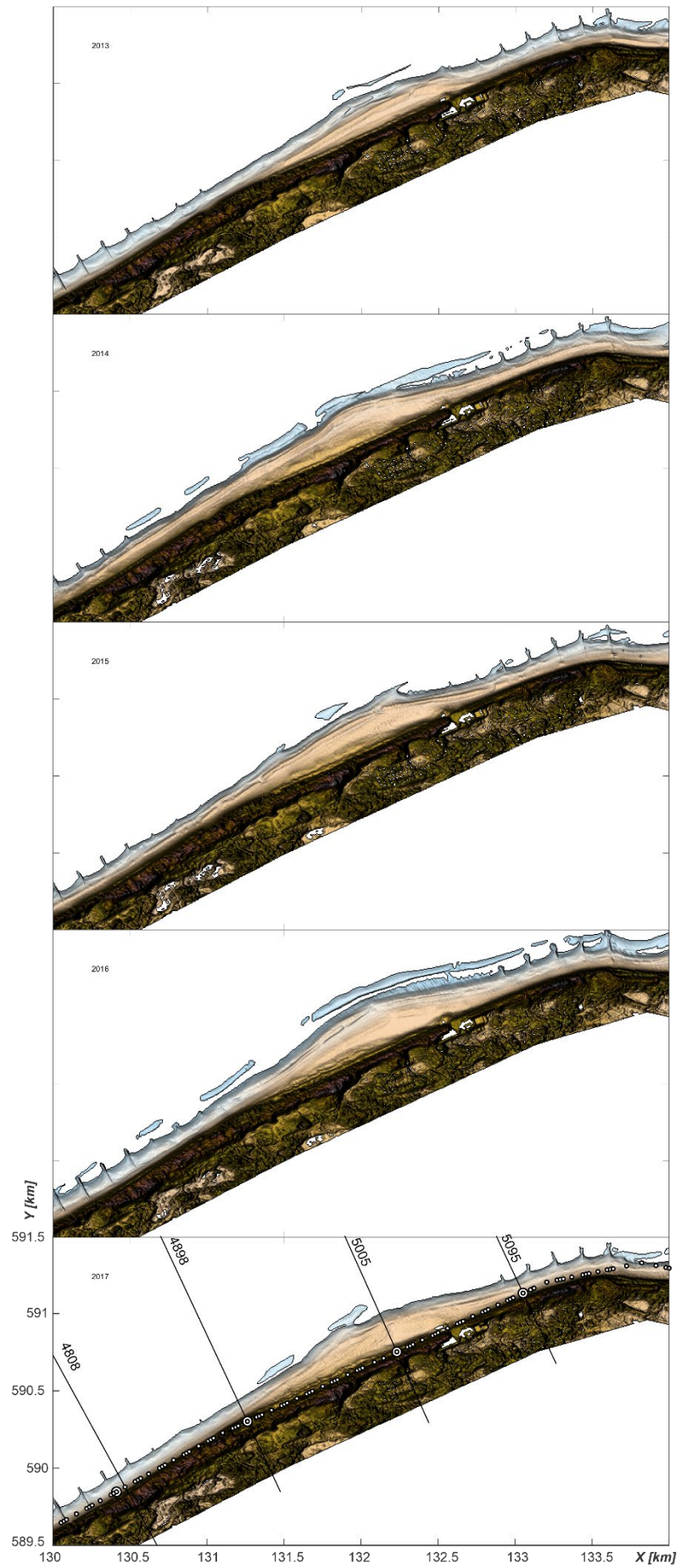
Figuur B- 2: Timestack van profielontwikkeling voor raai 4609.

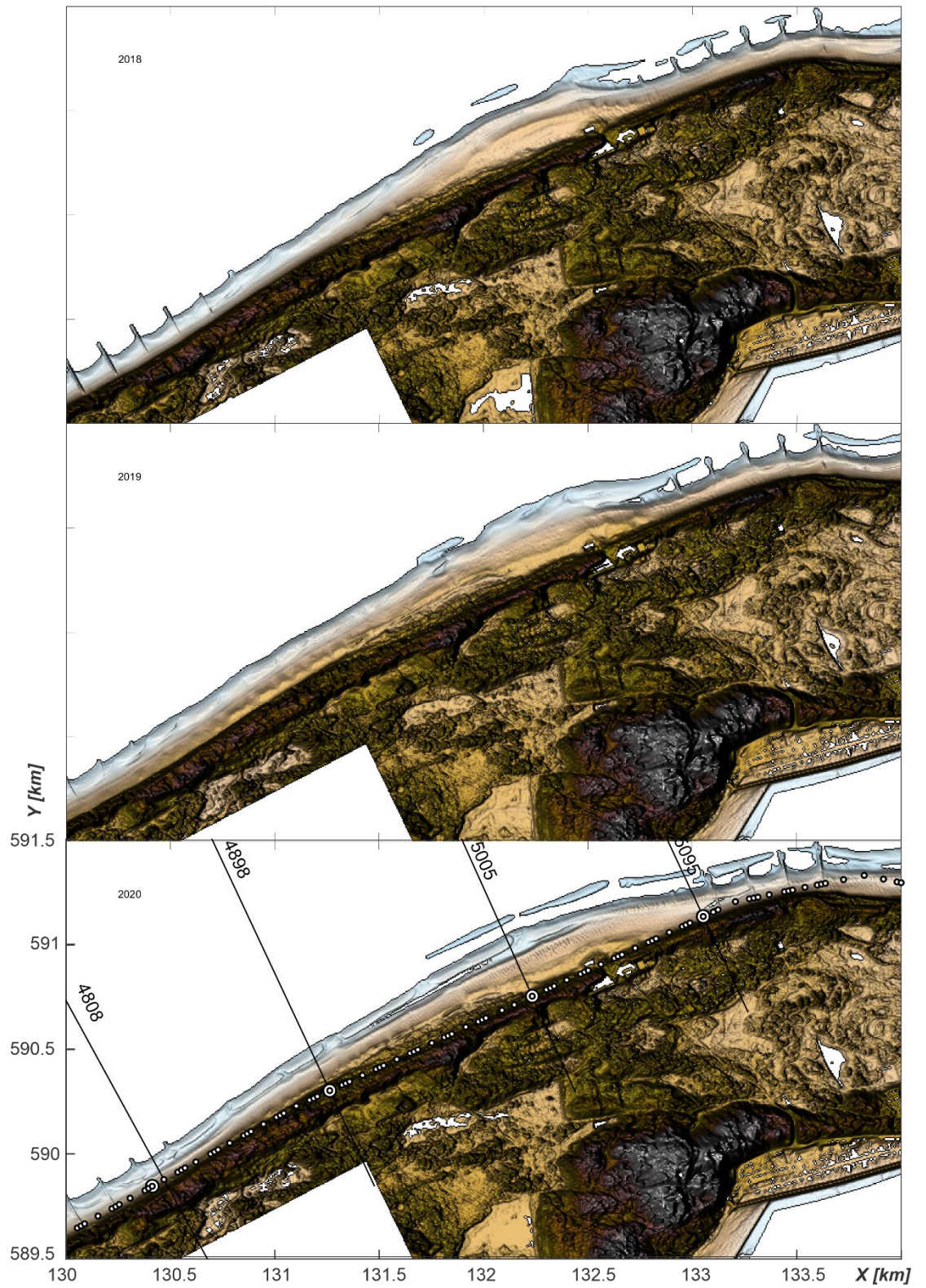
B LiDAR data



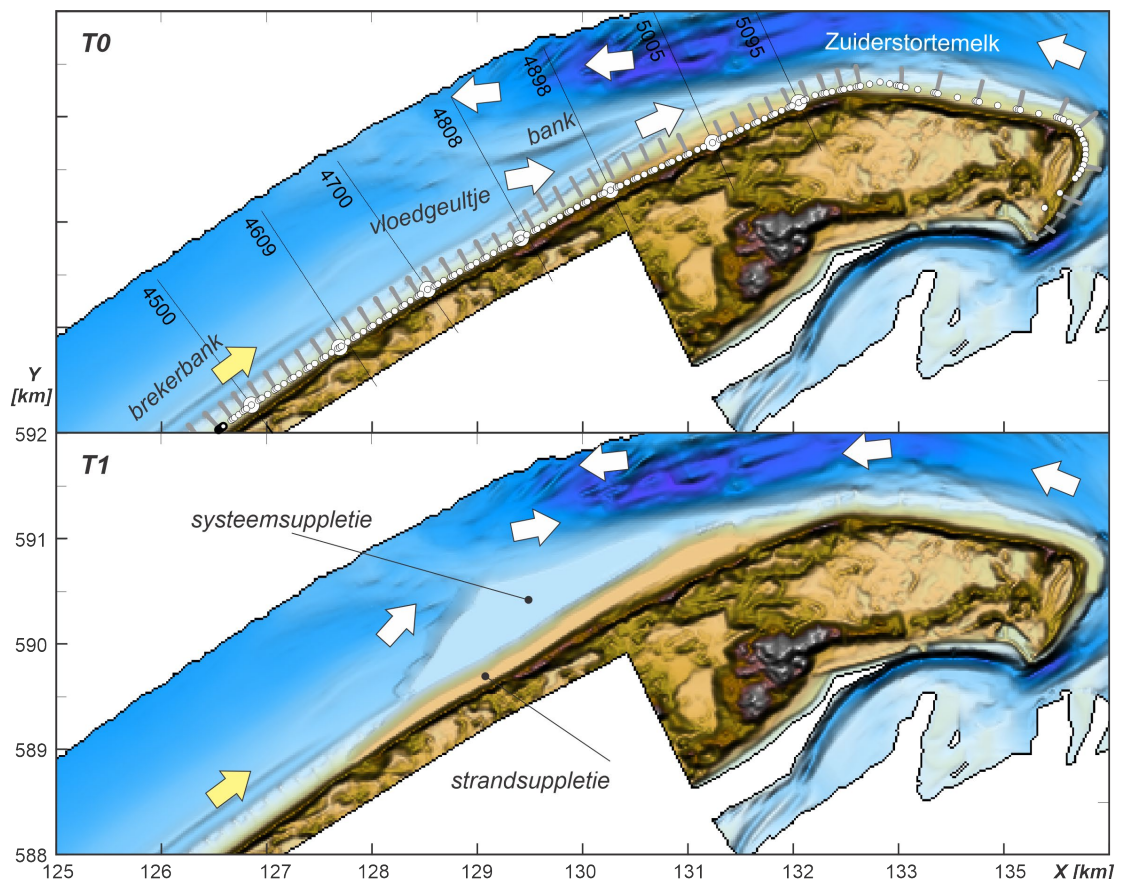








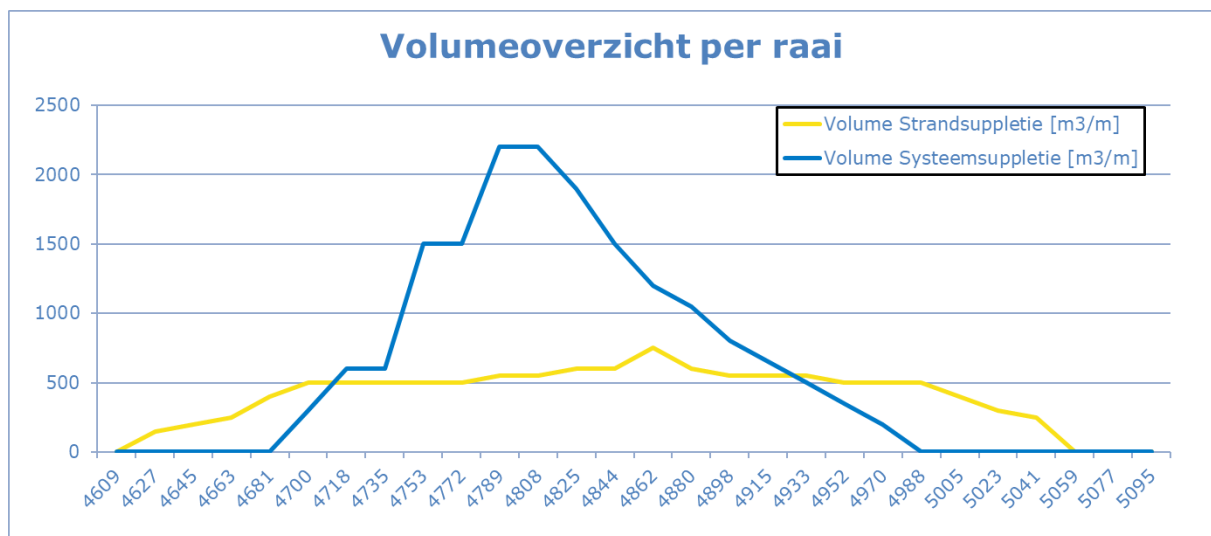
C Uitwerking systeemsuppletie



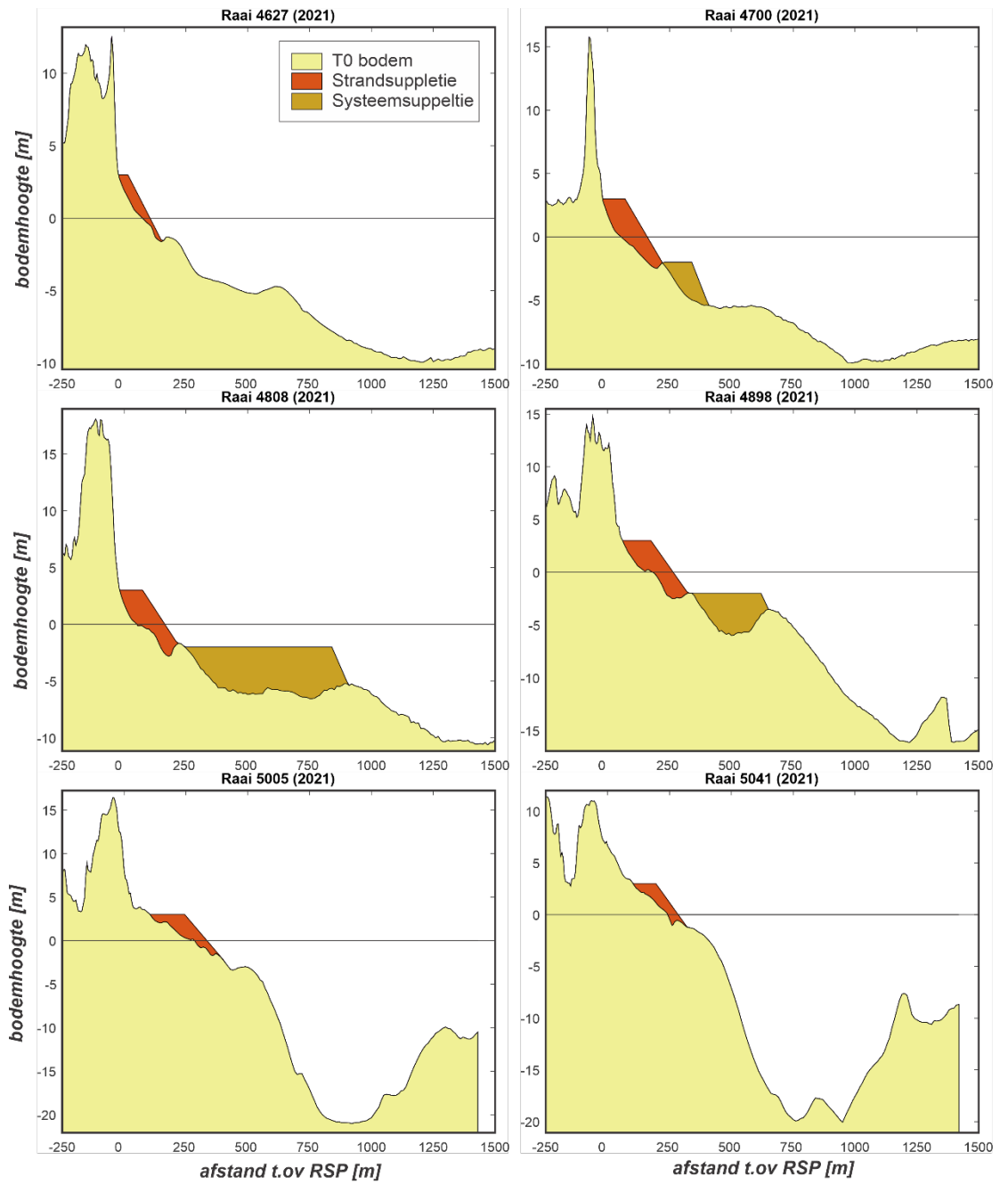
Figuur C- 1: Een overzicht van de voorgestelde suppletie (T1) ingepast in de 2021 Jarkus bodem (T0).

De voorgestelde suppletie bestaat uit een gecombineerde strand- en systeemsuppletie (Figuur C-1, onder en Figuur C-3). De strandsuppletie strekt zich uit tussen raai 4627 en 5041. Het volume van deze suppletie bedraagt 2,02525 miljoen m³ (gemiddeld 200-250 m³/m, Figuur C-2). De strandsuppletie heeft een bankethoogte van 3m NAP en strekt zich zeewaarts uit tot de 1^{ste} brekerbank. De trog wordt hierbij nog ingevuld. Deze strandsuppletie zorgt ervoor dat de MKL zich zeewaarts van de BKL beweegt. Door deze suppletie te combineren met een systeemsuppletie wordt getracht de erosie van de suppletie te reduceren, waardoor de levensduur verlengd wordt. De systeemsuppletie vult de geul tussen de strandsuppletie en het voorliggende bankje in tot een hoogte van -2m NAP. De systeemsuppletie strekt zich uit tussen raaien 4700 en 4988. Het totale benodigde volume bedraagt hiervoor 3,0765 miljoen m³.

Gemiddeld bedraagt het suppletie volume 400-450 m³/m, maar een maximaal volume van meer dan 2000 m³/m moet aangebracht worden rond raai 4808.



Figuur C- 2: Een overzicht van de volumes per raai voorgestelde suppletie (T1) ingepast in de 2021 Jarkus bodem (T0).



Figuur C- 3: Een aantal representatieve jaren getrokken over de voorgestelde suppletie.

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