

Verkenning probleemlocaties kust

Morfologische karakterisering en verwachte suppletie-inspanning komende 50 jaar voor vier probleemlocaties



Verkenning probleemlocaties kust

Morfologische karakterisering en verwachte suppletie-inspanning komende 50 jaar voor vier probleemlocaties

Auteur(s)

Ellen Quataert

Edwin Elias

Verkenning probleemlocaties kust

Morfologische karakterisering en verwachte suppletie-inspanning komende 50 jaar voor vier probleemlocaties

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Marga Rommel en Niels van Kuik
Referenties	
Trefwoorden	Vlieland, Texel, Walcheren, Zeeuws-Vlaanderen, Dishoek, Nieuwvliet, suppleties, beheer en onderhoud kust, strandhoofd, strand, vooroever

Documentgegevens

Versie	5
Datum	22-12-2022
Projectnummer	11208035-001
Document ID	11208035-001-ZKS-0001
Pagina's	79
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Ellen Quataert	
	Edwin Elias	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.2	Ellen Quataert	Bart Grasmeijer	Toon Segeren	
	Edwin Elias			

Samenvatting

Jaarlijks suppleert Rijkswaterstaat de Nederlandse kust in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat conform het vigerende kustbeleid van 'dynamisch handhaven' sinds 1990. Dit kustbeleid staat voor duurzame handhaving van de veiligheid van het achterland en duurzaam behoud van functies en waarden in het kustgebied door middel van zandsuppleties. De BasisKustLijn (BKL) wordt als referentie instrument gebruikt om de kustachteruitgang te signaleren. In de praktijk blijkt dat op enkele locaties langs de kust het lastig is om door middel van reguliere zandsuppleties de kustlijn, met de BKL als referentie, binnen het meerjarige suppletieprogramma van RWS te handhaven. Dit kan leiden tot een (zeer) hoge onderhoudsinspanning of zelfs het niet kunnen handhaven van de BKL. Voor deze 'probleemlocaties' wil Rijkswaterstaat verkennen of er alternatieve onderhoudsstrategieën kunnen bijdragen aan het efficiënter onderhouden van de kust.

Het doel van dit rapport is om voor vier probleemlocaties (Vlieland havenstrand, Texel Zuidwest, Dishoek en Nieuwvliet-Groede) een inschatting te maken van de effecten van het voortzetten van de huidige onderhoudsstrategie, passend binnen het reguliere meerjarige suppletieprogramma van RWS, voor de komende 50 jaar. Om een inschatting te maken van de effecten van het voortzetten van de huidige onderhoudsstrategie en het uitwerken van mogelijke alternatieve onderhoudsstrategieën, is in kaart gebracht welke processen voor de structurele erosieve trend zorgen. Op basis van deze morfologische karakterisering is een inschatting van de toekomstige suppletiebehoefte gemaakt. Dit rapport dient als input voor het uitwerken van alternatieve onderhoudsstrategieën in een vervolgtraject van het project.

Bij Texel Zuidwest (raaien 900-1200) zal er naar verwachting in de komende 50 jaar tussen 7,6 en 17,7 miljoen m³ zand gesuppleerd moeten worden. De ~10 miljoen m³ spreiding in deze schatting wordt met name veroorzaakt door de onzekerheid in de waargenomen toenemende trend in het suppletievolume en in mindere mate door de morfologische ontwikkeling (het al dan niet aanlanden van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks, NUN).

Bij Vlieland Havenstrand (raaien 5440-5480) zal er naar verwachting in de komende 50 jaar tussen 0,37 en 0,53 miljoen m³ zand gesuppleerd moeten worden, onder aanname dat de huidige suppletie-inspanning wordt voortgezet. Op basis van de opgetreden ontwikkeling is het niet waarschijnlijk dat de erosie problematiek van het Havenstrand in de toekomst zal veranderen.

Bij Dishoek (raaien 2990 - 3202) zal er naar verwachting in de komende 50 jaar 14 miljoen m³ zand gesuppleerd moeten worden. Hierbij is het effect van een incidentele storm op het suppletievolume (zoals het geval na stormen Ciara en Dennis in 2020) meegenomen in de berekening.

Bij Nieuwvliet-Groede (raaien 768-791) zal er naar verwachting in de komende 50 jaar 12,2 miljoen m³ zand gesuppleerd moeten worden, onder aanname dat de huidige suppletie-inspanning wordt voortgezet.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond kustbeleid dynamisch handhaven	7
1.2	Probleembeschrijving	7
1.3	Doelstelling	7
1.4	Aanpak	8
1.5	Leeswijzer	8
2	Texel Zuidwest	9
2.1	Overzicht van de probleemlocatie	9
2.2	Morfologische karakterisering	10
2.2.1	Vorming van de NUN, processen tot 2006	10
2.2.2	Huidige ontwikkelingen (vanaf 2006)	11
2.3	Suppleties en overige ingrepen	13
2.4	Voortzetting huidige suppletie inspanning	15
2.4.1	Scenario 1; Voortzetting huidige ontwikkelingen, aanlanding van de NUN vindt niet plaats in de komende 50 jaar	16
2.4.2	Scenario 2; Voortzetting huidige ontwikkelingen, aanlanding van NUN binnen 10 jaar	16
2.5	Alternatieve onderhoudsstrategieën	Error! Bookmark not defined.
2.5.1	Scenario 3: variant 'zandmotor' op de NUN	17
2.6	Samenvatting van de suppletiehoeveelheden	18
3	Havenstrand Vlieland	19
3.1	Overzicht van de probleemlocatie	19
3.2	Morfologische karakterisering (T0)	21
3.3	Suppleties en overige ingrepen	24
3.4	Voortzetting huidige suppletie inspanningen	25
3.4.1	Scenario 1; Voortzetting huidige ontwikkelingen (gemiddeld)	25
3.5	Samenvatting van de suppletiehoeveelheden	26
4	Dishoek-Vlissingen	27
4.1	Overzicht van de probleemlocatie	27
4.2	Morfologische karakterisering	29
4.3	Suppleties en overige ingrepen	37
4.4	Voortzetting huidige suppletie inspanningen	38
4.4.1	Scenario 1; Voortzetting huidige ontwikkelingen (gemiddeld)	38
4.5	Samenvatting van de suppletiehoeveelheden	38

5	Nieuwvliet-Groede	39
5.1	Overzicht van de probleemlocatie	39
5.2	Morfologische karakterisering	41
5.2.1	Grootschalige veranderingen van de monding	41
5.2.2	Lokale ontwikkeling van de kustlijn (1997-2020).	44
5.2.3	Conceptuele weergave van de processen	50
5.3	Suppleties en overige ingrepen	52
5.4	Voortzetting huidige suppletie inspanningen	53
5.4.1	Scenario 1; Voortzetting huidige ontwikkelingen (gemiddeld)	53
5.5	Samenvatting van de suppletiehoeveelheden	54
6	Referenties	55
A	Aanvullende figuren Texel zuidwest	56
B	Aanvullende figuren Vlieland Havenstrand	63
C	Aanvullende figuren Dishoek	69
D	Aanvullende figuren Nieuwvliet-Groede	71

1 Inleiding

1.1 Achtergrond kustbeleid dynamisch handhaven

Jaarlijks suppleert Rijkswaterstaat de Nederlandse kust in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat conform het vigerende kustbeleid van ‘dynamisch handhaven’ sinds 1990. Dit kustbeleid staat voor duurzame handhaving van de veiligheid van het achterland en duurzaam behoud van functies en waarden in het kustgebied door middel van zandsuppleties. De opdracht van het ministerie aan Rijkswaterstaat is vastgelegd in de Service Level Agreement (SLA). Hierin staat beschreven welke prestaties Rijkswaterstaat moet leveren en welke middelen RWS krijgt om deze afgesproken prestaties te leveren. In de SLA-afspraken is het volume vastgelegd dat jaarlijks aan de kust moet worden toegevoegd voor het handhaven van de kustlijn en het op langere termijn op orde houden van de sedimentbalans van het kuststelsel. Dit volume is op dit moment in de SLA afspraken vastgesteld op ca. 12 miljoen m³ zand per jaar. De basiskustlijn (BKL) wordt als referentie instrument gebruikt om de kustachteruitgang te signaleren. In de SLA afspraak is vastgelegd dat de BKL in maximaal 10% van de kusttraaien overschreden mag worden.

Voor het handhaven van de basiskustlijn en het op orde houden van sedimentbalans wordt het principe “zacht waar het kan, hard waar het moet” gehanteerd. Locaties met BKL-overschrijdingen worden in principe doormiddel van suppleties onderhouden.

1.2 Probleembeschrijving

In de praktijk blijkt dat op sommige locaties langs de kust (Tabel 1-1) het lastig is om door middel van reguliere zandsuppleties de kustlijn, met de BKL als referentie, binnen het meerjarige suppletieprogramma van RWS te handhaven. Dit kan leiden tot een (zeer) hoge onderhoudsinspanning of zelfs het niet kunnen handhaven van de kustlijn met de BKL als referentie. Een landwaartse verlegging van de BKL – om zo meer aan te sluiten bij de morfodynamica in het gebied – is soms lastig of niet mogelijk gezien de aanwezige functies (veiligheid, natuur, recreatie of drinkwaterwinning) langs de kust. Voor deze ‘probleemlocaties’ is het denkbaar dat alternatieve oplossingen dan reguliere zandsuppleties kunnen bijdragen aan het efficiënter onderhouden van de kust.

Tabel 1-1: ‘Probleemlocaties’ binnen de huidige suppletiestrategie

Locatie	Kustvak	Raaien
Vlieland Havenstrand	5 - Vlieland	5400-5480
Texel Zuidwest	6 - Texel	900-1210
Dishoek	16 - Walcheren	3202
Nieuwvliet-Groede	17 – Zeeuws-Vlaanderen	768-791

1.3 Doelstelling

Rijkswaterstaat wilt graag een verkenning van de vier probleemlocaties, met als doel:

- 1 Het uitwerken van alternatieve onderhoudsstrategieën voor de locaties uit Tabel 1-1;
- 2 Inzicht krijgen in de uitvoerbaarheid, kosten en risico's van de huidige strategie voor kustonderhoud ('zacht waar het kan, hard waar het moet') en de alternatieve strategieën, ook in relatie tot de aanwezige functies langs de kust en SLA-opdracht.

Het resultaat dient als advies voor een vervolgtraject per locatie, waarbij het advies is opgebouwd als pallet aan keuzes met bijbehorende voor- en nadelen.

Het doel van dit rapport van Deltares is om voor de vier probleemlocaties een inschatting te maken van de effecten van het voortzetten van de huidige onderhoudsstrategie, passend binnen het reguliere meerjarige suppletieprogramma van RWS, voor de komende 50 jaar.

1.4 Aanpak

Om in staat te zijn een inschatting te maken van de effecten van het voortzetten van de huidige onderhoudsstrategie en het uitwerken van mogelijke alternatieve onderhoudsstrategieën, is inzicht in de morfologische processen van het gebied nodig. Het is belangrijk om eerst in kaart te brengen welke processen zorgen voor de structurele erosieve trend en/of complicaties met het handhaven van de kustlijn, om zodoende een inschatting te maken van de te verwachte kustonderhoud voor de komende 50 jaar. Ook is het inzicht in deze processen relevant voor het uitwerken van (realistische) alternatieve onderhoudsstrategieën.

Voor de vier probleemlocaties wordt in dit rapport het volgende uitgewerkt:

- De morfologische karakterisering van het gebied, zowel huidige (de 'T0-situatie') als de verwachte toekomstige ontwikkeling. Hiervoor wordt zoveel mogelijk de reeds beschikbare kennis gebruikt.
- Een overzicht van het uitgevoerde kustonderhoud; suppleties en overige (harde) ingrepen.
- Een inschatting van de toekomstige suppletiebehoefte. Afhankelijk van de morfologische karakterisering worden er per gebied scenario's uitgewerkt zoals het voortzetten van de huidige onderhoudsstrategie en mogelijke alternatieve onderhoudsstrategieën.

De analyses in dit rapport dienen als input voor het uitwerken van alternatieve onderhoudsstrategieën in een vervolgtraject van het project. Uitwerking van de alternatieve onderhoudsstrategieën wordt uitgevoerd door ingenieursbureau Royal Haskoning/DHV middels (onder andere) expertworkshops.

1.5 Leeswijzer

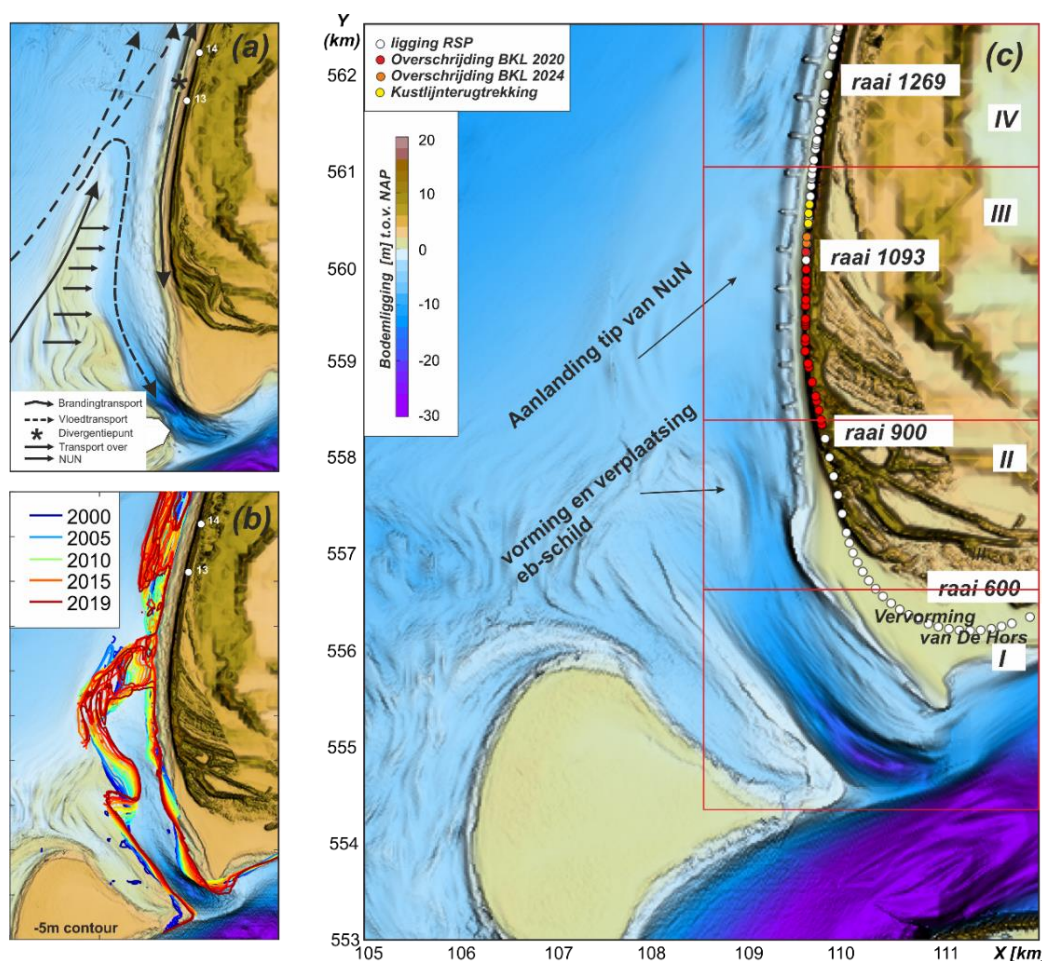
De vier probleemlocaties worden uitgewerkt in vier hoofdstukken; Texel Zuidwest in Hoofdstuk 2, Havenstrand Vlieland in Hoofdstuk 3, Dishoek-Vlissingen in Hoofdstuk 4 en Nieuwvliet-Groede in Hoofdstuk 5. Aan het einde van elk hoofdstuk wordt een samenvatting (en dus conclusie) van de geschatte suppletie inspanning voor de desbetreffende probleemlocatie gegeven. Het rapport bevat dus geen algemene conclusie.

2 Texel Zuidwest

2.1 Overzicht van de probleemlocatie

De gehele kustlijn van Texel wordt veelvuldig gesuppleerd, maar met name tussen raai 900 en 1210 vergt het een grote inspanning om de BKL te behouden. Figuur 2-1 toont de ontwikkelingen en processen rond het probleemgebied met een weergave van de recente bodem, BKL positie en verplaatsing van de kustlijn. Over het stuk kust van raai 900-1210 is er een gemiddelde landwaartse trend van 8 m/jaar over de afgelopen 9 jaar. In de meest erosieve raaien loopt dit op tot 20 m/jaar. Het vigerende beleid (BKL locatie) met bijpassende suppletie strategie blijkt lastig uitvoerbaar te zijn; de BKL overschrijdingen blijven bestaan ondanks frequente strandsuppleties. De suppleties hebben wel een functie voor het aanvullen van het kustfundament, alhoewel de strandsuppleties een relatief dure onderhoudsvariant zijn.

Raai 900-1200 ligt langs de zuidwestzijde van Texel en vormt het overgangsgebied van de buiendelta van Texel naar de ongestoorde eilandkust (Figuur 2-1). Naast de bolle vorm van de kust speelt ook de voorliggende bank Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) hier een rol in de erosieproblematiek.



Figuur 2-1: Een samenvatting van de ontwikkelingen en processen die spelen langs de kustlijn van zuidwest Texel (uit Elias et al. 2021). Linksboven: Conceptueel sedimenttransport model van de kust van zuidwest Texel gebaseerd op Cleveringa (2001). Linksonder: vervorming van de NUN aan de hand van de NAP -5m contourlijn. Rechts: weergave van de recente bodem, BKL positie en verplaatsing van de kustlijn.

2.2 Morfologische karakterisering

Elias et al. (2017) laten zien dat er recentelijk een kentering in gedrag van de NUN te observeren is. Oudere studies en concepten van morfologisch gedrag zoals bijvoorbeeld gepresenteerd in Cleveringa (2001) en Elias (2006) zijn dan ook niet toereikend om het huidige gedrag accuraat te beschrijven. In de recente studie van Elias (2021) is de uitwisseling tussen NUN en de kust uitvoerig geanalyseerd. Deze studie vormt dan ook de basis van de morfologische karakterisering van het gebied.

2.2.1 Vorming van de NUN, processen tot 2006

De NUN vormt onderdeel van de buitendelta van het Zeegat van Texel. De aanwezigheid van het zeegat en de NUN geeft complexe stromingen en sedimenttransportpatronen, waardoor de erosie tussen raai 900 en 1210 verder versterkt wordt. Voor het begrijpen van de huidige kustlijnerosie is het niet alleen belangrijk de huidige situatie te begrijpen, maar is ook inzicht in de in het verleden opgetreden veranderingen belangrijk. Na afsluiting van de Zuiderzee ontwikkelt de NUN zich lange tijd als een klassieke spit. De grote zandtoevoer van de eroderende Noorderhaaks zorgt ervoor dat de NUN zich noordelijk kan ontwikkelen. Deze groei zet zich tot ongeveer 1995 onverminderd door, waarna een maximale uitgroei wordt bereikt. De processen die in deze periode de ontwikkeling van de kustlijn en de NUN bepalen zijn conceptueel uitgewerkt in Figuur 2-1 (linksboven) en Appendix A, Figuur A- 1. Deze uitwerking is gebaseerd op Cleveringa (2001) aangevuld met inzichten uit Elias (2006).

In principe worden de sedimenttransporten langs de kust van zuidwest Texel bepaald door het getij en de golven. De interactie met de bodemconfiguratie maakt de sedimenttransportpatronen complex. Zonder zeegat zou het transportpatroon betrekkelijk eenvoudig zijn. Het Noordzee getij veroorzaakt een klein netto noordwaarts transport (Figuur A- 1a). Het getijgedreven transport is groter op diep water dan op ondiep water omdat de bodemwrijving met afnemende diepte een groter invloed uitoefent. Door golven ontstaat op de ondiepe vooroever een brandingstransport. Dit transport wordt hoofdzakelijk gegenereerd door golfbreking. Golfbreking woelt sediment op dat verplaatst kan worden door de getijstroming. Ook worden golf-gedreven stromingen gegenereerd, wat de sedimenttransporten vergroot. Door de bolle vorm van de kust van Texel ontstaan gradiënten in het brandingstransport. Ter plaatse van de maximale kromming van de kustlijn ontstaat hier een divergentiepunt, waar een maximale erosie optreedt. Dit proces speelt al lange tijd en om deze erosie tegen te gaan zijn er tussen 1959 en 1987, 24 strandhoofden aangelegd tussen raai 900 en raai 1800 (Rakhorst, 1984; Verhagen en Van Rossum, 1990). Deze strandhoofden hebben ervoor gezorgd dat de achteruitgang van de kustlijn ongeveer gehalveerd is (Rakhorst, 1983).

Naast het Noordzee-getij is ook het getij door het zeegat van Texel van belang (Figuur A- 1b). Ieder getij vult en ledigt het achterliggende bekken door het Marsdiep heen. Het gehele getijvolume wordt door de nauwe opening van het zeegat geperst waardoor grote stroomsnelheden ontstaan. Deze stromingen schuren de geulen diep uit. In theorie ontstaat nu een zeegat met een diep centrale (eb) geul en secundaire (vloed) geulen aan weerszijden van het zeegat. Deze vloedgeulen zorgen vaak voor erosie van de aanliggende kustlijnen. Bij zuidwest Texel is dit de geul Molengat die grote stromingen langs de westzijde van De Hors genereerd.

Het vullen en ledigen van het bekken creëert niet alleen geulen maar ook een buitendelta aan de zeezijde van het zeegat (Figuur A- 1c). De patronen van zandplaten en geulen op de buitendelta beïnvloeden de hierboven beschreven processen. Door onder andere de aanwezigheid van de Noorderhaaks en de vorm van het bekken zijn de hoofdgeulen van het zeegat van Texel zuidwaarts gericht en van minder belang voor de kustlijn van Texel. De smalle opening tussen de Noorderhaaks en De Hors heeft er wel voor gezorgd dat hier lokaal grote stroomsnelheden optreden en het Molengat is hier dan ook diep uitgeschuurd. De

Noorderhaaks beïnvloedt ook het Noordzee getij. Contractie om de buitendelta heen zorgt ervoor dat de stroomsnelheden hier lokaal toenemen en er een extra noordwaarts transport vanaf de buitendelta richting de (diepere) vooroever van Texel optreedt.

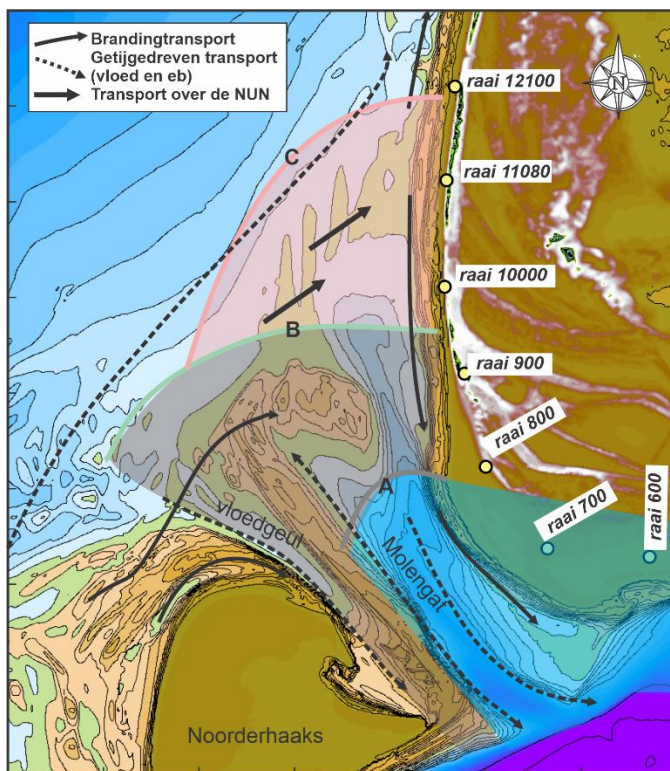
Refractie van de golven op de buitendelta en golfbreking op de ondiepe delen zorgt voor golfafscherming van de achterliggende kust (Figuur A- 1d). De zuidelijke golven kunnen niet doordringen tot zuidwest Texel en noordelijke golven kunnen de kop van Noord-Holland niet bereiken. Deze golfafscherming zorgt er ook voor dat het convergentie punt in brandingstransport verschuift. Golfbreking op de westzijde van de Noorderhaaks zorgt voor een landwaarts transport van sediment. Enerzijds zorgt dit voor een vervorming en verhoging van de Noorderhaaks, maar dit voedt ook de getijstroming door opwoeling van zand. Het resultaat is dat er een spitvormige uitbouw van de Noorderhaaks ontstaat (de NUN). Deze spit wordt gevoed vanaf de zeezijde door het Noordzee-getij, vanaf de landzijde door de zeegat gedreven stroming in het Molengat en door golfgedreven transporten op de spit zelf (Figuur A-1d). Naast lokale beïnvloeding van het getij en de golven zorgt de NUN er ook voor dat sediment de kust niet bereikt. Het sediment accumuleert immers in de NUN. Ook het Molengat speelt een belangrijke rol in sedimentafvoer van de kust. De erosie van het ondiepe deel van het kustprofiel is waarschijnlijk golfgedreven, maar door de ligging van het Molengat ontstaat een efficiënte kustlangse afvoer van het sediment. Zodra dit sediment het Marsdiep bereikt wordt het tijdens vloed het bekken in getransporteerd en tijdens eb het zuidelijke deel van de buitendelta op. Sedimenttransport vanuit het Marsdiep terug het Molengat in is waarschijnlijk beperkt. Het Molengat voert niet alleen de kustlangse sedimenttransporten efficiënt af, maar ook het transport vanaf de Noorderhaaks. Dit transport verplaatst zich richting de NUN of het Marsdiep, maar niet richting de kust.

2.2.2 Huidige ontwikkelingen (vanaf 2006)

Het conceptueel model van Cleveringa (2001) is representatief voor de situatie rond 2000, maar met doorgaande vervorming van de buitendelta wijzigen ook de sedimenttransport patronen. De processen zoals weergegeven in Cleveringa (2001) wijzigen hier in principe niet. Wel verandert de interactie tussen deze processen en de bodem en hierin speelt de Noorderhaaks waarschijnlijk een belangrijke rol.

Voor de huidige situatie wordt een conceptueel model gepresenteerd in Figuur 2-2. Erosie van de zeezijde van de Noorderhaaks wordt door golven landwaarts getransporteerd. Een deel van dit sediment voedt de NUN rechtstreeks. Een deel van dit sediment wordt via de Noorderhaaks richting het Molengat gevoerd. Tijdens eb wordt dit dan langs de landwaartse zijde van de NUN in noordelijke richting getransporteerd. Tot ongeveer 2000 was dit mechanisme zeer efficiënt in het voeden van de NUN. De NUN bereikt in de periode 1995 - 2000 zijn meest noordelijke ligging.

De Noorderhaaks heeft zich sindsdien sterk landwaarts verplaatst en de bank heeft een wigvorm gekregen met een brede voorzijde en een smalle punt richting het Marsdiep. Tussen de Noorderhaaks en het Molengat is een vloedgeul ontstaan. Deze vloedgeul draagt bij aan de zandtransporten richting het Molengat. Tijdens vloed verdwijnt dit materiaal in het zeegat en wordt richting het bekken getransporteerd (gebied A in Figuur 2-2). Tijdens eb accumuleert het zand in een langgerekte bank en het ebschild, via de ebstroming door het eb-schild. Het is waarschijnlijk dat deze bank en ebschild het merendeel van het noordwaarts gerichte zand invangt waardoor er minder voeding richting het noordelijke deel van de NUN plaatsvindt. Het noordelijke deel van de NUN (gebied C) wordt onder invloed van golven en de getijstroming langzaam opgeruimd. Dit is zichtbaar middels twee ontwikkelingen vanaf 2000: 1) de NUN bouwt niet verder noordwaarts en migreert – onder invloed van golven – landwaarts; 2) het eb-schaar- en –schild-systeem bouwt uit vanaf deze periode (gebied B).



Figuur 2-2: Conceptueel sedimenttransport model van de huidige (2021) kust van zuidwest Texel, het Molengat en de Noorderhaaks. In gebied A neemt het Molengat sterk af in omvang en domineert kustlijn erosie door verondieping van het Molengat. Gebied B beschrijft het groeiende, zuidelijke deel van de NUN. Hier accumuleert sediment in een groot ebschild. Lokaal zorgt dit voor gradiënten in de brandingstransporten, waardoor gebieden van kustlijnerosie en sedimentatie elkaar afwisselen. Gebied C beschrijft het uitdempende, noordelijke deel van de NUN. De aanvoer van sediment vanaf de NUN zorgt voor verondieping van de diepere vooroever (beneden de -5 m contour), maar is niet toereikend om de erosie van het ondiepe kustprofiel (boven de -5m) te compenseren.

De vorming van de vloedgeul langs de Noorderhaaks heeft mogelijk ook een rol gespeeld in de recente afname van de grootte van het Molengat. Ten zuiden van raai 800 was een diep Molengat gevormd met steile geulwanden (Gebied A). Deze steile geulwanden bleven lange tijd stabiel, maar rond 2010 treedt hier een verandering op (Figuur A- 4). De geuldiepte begint sterk af te nemen en verplaatst zeewaarts. De oostelijke, landwaartse geulwand vertoont dan een grote verflauwing, waardoor de gemiddeld laagwaterlijn van de westelijke zijde van de Hors bijna 800 m landwaarts is verplaatst. De verflauwing van de geulwand illustreert de afname van de getijstrooming door het Molengat in de afgelopen jaren.

Ten noorden van raai 800 (gebieden B en C) overheersen de golf-gedreven transporten. In de vooroever is wel de geul Molengat te zien, maar deze geul veroorzaakt niet direct de erosie van de kustlijn. De geul ontstaat doordat de NUN opbouwt en landwaarts migreert. De migratie van de NUN verkleint het doorstroom oppervlakte van de geul, maar de diepte neemt hier niet toe (zie bijv. ontwikkeling raai 900, Figuur A- 6). De geul wordt hier niet zoals in raai 840 (Figuur A- 5) de kust ingedrukt. De kustlijnerosie concentreert zich in het ondiepe deel van het profiel en is waarschijnlijk golf gedreven. De voorliggende geul en NUN vormen wel een belangrijk onderdeel van het erosieproces. De getijstrooming door de geul is in staat het sedimenttransport kustlangs te verspreiden. Sediment dat vanaf de diepe vooroever aangevoerd wordt accumuleert in de NUN, waardoor er een sedimenttekort in de kustzone ontstaat.

Lokaal kan het kustgedrag wel afwijken. Zo vindt er recentelijk rond raai 800 een aanzanding van de kust plaats. Deze aanzanding komt waarschijnlijk door de lokale golfafscherming door het groeiende, voorliggende ebschild, waardoor gradiënten in de golfenergie ontstaan. In raai 700 (Figuur A- 2) verplaatst de kustlijn juist ver landwaarts. Dit komt door een verflauwing van de geulwand.

Tussen raai 1000 en 1210 vindt aanlanding van de NUN plaats (Figuur A- 7). Deze aanlanding vindt plaats in het diepere deel van het profiel, onder de -5 m. Hier neemt de hoogte van de bodem toe. De aanlanding van de NUN heeft echter geen invloed op de golf-gedreven erosie

van het ondiepe kustprofiel. Deze erosie vindt nog steeds onverminderd plaats. Er ontstaat hier een ondiep platform met een bodemhoogte rond de -5 m.

De MKL-positie bij Texel Zuidwest wordt berekend aan de hand van het aanwezige volume tussen +3m NAP en (ongeveer) -4.8m NAP. De MKL-ontwikkeling laat in de raaien 900 en 1000 een duidelijk negatievere trend laten zien dan in raaien 1108 en 1210. In de raaien 1108 en 1210 blijft de MKL wel zeewaarts liggen van de BKL-positie in tegenstelling tot raaien 900 en 1000. Wat niet direct zichtbaar is in de MKL-volume ontwikkeling maar wel in de dwarsprofielen, is dat zowel zeewaarts en landwaarts van de MKL-rekenschijf de bodemhoogte wel toeneemt. Zeewaarts is de vorming van de Noorderlijke Uitlopers van de Noorderhaaks te zien (raai 900 en 1000) of de vorming van een ondiep platform rond de -5m NAP (raai 1108 en 1210). Aan de landwaartse zijde nemen juist de duinen in hoogte toe. De eerste duinenrij is hier lokaal met meer dan 10 m in hoogte toegenomen. De vorming van de NUN en het platform is het resultaat van zandtoevoer vanaf de buitendelta. Hier spelen suppleties waarschijnlijk een kleine rol. Het lijkt waarschijnlijk dat de suppleties wel een rol spelen in de volumetoename van de duinen.

Dit leidt tot de hypothese dat door de ongunstige configuratie van de vooroever, de bolle kustlijn en het voorliggende Molengat, het volume in de MKL-rekenschijf moeilijk op peil te houden is. Maar buiten deze zone, zowel zeewaarts als landwaarts, nemen de volumes wel toe.

2.3 Suppleties en overige ingrepen

Alhoewel sinds 1990 de kustlijn gehandhaafd wordt met zandsuppleties, spelen de in het verleden aangelegde strandhoofden hier een belangrijke rol in de kustlijnontwikkeling. Zonder deze strandhoofden was de kust waarschijnlijk al verder landwaarts verplaatst en was de onderhoudsinspanning om de BKL te handhaven hoger geweest. Tussen 1959 en 1987 zijn er aan de zuidwestzijde 24 strandhoofden aangelegd tussen raai 900 en raai 1800. Studies door Rakhorst (1984) en Verhagen en Van Rossum (1990) geven aan dat de strandhoofden de kustachteruitgang (sterk) hebben verminderd, maar de kustachteruitgang is niet gestopt. Verhagen en Van Rossum geven aan dat in raaien 1000-1210 en 1500 de erosie met meer dan 50% is gereduceerd, terwijl in raaien 1300, 1400, 1600 en 1700 het effect nagenoeg nihil was. Rakhorst (1984) geeft aan dat de kustachteruitgang sinds de aanleg in 1959 niet constant is vanwege de wijze waarop de strandhoofden zijn aangelegd. De kop van de strandhoofden ligt op de laagwaterlijn, van waaruit een verbindingsdam doorloopt tot de duinvoet. Met het terugtrekken van de duinvoet is de verbindingsdam steeds verlengd, waardoor de strandhoofden in de tijd dus steeds langer en steeds effectiever zijn geworden.

Naast strandhoofden wordt ook vrijwel de gehele Noordzeekust van Texel intensief gesuppleerd. Een overzicht van de suppleties tussen raai 900 en 1210 is gegeven in Tabel 2-1. Voor een overzicht van alle suppleties in het kustvak Texel wordt verwezen naar de Beheerbibliotheek Texel (Quataert et al. 2020).

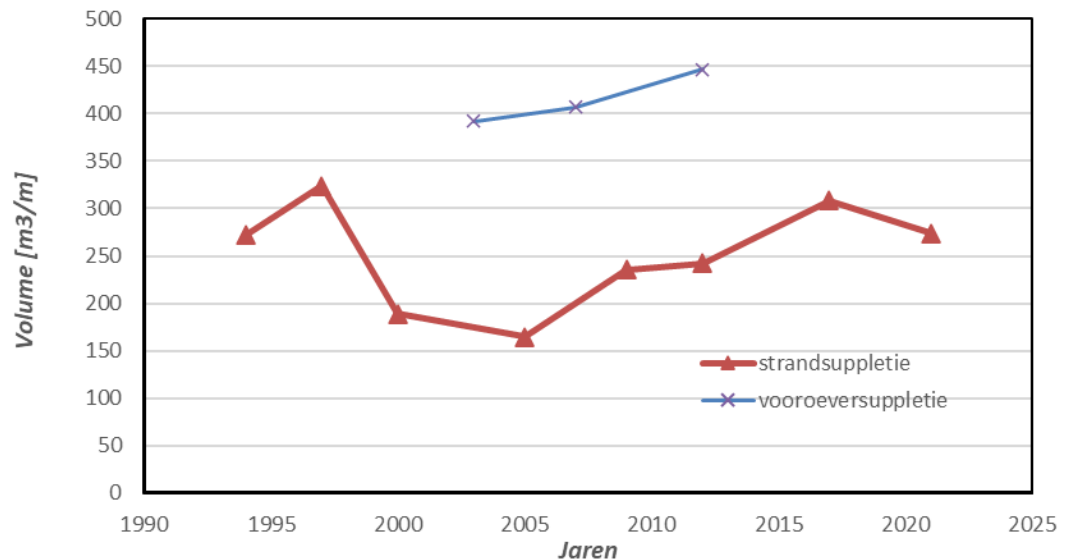
Tussen raai 900 en 1210 zijn tussen 1994 en 2021 11 suppleties uitgevoerd (Tabel 2-1) met een totaal volume van 8,28 miljoen m³. Het merendeel van deze suppleties zijn strandsuppleties (8). Deze strandsuppleties waren, uitgedrukt in volume per strekkende meter, eerst wat hoger (1994 en 1997) en de volumes namen af met de uitvoering van de vooroeversuppleties (Figuur 2-3). Het gemiddelde strandsuppletievolume, uitgedrukt per strekkende meter suppletiegebied, bedraagt 251 m³/m. Sinds 2005 namen de volumes van de uitgevoerde strandsuppletie echter toe. Op basis van de trendlijn is deze toename 7,3 m³/m per jaar.

Het gemiddelde volume van de vooroeveroppleties bedraagt 415 m³/m. Ook bij deze oppleties is een toename in volume te observeren met een trendwaarde van 6,0 m³/m per jaar. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat deze waarde bepaald is door slechts 3 punten.

De kustlijnontwikkeling tussen raai 900 en 1210 wordt beïnvloed door de voorliggende geul (Molengat) en bank (Noorderlijke Uitlopers van de Noorderhaaks), maar ook door de uitgevoerde oppleties (Appendix A). Na oppletie verplaatst de MKL dan tijdelijk zeewaarts. Er is een duidelijke zaagtand beweging in de MKL volumes zichtbaar met een herhalingsperiode van 3 tot 4 jaar (de frequentie van de oppleties). De respons in de MKL op de strandoppleties is sterker dan die van de vooroeveroppleties. Elias (2021) concludeert dat in het interessegebied vooroeveroppleties zich niet ontwikkelen tot banken die dan langere tijd zichtbaar blijven in het profiel. Een reden hiervoor kan zijn dat brekerbanken ook voor oppletie al van nature niet aanwezig zijn ten zuiden van raai 1210. Onder invloed van de aanlanding van de NUN vormt het natuurlijke systeem hier een uniform platform met een hoogte net onder de -5 m. De oppleties worden hierin opgenomen.

Tabel 2-1: Overzicht zandoppleties Zuidwest Texel ten zuiden van raai 1210.

Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ)	
					[miljoen m ³]	[m ³ /m]
Texel-Zuidwest	1994	9.30	12.10	strandoppletie	0,761	271,8586
Zuidwest	1997	10.38	11.43	strandoppletie	0,340	323,8457
Zuid	2000	10.01	11.90	strandoppletie	0,357	188,8995
ZW / Den Hoorn	2003	9.00	11.48	Vooroeveroppletie geulwandsoppletie	0,972	392,1315
Zuidwest	2005	8.80	10.63	Strandoppletie	0,301	164,6909
Zuidwest	2007	9.00	13.92	Vooroeveroppletie geulwandsoppletie	2,000	406,7013
Zuidwest	2009	9.00	10.70	Strandoppletie	0,400	235,2941
Zuidwest	2012	9.00	12.10	strandoppletie	0,751	242,448
Midden Zuid	2012	12.00	13.12	Vooroeveroppletie	0,500	446
Zuidwest	2017	9.00	11.90	strandoppletie	0,895	308,621
Zuidwest	2021	9.00	12.98	strandoppletie	1,000	274,000
Totaal					8,280	295,902



Figuur 2-3: Weergave van de suppletievolumes tussen raai 900 en 1210 onderverdeeld in strand- en vooroeversuppleties.

2.4 Voortzetting huidige suppletie inspanning

Een schatting van de toekomstige suppletiebehoefte is gebaseerd op de in het verleden aangebrachte suppleties. Het totale suppletievolume (vooroever + strandsuppleties) is waarschijnlijk niet geheel representatief voor het benodigde sedimentvolume voor kustlijnhandhaving. De ontwikkeling van de NUN laat zien dat zandtoevoer vanaf de vooroever niet direct bijdraagt aan de MKL-volumes. Dit zand accumuleert in een platform rond de -5m NAP of wordt noordwaarts afgevoerd. De vooroeversuppleties die tussen 2003 en 2012 zijn aangebracht vertonen een gelijkwaardig gedrag en hebben ook geen directe aantoonbare invloed op de MKL-volumes (zie H2.2 en 2.3, Elias, 2021). Het meenemen van de vooroeversuppleties in de bepaling van de toekomstige suppletievolumes lijkt hier dan ook niet correct. Voor het berekenen van de toekomstige suppletie inspanning wordt aangenomen dat het strandsuppletievolume ook een goede schatting geeft voor het toekomstige kustlijnonderhoud. In deze analyse gaan we er vanuit dat de suppleties als strandsuppletie worden aangelegd, maar het is mogelijk dat in de toekomst de morfologie zodanig veranderd dat een deel als vooroeversuppletie kan worden aangebracht.

Voor het inschatten van de toekomstige suppletiebehoefte wordt er rekening gehouden met twee scenario's op basis van de grootschalige morfologische ontwikkelingen:

- 1 aanlanding van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks (NUN) vindt niet plaats in de komende 50 jaar; en
- 2 aanlanding van NUN binnen 10 jaar.

Voor beide scenario's is het verwachte suppletievolume vervolgens op twee manieren berekend:

- a) het gemiddelde volume aangelegd over de periode 2005-2021; en
- b) een toenemende trend in suppletievolume over de periode 2005-2021.

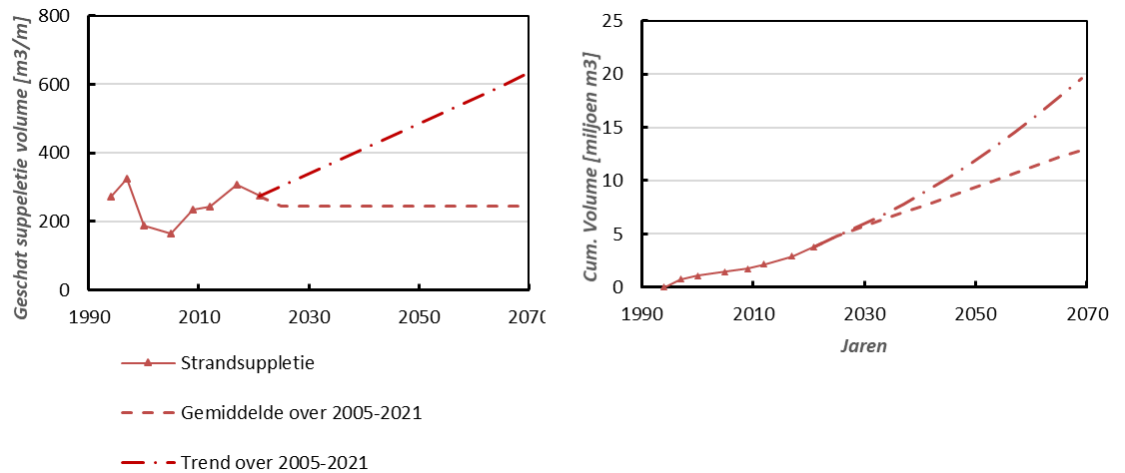
Door te kijken naar zowel de gemiddelde als de trend in de aangelegde suppletievolumes, wordt de onzekerheid in de toekomstige suppletie inspanning gekwantificeerd. Hierbij wordt aangenomen dat het huidige kustbeleid wordt voortgezet, en dus aangenomen dat de huidige kustfuncties in stand worden gehouden (o.a. waterveiligheid, recreatie en natuur). Voor het berekenen van het totale benodigd suppletievolume voor de komende 50 jaar wordt een

herhalingstijd van 4 jaar aangenomen voor de strandsuppleties. Deze herhalingstijd is gebaseerd op de suppletiefrequentie tussen 1994 en 2021 (Tabel 2-1).

2.4.1 Scenario 1; Voortzetting huidige ontwikkelingen, aanlanding van de NUN vindt niet plaats in de komende 50 jaar

Op basis van de gemiddelde suppletievolumes die in de periode 2005-2021 zijn aangebracht kan een schatting gemaakt worden van de toekomstige suppletiebehoefte (Figuur 2-4). Het gemiddelde strandsuppletievolume bedraagt 245 m³/m (Figuur 2-4, rode stippellijn). Onder de aanname dat deze suppleties over een gebied van 3 km worden aangebracht (van raai 900 tot 1200) en een herhalingstijd van 4 jaar, geeft dit voor een tijdsduur van 50 jaar een totaal geschat volume van 9,2 miljoen m³.

De geschatte suppletievolumes nemen sterk toe als de huidige trends in vergroting van de suppletievolumes zich voortzetten (Figuur 2-4 linker plot, rode punt-stippellijn) geeft het verloop van de suppletiebehoefte weer met inachtneming van deze trend van 7,3 m³/m per jaar. Wederom onder de aanname dat het suppletiegebied 3 km lang is en een herhalingstijd van strandsuppleties van 4 jaar, geeft dit een totaal volume van 17,7 miljoen m³ tussen 2022 en 2072.



Figuur 2-4: Weergave van de suppletiebehoefte (links) en de cumulatieve suppletievolumes (rechts) op basis van de gemiddelde en trends in suppletievolumes over 2005-2021.

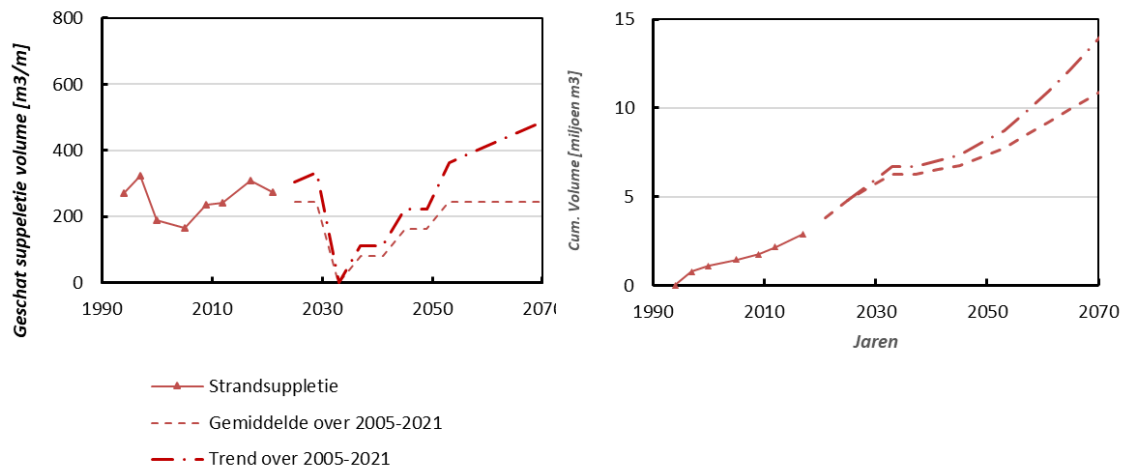
2.4.2 Scenario 2; Voortzetting huidige ontwikkelingen, aanlanding van NUN binnen 10 jaar

Gezien de grootschalige ontwikkelingen die zichtbaar zijn ten zuiden van het suppletiegebied lijkt het onwaarschijnlijk dat de huidige trends zich onveranderd in te toekomst gaan voortzetten. Elias (2021) concludeert dat het waarschijnlijk is dat de NUN zich in een periode van 10 jaar wel zal verhelen met de kustlijn. Deze verheling lijkt te gaan optreden ter hoogte van raai 800 – 900. Na verheling zal de aangrenzende kust voor langere tijd gevoed worden door het verder uitsmeren van de buitendeltabank. Hierbij moet gedacht worden aan een ontwikkeling zoals eerder geobserveerd na aanlanding van de Bornrif Strandhaak bij Ameland.

De aanlanding van de NUN zal niet de erosie van de gehele eilandkust van Texel compenseren, maar het is wel waarschijnlijk dat de erosie tussen raai 900 en 1200 afneemt of (tijdelijk) nihil zal zijn. In Figuur 2-5 is dit scenario verder uitgewerkt aan de hand van het gemiddelde en de trends in de suppletievolumes. Het precieze moment van aanlanden en de periode waarover de uitgebouwde kust weer erodeert, is lastig te voorspellen. Hiertoe zijn er, op basis van expert-judgement, een aantal aannames gedaan voor dit scenario. De strandsuppleties laten een reductie zien ten gevolge van de aanlanding. Hierbij is aangenomen dat tot aanlanding (10 jaar) de huidige suppletievolumes benodigd zijn en dat bij aanlanding

de suppletiebehoefte naar nul reduceert. Verder is aangenomen dat de suppletiebehoefte daarna in een periode van 25 jaar weer toeneemt naar de huidige volumes.

In dit scenario is er 7,6 miljoen m³ aan strandsuppletievolumen benodigd in de komende 50 jaar wanneer er wordt uitgegaan van een constant suppletievolumen van 245 m³/m met een herhalingsperiode van 4 jaar. Onder de aanname dat de huidige trends in vergroting van de suppletievolumes van 7,3 m³/m per jaar zich voortzetten (Figuur 2-5 linker plot, rode puntstippelijijn), zal er 11,2 miljoen m³ aan strandsuppletievolumen benodigd zijn in de komende 50 jaar.



Figuur 2-5: Weergave van de suppletiebehoefte (links) en de cumulatieve suppletievolumes (rechts) incl. aanlanding van de NUN.

2.4.3 Scenario 3: variant 'zandmotor' op de NUN

Binnen dit scenario zou ook de suppletievariant passen die wordt geschetst in Elias (2021), n.l. een suppletie haaks op de kust die qua vorm lijkt op de Zandmotor. Het aanlandingsgebied van de NUN rond km 11 is een geschikte locatie voor zo'n suppletievariant. In dit gebied is een ondiep platform aanwezig met een hoogte van ongeveer NAP-5 m. Dit vrij ondiepe platform kan efficiënt opgevuld worden. Een suppletie tussen raai 1050 en 1128 met een zeewaartse lengte van 1 km en een kruinhoogte van 2 m vergt ongeveer 3,5 miljoen m³. Het is de verwachting dat zo'n suppletie kustlangs verspreid en daarmee de aanliggende kustlijnen ten zuiden en noorden voor langere tijd voedt. De zuidelijke gerichte sedimenttransporten kunnen bijdragen aan de aanlanding van het eb-schild. Het is niet de verwachting dat met deze suppletie het totale aangebrachte volume op de lange termijn kleiner zal zijn dan door voortzetting van de strandsuppleties, alleen kan dit volume dan door 1 grote suppletie worden aangebracht in plaats van de 3-jaarlijkse strandsuppleties.

2.5 Samenvatting van de suppletiehoeveelheden

Bij Texel Zuidwest (raaien 900-1200) zal er naar verwachting in de komende 50 jaar tussen 7,6 en 17,7 miljoen m³ zand gesuppleerd moeten worden, onder aanname dat de huidige suppletie-inspanning wordt voortgezet. De ~10 miljoen m³ spreiding in deze schatting wordt met name veroorzaakt door de onzekerheid in de waargenomen toenemende trend in het suppletievolume en de vraag of deze zich in de toekomst voort zal zetten. In mindere mate wordt de onzekerheid ook veroorzaakt door de morfologische ontwikkeling. De getallen voor het suppletiezand van 7,6 en 17,7 miljoen m³ geven daarom een te verwachten minimum en maximum volume aan, de daadwerkelijk benodigde suppletiebehoefte ligt waarschijnlijk in het midden van deze range.

Onder de aanname dat het gemiddelde suppletievolume een representatief beeld geeft voor de toekomstige ontwikkeling ligt het verwachte suppletievolume tussen de 8 en 10 miljoen m³. Er is echter geconstateerd dat de suppletievolumes door de tijd zijn toegenomen. Het meenemen van deze vergroting in de schatting van toekomstige volumes resulteert in een toekomstig volume tussen de 11 en 18 miljoen m³.

Tabel 2-2 Samenvatting verwachte suppletie inspanning voor alle scenario's bij Texel ZW

Scenario	gem. volume per suppletie	Terugkeertijd suppleties	Cumulatief volume (miljoen m ³) benodigd komende 50 jaar
1a. Voortzetting huidige ontwikkelingen: gemiddelde trend	245*4=980 m ³ /m	Strandsuppletie elke 4 jaar	9,2
1b. Voortzetting huidige ontwikkelingen: toenemende trend	Neemt toe per suppletie met 7,3*4=29,2 m ³ /m per suppletie	Strandsuppletie elke 4 jaar	17,7
2a. Aanlanding van NUN: gemiddelde trend	245*4=980 m ³ /m	Strandsuppletie elke 4 jaar	7,6
2b. Aanlanding van NUN: toenemende trend	Neemt toe per suppletie met 7,3*4=29,2 m ³ /m per suppletie	Strandsuppletie elke 4 jaar	11,2
3. variant 'Zandmotor' op de NUN		Eenmalig + strandsuppleties	7,6 – 11.2

3 Havenstrand Vlieland

3.1 Overzicht van de probleemlocatie

Het Havenstrand is het meest zuidoostelijk deel van het zandige kering rondom Vlieland bij JarKus raai 5480 (Figuur 3-1). De gehele eilandkop van Vlieland is van oudsher aan erosie onderhevig. De voorliggende geul Vliesloot speelt hierin een belangrijke rol. Het interesse gebied voor deze probleemlocatie richt zich met name op het Havenstrand (raai 5480) en de BKL-overschrijdingen van raai 5440 en 5460.

Het Havenstrand is onderdeel van het voorland van de primaire kering. Door de verder landinwaartse ligging van de primaire kering wordt dit stuk van de kering niet volledig beoordeeld volgens de eisen van een primaire kering op basis van het WBI2017. Het overgang bij het Havenstrand had ter plaatse een functie als toegang tot het strand voor de hulpdiensten. Door problemen met de stabiliteit en bereikbaarheid van het strand is de strandopgang recentelijk naar het noordoosten verlegd zodat die uitkomt op de teen van het strandhoofd. Landwaarts van het Havenstrand is permanente economische activiteit. Kustrecreatie is beperkt en de functie van dit deel van de kust is met name het behoud van natuurwaarden.

Bij de noordelijk gelegen raaien 5440 en 5460 is de huidige BKL op dit moment niet eenvoudig handhaafbaar. Daarnaast is de BKL niet gedefinieerd vanaf raai 5460 tot het Havenstrand. Landwaartse verlegging van de BKL lijkt geen oplossing gezien de aanwezige infrastructuur bij het Havenstrand.



Figuur 3-1: De noordoostelijke eilandkop van Vlieland met daarin de resultaten van de toetsing van de kustlijn (2021). Bij het Havenstrand ligt de TKL landwaarts van de BKL en is de trend negatief. Onder: een overzicht van ligging van het droogvallende strand en duinen aan de hand van de 2021 LiDAR meting (De gele balken geven de ligging van de strandhoofden weer) (links) en een satellietopname van 04-12-2020 (rechts).

3.2 Morfologische karakterisering (T0)

In een uitgebreide evaluatie van de in 1995 aangebrachte verdedigingswerken die is uitgevoerd door Teerenstra (1999) staat dat de zeewaartse constructie van noordoost Vlieland goed voldoet. Ten noorden van de strekdam heeft de vooroever zich uitgebreid waardoor de as van de geul zich over een afstand van 50 tot 100 meter heeft verschoven. Ten zuiden, tussen het aangebrachte strandhoofd en de strekdam, is het strand in eerste instantie licht geërodeerd. Dit zand is in de vooroever terecht gekomen. De plaats van de kustlijn is sinds het uitvoeren van de werkzaamheden nagenoeg gelijk gebleven.

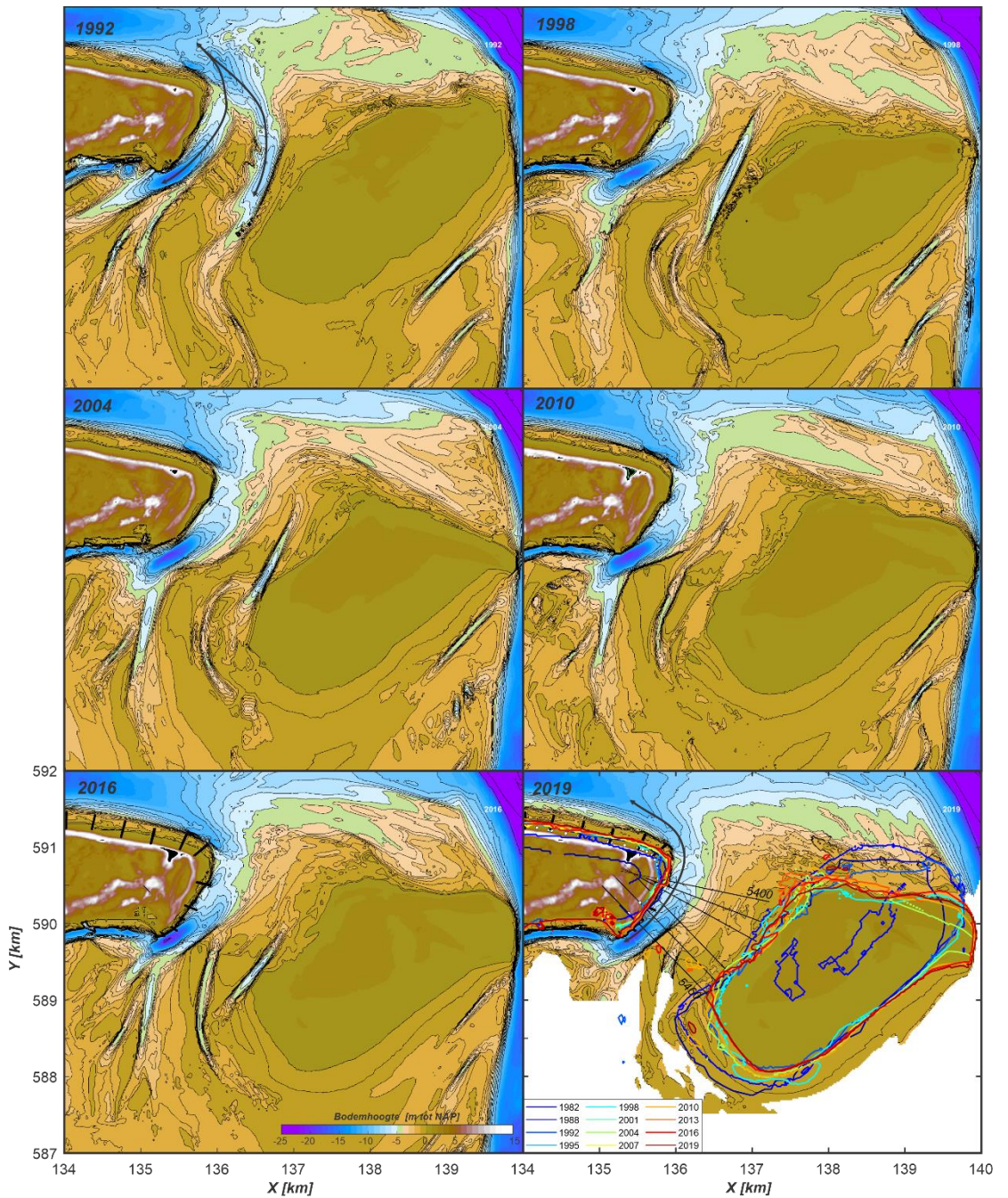
De morfologische veranderingen in Figuur 3-3 illustreren de uitbouw van de kust tussen strekdam 63 en 64. Ook ten zuiden van strekdam 64 is een invulling te zien, echter niet zo groot als aan de noordkant. In het laatste kustvak, tussen de laatste strekdam en het havenhoofd is het lastig de kustlijn te handhaven. In dit gebied tussen raai 5450 en 5460 zijn dan ook veelvuldig kleine suppleties uitgevoerd (zie H3.3). Het is bijna onmogelijk de kustlijn tot zeewaarts van de BKL te herstellen omdat het strand grenst aan een diepe getijdengeul (Vliesloot). Het gesuppleerde zand op het strand wordt snel afgevoerd door de sterke stroming door de Vliesloot vlak langs het strand. De frequente uitvoering van suppleties zorgt er wel voor dat de kustlijn van het havenstrand niet verder landwaarts verplaatst.

De ontwikkeling van Vliesloot wordt in meer detail weergegeven in Figuur 3-2. In 1992 lagen er nog 2 geulen, gescheiden door een langgerekte bank, om de kop van Vlieland heen. Links hiervan ligt dan het grote bankoppervlakte van Richel. De 2-geulenconfiguratie is in 1998 al verdwenen en sindsdien ligt er 1 geul (Vliesloot) tussen Richel en het Eiland. Het diepste deel van de geul ligt direct langs het Havenstrand. Er zijn wel kleine veranderingen in de aansluitende geulen en de bankcomplexen ten zuiden en oosten van Vliesloot zichtbaar, maar het diepe geulgedeelte blijft gedurende de gehele periode langs het Havenstrand liggen. De huidige configuratie met 1 diepe geul langs het Havenstrand zal ook in de toekomst (~50 jaar) wel gehandhaafd blijven, de ontwikkeling van de Richel en Vliesloot over de afgelopen ~20 jaar geven geen indicatie dat er een nieuwe geul gaat vormen. Hierdoor is het niet de verwachting dat er een grote verandering langs de kust zal optreden.

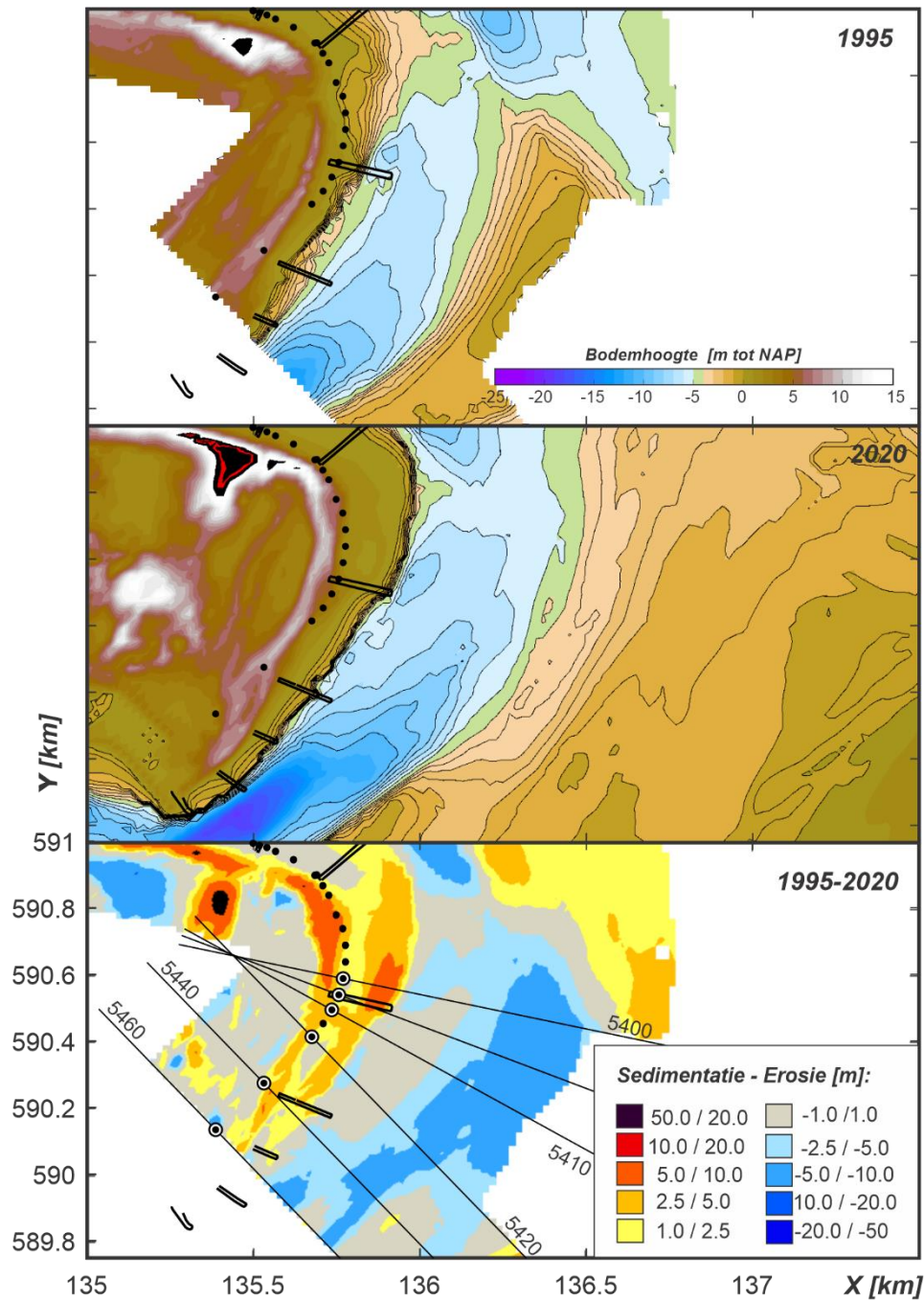
Een gedetailleerd beeld van de ontwikkeling in het kustvak is weergegeven in Appendix B, Figuur B- 1 tot Figuur B- 6. In de dwarsraaien worden de totale ontwikkelingen van het dwarsprofiel (1980-2020) en de recente veranderingen (2010-2020) getoond. Ter hoogte van strekdam 64 (raai 5405) blijft in de recente metingen de Vliesloot stabiel liggen. De bodem vertoont wel jaarlijkse variaties maar niet een duidelijke trendmatige verplaatsing. Ten opzichte van de oudste opname (1980) is wel een verkleining van het doorstroomoppervlakte te observeren. In zuidelijke richting vertoont de Vliesloot wel een kleine verplaatsing. In raaien 5420-5480 verplaatst de geulwand landwaarts. Deze verplaatsing is klein aan de eilandzijde, maar aan de waddenzijde van de geul is duidelijk een verplaatsing van de bovenkant van de geul richting het eiland te observeren. Hierdoor versteilt de westelijke geulwand van Vliesloot. De maximale geuldiepte neemt toe in raai 5440, maar blijft over de afgelopen 20 jaar redelijk stabiel in de overige raaien. De toename in diepte en versteiling van de westelijke geulwand houden het doorstroomoppervlak redelijk stabiel in raai 5440 in de afgelopen tien jaar. In de zuidelijkere raaien 5460-5480 blijft de diepte redelijk stabiel en is een afname van het doorstroom oppervlak te zien.

Een harde uitspraak over de ligging en vorm van de Vliesloot op een termijn van 50 jaar is eigenlijk niet te maken. Op basis van de geobserveerde stabiliteit van het systeem is de beste inschatting dat de Vliesloot in zijn huidige vorm ook in de toekomst wel aanwezig zal blijven. Bij het waarborgen van de stabiliteit van de strand- en havenhoofden kan de geul niet veel verplaatsen en een significante toename van de diepte ontstaat alleen als er veel meer komberging aan de Vliesloot toebedeeld wordt of als de geuldoorsnede verkleint. Beide

effecten lijken ter plaatse van het Havenstrand nog niet het geval te zijn. De huidige diepte en ligging lijken dan het meest voor de hand liggend als schatting voor de toekomst.



Figuur 3-2: Morfologische veranderingen rond de eilandkop en Richel tussen 1992 en 2019.



Figuur 3-3: Morfologische veranderingen in de kustzone (onder) op basis van de 1995 (boven) en 2020 bodems (midden).

3.3 Suppleties en overige ingrepen

Al in 1976 is begonnen met het intensief verdedigen van de kust en zijn er tussen raaien 5370 en 5460 veelvuldig kustverdedigingsmaatregelen uitgevoerd (zie o.a. Steyaert et al., 1999; Van Heuvel, 1999). Een serie van stormen veroorzaakte begin 1994 kustafslag met plaatselijk een dreiging van doorbraak van de zeereep. Dit leidde in 1995 tot een serie maatregelen, waardoor de huidige kustlijn gevormd werd;

- Ter hoogte van raai 5406 is een groot strandhoofd of strekdam geconstrueerd (strekdam 64 in Figuur 3-1). Deze strekdam heeft, gemeten vanuit de duinvoet, een lengte van circa 200 meter.
- Ter hoogte van raai 5430 is een ondersteunend strandhoofd geplaatst en is een strandsuppletie (200.000 m³) aangelegd, waarbij ca. 75.000 m³ uit de Vliesloot werd gebaggerd.
- Tussen raai 5430 en 5460 zijn nog drie kleine strandhoofden (ten oosten van het Havenstrand) aangelegd met vrijkomende stenen van eerdere duinvoetverdediging in 1991. Ook is hier de duinvoet bestort met breuksteen, om erosie bij hoogwater te voorkomen. De drie kleine strandhoofden zijn relatief kort en niet gefundeerd op een zinkstuk op de geulbodem, en voorkomen waarschijnlijk maar deels strand- en geulerosie.
- Het Havenstrand is het meest zuidoostelijk deel van het zandige kering rondom Vlieland bij JarKus raai 5480. Aan de westzijde van het Havenstrand bevindt zich een havenhoofd, waar de geulwand is bestort. Er zijn geen aanwijzingen dat de oostelijke helft van het Havenstrand bestort is.

Sinds 1995 zijn er frequent suppleties aangebracht tussen raai 5370 en 5480 om het Havenstrand begaanbaar en in stand te houden. Er is een extra zanddepot beschikbaar om de calamiteiten route vanaf het strandhoofd beschikbaar te houden. In het huidige suppletieprogramma staat een suppletie voor het Havenstrand (inclusief het depot) gepland voor 2022-2023, gezien er momenteel al BKL-overschrijdingen zijn. In totaal zijn er 10 strand- en/of duinsuppleties aangebracht met een interval tussen de 2 en 6 jaar. Deze suppleties zijn relatief klein. Met uitzondering van de suppleties uitgevoerd in 1995 ligt het totale volume per suppletie tussen de 20.000 en 30.000 m³. Het gemiddelde volume per strekkende meter ligt op 100 m³/m in de periode 2001-2018. De gemiddelde lengte per suppletie bedraagt hierbij 250 m.

Tabel 3-1: Overzicht suppleties Vlieland Havenstrand.

Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ)	
					[10 ³ m ³]	[m ³ /m]
Noordoosthoek	1995	53.70	54.40	strand-duinsuppletie	80	114
Noordoosthoek	1995	53.70	54.40	strand-duinsuppletie	111	159
Havenstrand	2001	54.55	54.85	strandsuppletie	20,5	68
Havenstrand	2005	54.60	54.85	strandsuppletie	20	80
Havenstrand	2007	54.60	54.85	duinverzwaring	30	120
Havenstrand	2009	54.60	54.85	strandsuppletie	20	80
Havenstrand	2013	54.60	54.80	strandsuppletie	20	100
Depot Havenstr.	2018	54.10	54.20	strandsuppletie	20	200
Havenstrand ¹	2018	54.40	54.80	strandsuppletie	20	50
Totaal					341,5	

¹ Tot 2017 werd het volume op het Havenstrand aangebracht middels rainbowen, bij de laatste strandsuppletie is het met een bulldozer verreden. Dit laatste vanwege verminderde initiële verliezen en kans op strandvallen. Nog steeds is overigens het initieel verlies hoog (in 2018 was zo'n 70% van het volume nog in het profiel bij de uitpeiling kort naar aanleg).

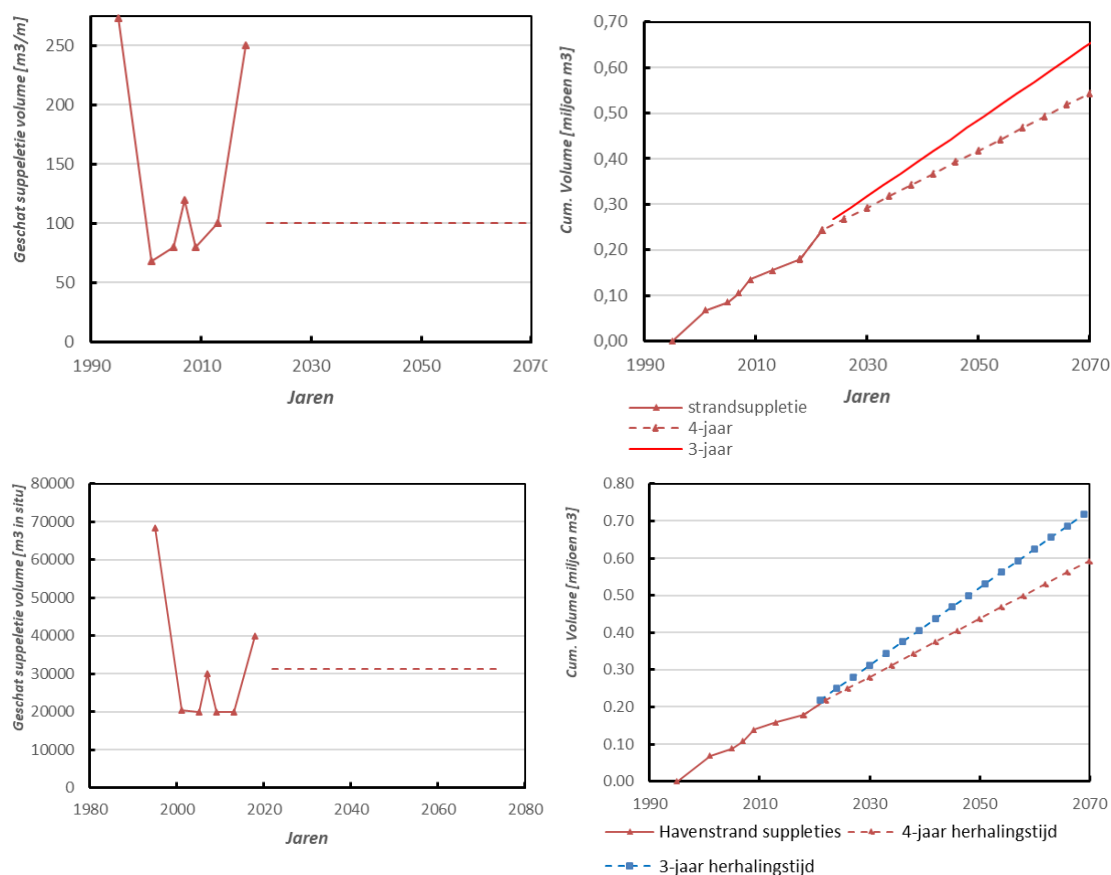
3.4 Voortzetting huidige suppletie inspanningen

3.4.1 Scenario 1; Voortzetting huidige ontwikkelingen (gemiddeld)

Op basis van de opgetreden morfologische verandering is het niet waarschijnlijk dat de suppletiebehoefte hier in de toekomst sterk gaat veranderen. Op basis van de gemiddelde suppletiebehoefte van 31.000 m³ per suppletie op het Havenstrand (gemiddelde lengte van het suppletiegebied van 250 m), kan een schatting van de toekomstige suppletiebehoefte worden gemaakt (Figuur 3-4). De schatting voor toekomstig suppletievolume wordt hierbij gemaakt voor een frequentie van 3 en 4 jaar.

De huidige suppleties vinden tussen de 2 en 6 jaar plaats met een gemiddelde frequentie van 3 jaar. Onder deze aanname moet over een periode van 50 jaar 0,53 miljoen m³ worden gesuppleerd. Dit volume reduceert tot 0,37 miljoen m³ als een frequentie van 4 jaar wordt aangehouden.

Voor het berekenen van de te verwachten kosten bij voortzetting van de huidige suppletie inspanningen, is het van belang dat op dit moment het meest zuidelijke deel (Havenstrand) niet direct gesuppleerd kan worden. Het zand wordt hier per as getransporteerd. Dit is een relatief dure uitvoeringsmethode.



Figuur 3-4: Weergave van de suppletiebehoefte (links) en de cumulatieve suppletievolumes (rechts).

3.5 Samenvatting van de suppletiehoeveelheden

Bij Vlieland Havenstrand (raaien 5440-5480) zal er naar verwachting in de komende 50 jaar tussen 0,37 en 0,53 miljoen m³ zand gesuppleerd moeten worden, onder aanname dat de huidige suppletie-inspanning wordt voortgezet. Op basis van de opgetreden ontwikkeling is het niet waarschijnlijk dat de erosie problematiek van het Havenstrand in de toekomst zal veranderen.

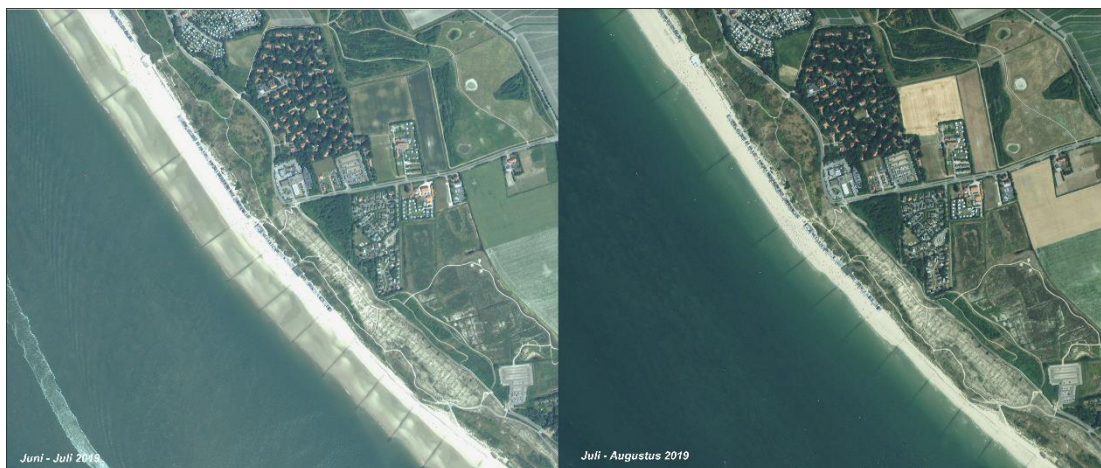
Tabel 3-2 Samenvatting verwachte suppletie inspanning voor alle scenario's bij Vlieland Havenstrand

Scenario	gem. volume per suppletie	Terugkeertijd suppleties	Cumulatief volume (miljoen m ³) benodigd komende 50 jaar
1. Voortzetting huidige ontwikkelingen: gemiddelde trend	100 m ³ /m	Strandsuppletie elke 3-4 jaar	0,53 – 0.37

4 Dishoek-Vlissingen

4.1 Overzicht van de probleemlocatie

De kustzone tussen Dishoek en Vlissingen wordt gekarakteriseerd door een enkel, relatief steil en smal duin (Figuur 4-1). Hier aan grenzend ligt een smal strand ingeklemd tussen duin en voorliggende geul. De geul ligt vrijwel stabiel na de aanleg van strekdammen (Figuur 4-1). Aanleg van deze strekdammen begon in 1856 net ten noorden van Vlissingen en werd tussen 1861 en 1866 in noordelijke richting verlengd. Deze strekdammen hebben de verplaatsing van de geulen significant vertraagd, maar suppleties blijven nodig om de kustveiligheid op peil te houden.



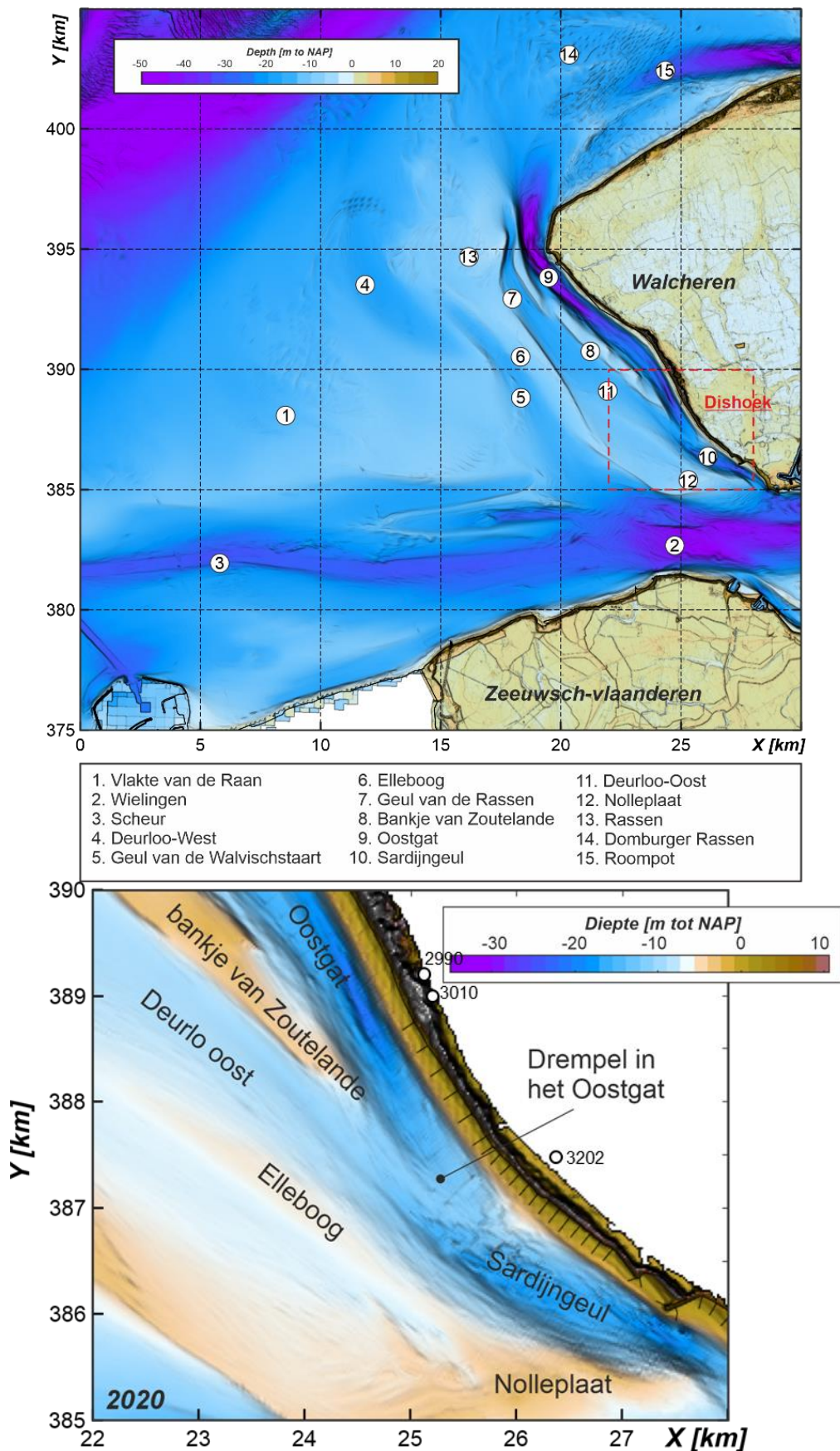
Figuur 4-1 Satellietopname bij Dishoek representatief voor laagwater (links) en hoogwater (rechts). Tijdens laagwater zijn de strekdammen duidelijk zichtbaar. Tussen deze dammen bevindt zich een intergetijde- strand dat aan de zeezijde abrupt over gaat in de voorliggende geulen. Tijdens hoogwater blijft er slechts een smalle, droge strandzone over.

Tijdens hoogwater is er slechts een smal strand aanwezig. Langs de kust van Walcheren liggen de geulen Oostgat en Sardijngeul, met ter plaatse van de overgang een drempelgebied (Figuur 4-2). Deze drempel ligt ter hoogte van Jarkus raaien 3110 – 3215, en wordt regelmatig gebaggerd om deze op diepte te houden ten behoeve van de scheepvaart. Voor 2014 werd de Sardijngeul reactief onderhouden (wanneer nodig), en sinds 2014 wordt de vaargeul proactief gebaggerd (jaarlijks). Iedere keer wordt ca. 200.000 m³ gebaggerd².

Zeewaarts van de geulen ligt een complex gebied van banken en ondiepe geulen. Ten noorden van het dempelgebied, naast het Oostgat strekt het Bankje van Zoutelande zich uit tot ongeveer Westkapelle. Ten zuiden van het drempelgebied ligt het bankengebied van de Nolleplaat waar ook een klein langgerekte bankje Elleboog ligt. Tussen deze twee banken ligt een ondiepe geul Deurloo oost met een NW-ZO oriëntatie. Ook het Deurloo Oost komt op het drempelgebied uit waardoor er op de drempel 3 geulen samenkomen.

Het baggeren van de geul staat in contrast met het suppleren van de naastliggende stranden. Ondanks frequent suppleren blijkt de BKL voor de raaien 2990, 3010 en 3202 moeilijk te handhaven. In deze raaien trekt de kust in deze raaien gemiddeld met 3,5 tot 6 m/jaar terug.

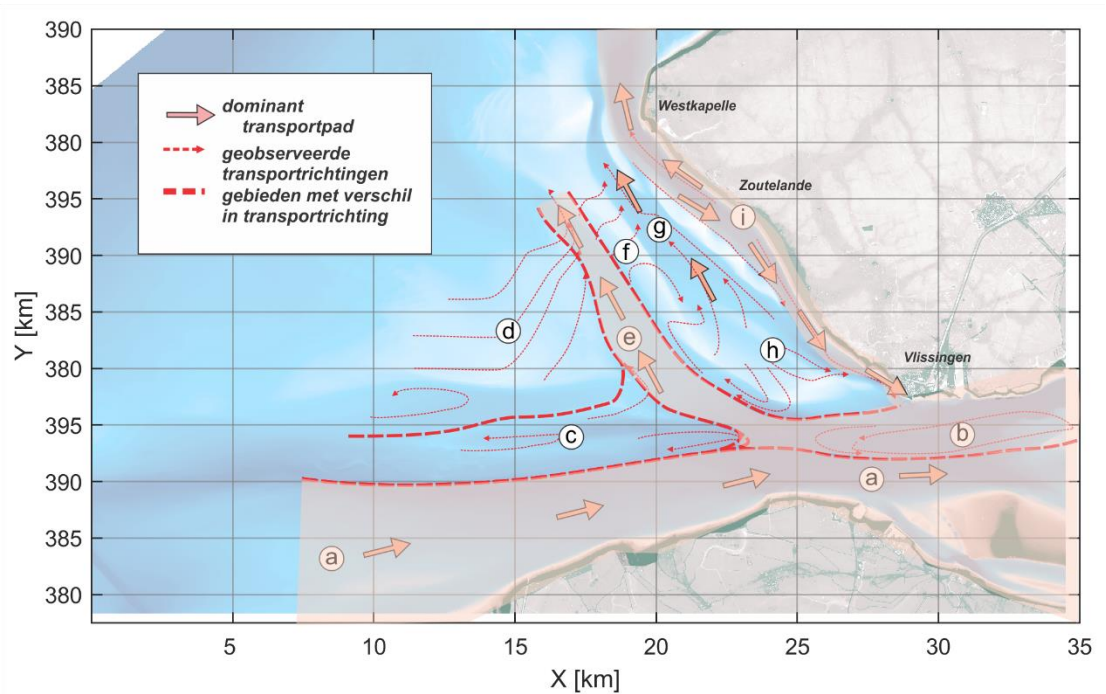
² Marian Lazar, persoonlijke communicatie, september 2022



Figuur 4-2 Een overzicht van de Westerscheldemonding (boven) en detailweergave van het gebied rond de probleemlocatie Dishoek (onder)

4.2 Morfologische karakterisering

In de studie van Elias et al. (2021) zijn SedTRAILS analyses uitgevoerd om sedimenttransportstromen rond het Bankje van Zoutelande in kaart te brengen. Figuur 4-3 geeft een conceptuele beschrijving van de werking van het sedimenttransportsysteem van de Westerscheldemonding. Op basis van de gemodelleerde transportpaden kan de monding in een aantal gebieden met verschillend gedrag worden onderverdeeld dat relevant is voor het interessegebied in deze studie naar Dishoek-Vlissingen:



Figuur 4-3: Een conceptuele beschrijving van de jaargemiddelde sedimenttransporten op de Westerscheldemonding. Elias et al. (2021).

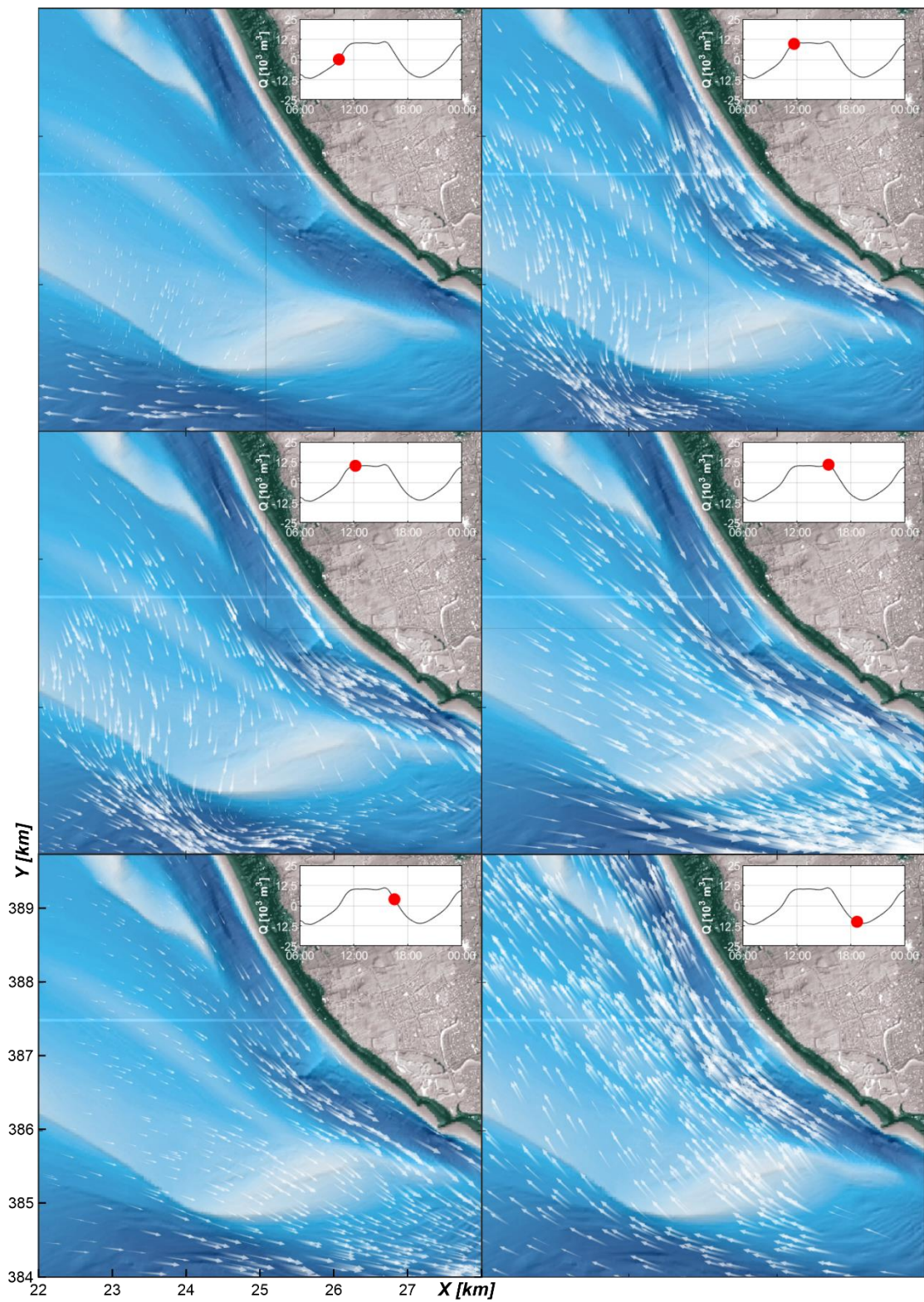
(h). *Noord van de Nolleplaat.* In de Deurloo oost vindt een divergentie plaats van de transporten. Het merendeel van de geul vertoont een noordwestelijk gericht transport, maar het zuidelijke deel, boven de Nolleplaat, laat juist een zuidoostelijk gericht transport zien. Deze transporten splitsen zich. De eerste component is oostelijk gericht en voedt via de noordzijde van de Nolleplaat de Sardijngeul. De tweede component is westelijk gericht en voedt de Geul van de Walvischstaart.

(i). *Oostgat.* De transporten in het Oostgat laten een tweedeling in transportrichting zien. Langs het Bankje van Zoutelande zijn de transporten zuidoostelijk gericht. Langs de kust zien we een divergentiepunt net ten zuiden van Zoutelande. Transporten aan de noordzijde van dit divergentiepunt zijn noordelijk gericht en voeden uiteindelijk de Domburger Rassen. Transporten aan de zuidzijde van het divergentiepunt zijn zuidelijk gericht, in de richting van de Sardijngeul.

Grootschalig wordt de getijstrooming en het transport gedreven door de waterstandsgradiënten. Het ontstaan van dit divergentiepunt heeft waarschijnlijk te maken met de lokale beïnvloeding van de getijstrooming door enerzijds de knik in de kustlijn net ten zuiden van Zoutelande en anderzijds de versnelling van de stroming om Zoutelande heen. Deze versnelling van de stroming domineert de stromingen en transporten in het Oostgat ten noorden van Zoutelande. Ten zuiden hiervan wordt de stroming gedreven door de grootschalige verhangen en is de geul volgend.

Op basis van de resultaten van een getijsimulatie zijn in Figuur 4-4 de stromingen in het drempelgebied in detail weergegeven. De getijsimulatie geeft een gemiddeld getij weer. Wat opvalt is de lange periode van hoge zuidgaande stroming (richting de Westerschelde) en een relatief korte periode van noordgaande stroming (richting het Oostgat).

Minimale stromingen zijn aanwezig bij kentering van eb naar vloed (Figuur 4-4a). In de Sardijngeul en Oostgat zijn vrijwel geen stromingen aanwezig. In de Wielingen zijn dan nog wel westelijk gerichte eb-stromingen zichtbaar. Het duurt ongeveer 2 uur voordat maximale debieten door het Oostgat worden bereikt (Figuur 4-4b 12:00). Over het drempelgebied staan dan grote vloed-dominante stromingen, naar de Sardijngeul gericht, van ongeveer (0,8 – 1,0 m/s). Tussen 12:00 en 14:00 blijven deze vloedstromingen dan het drempelgebied domineren (Figuur 4-4c). De stroming neemt tussen 14:00 en 15:00 en is maximaal rond 16:00 ((Figuur 4-4d). In de Sardijngeul, net ten zuiden van de drempel, worden dan stromingen van meer dan 1,5 m/s berekend. De stroming neemt hierna sterk af en de stroming is tussen 17:00 en 18:00 minimaal. Na kentering nemen de eb-stromingen snel toe. Deze bereiken dan om 19:30 een maximale snelheid tussen 1-1,5 m/s. De periode van piek eb-stroming is kort in vergelijking met de piek vloed-stroming . De asymmetrie in duur van de eb- en vloedpiek verklaart de sterke vloeddominantie van het Oostgat zoals ook geschetst in het conceptueel model (Figuur 4-3).



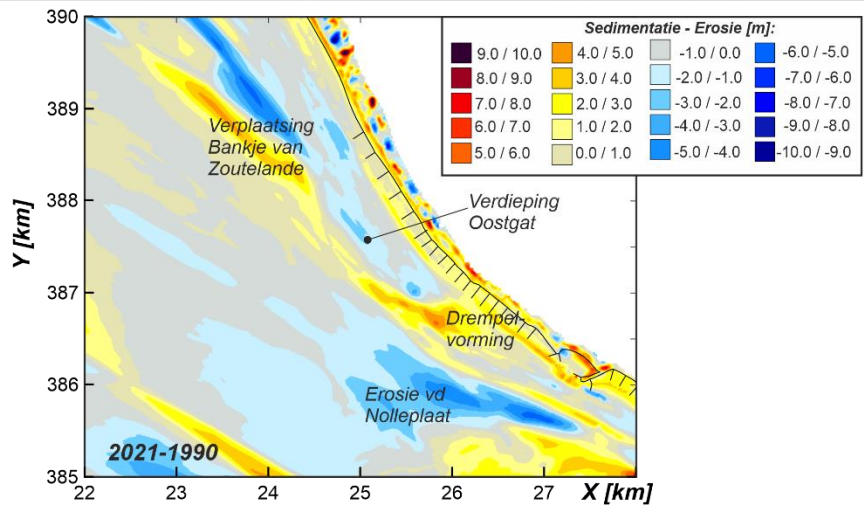
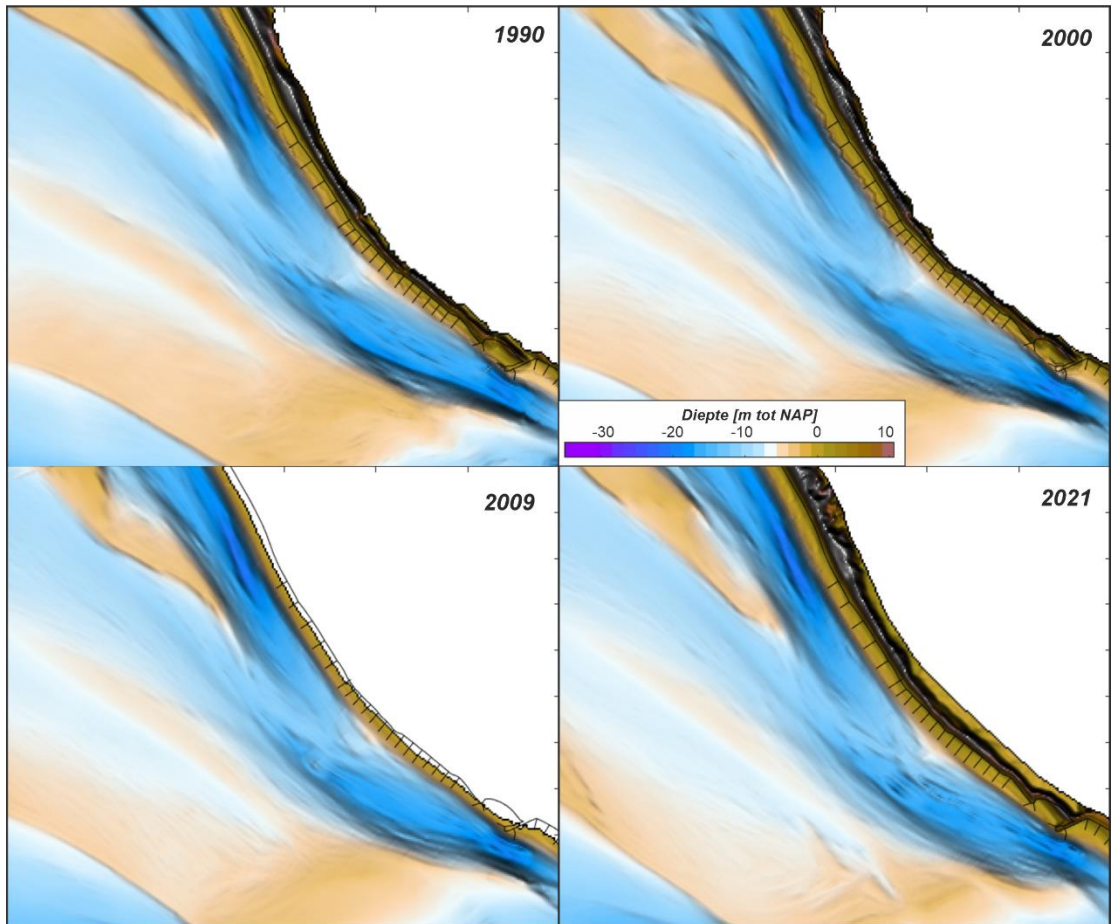
Figuur 4-4: Dieptegemiddelde getij-gedreven stromingen in het drempelgebied. Inset toont de debieten door een raai in het Oostgat (bron: Elias et al. 2021).

De morfologische veranderingen in het drempelgebied over de periode 1990-2021 worden geïllustreerd in Figuur 4-5. Op het eerste gezicht vertonen de getoonde bodems vergelijkbare kenmerken over de beschouwde periode. In alle bodemdata blijven de geulen (Oostgat, Sardijngeul en Deurloo Oost) aanwezig. Langs deze geulen zijn de banken Nolleplaat en Bankje van Zoutelande aanwezig. Het drempelgebied vertoont door alle metingen een karakteristieke driehoekige vorm die aan de kust vast zit en overgaat in een drempel die Oostgat en Sardijngeul van elkaar scheidt. De driehoek-vormige bank blijft in alle bodemopnamen zichtbaar. Het is niet direct duidelijk of de stabiliteit gerelateerd is aan onderliggende erosieresistente lagen. Het lijkt wel waarschijnlijk dat de interpolatie van de metingen een rol speelt in de scherpe lijnen die zichtbaar zijn.

Een verschilkaart van de sedimentatie-erosie tussen 1990 en 2021 geeft een beter inzicht in de morfologische veranderingen. Voor een groot deel van het gebied zijn de verschillen beperkt en vallen in de ± 1 m klasse. Een groter verschil is te zien bij de zuidelijke punt van het Bankje van Zoutelande. Dit bankje verplaatst zich iets zuidwaarts en zeewaarts. Aan de geulzijde (bij het Oostgat) nemen de dieptes lokaal toe. Doordat de verdieping op een steile geulwand gebeurd is de hoogteverandering relatief groot (>5 m). Naast dit erosiegebied ligt dan een gebied van aanzanding, deze afwisseling van sedimentatie-erosie geeft aan dat het bankje iets zeewaarts is verplaatst en verlengt.

Ook op de Nolleplaat zijn relatief grote veranderingen te observeren. De noordzijde van de plaat vertoont een significante erosie. Hier lijkt de Sardijngeul de bank te eroderen. Een deel van dit sediment wordt zuidelijk op de Nolleplaat afgezet. Deze erosie heeft waarschijnlijk te maken met de grote zuidelijk gerichte stromingen die vanaf het drempelgebied optreden (Figuur 4-3). Van de Werff et al. (2016) geven aan dat na baggeren van de drempel, de driehoek zich terug lijkt te herstellen. Dit zou impliceren dat natuurlijke aanzanding een rol speelt. Deze studie geeft ook aan dat de uitgevoerde suppleties langs de kust het drempelgebied nauwelijks beïnvloeden.

Het drempelgebied vertoont netto een aanzanding. Ten opzichte van 1990 ligt de 2021 bodem lokaal tot 4 m hoger. Deze grote hoogte toename komt vooral doordat er zich aan weerszijden van de drempel diepe geulen bevinden. Een opvulling van de geul, door bijvoorbeeld verbreding van de drempel, geeft dan een relatief grote toename in hoogte.



Figuur 4-5: Een overzicht van de morfologische veranderingen tussen 1990 en 2021.

Kustlijnontwikkelingen in detail

Een gedetailleerde weergave van de ontwikkeling van de kustzone is uitgevoerd door analyse van geselecteerde dwarsprofielen. De bijbehorende figuren zijn weergegeven in Figuur 4-6 en Figuur 4-7. De figuren met de dwarsprofielen van naastgelegen raaien 3153 en 3010 zijn te vinden in Appendix 6C.

Raai 2990 (Figuur 4-6)

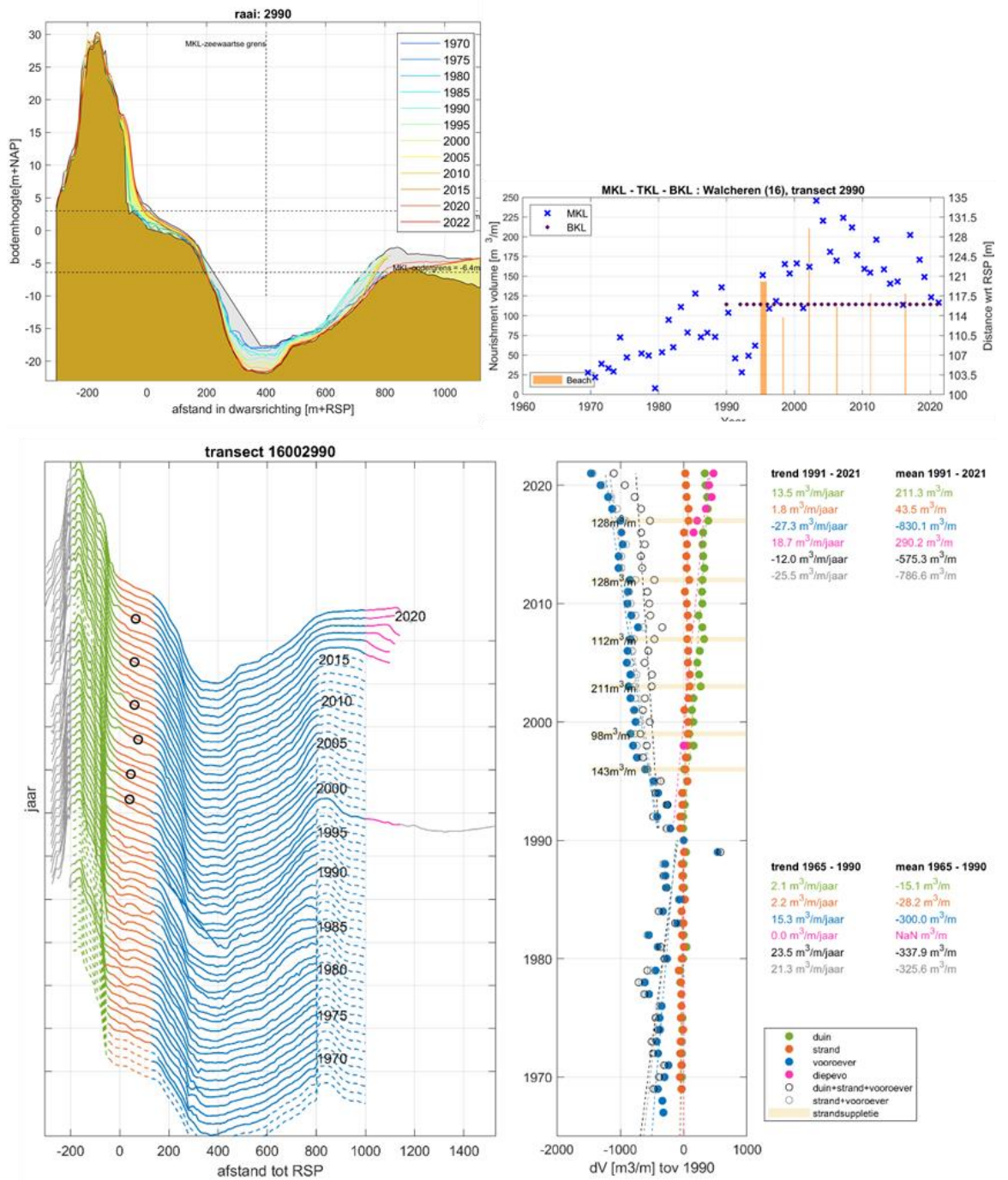
Raai 2990 ligt ten noorden van het drempelgebied en doorsnijdt het Oostgat en het zuidelijke uiteinde van het Bankje van Zoutelande. Het Bankje ligt altijd onder de laagwaterlijn met een maximale hoogte rond de NAP-3m. Landwaarts hiervan is het Oostgat sinds 1990 langzaam in diepte toegenomen tot een diepte van meer dan 20m. Een steile geulwand vormt de verbinding met het strand. De strandzone varieert in hoogte met een bandbreedte van 1 tot 2 m t.o.v. NAP, gerelateerd aan de uitgevoerde strandsuppleties. De strandsuppleties zorgen ervoor dat sinds 2000 de MKL over het algemeen zeewaarts van de BKL ligt.

Voor 1990 lag de MKL tot 100 m landwaarts van de BKL, maar is dan wel overwegend zeewaarts gericht. In 1990 lag de MKL dan rond de BKL. Er is een sterke terugtrekking tussen 1990 en 1992. De suppletie van 1995 zorgt ervoor dat de MKL zeewaarts van de BKL komt te liggen. Sindsdien worden hier elke 3 tot 5 jaar nieuwe suppleties uitgevoerd en blijft de MKL-zone 5 tot 10 m zeewaarts van de BKL liggen. Na suppletie verplaatst de MKL zeewaarts en neemt gemiddeld met 2 tot 3,5 m/jaar terug af tot de volgende suppletie weer plaatsvindt. In het profiel is te observeren dat de geuldiepte van het Oostgat hier sinds 1970 is toegenomen van -18 naar -21 m NAP. Het profiel boven de -5 m NAP is juist in hoogte toegenomen. Ook de duinenrij (tot 15 m NAP) is zeewaarts verplaatst. Het merendeel van deze veranderingen vond plaats tot 2008. Het profiel is over de periode 2008-2020 vrijwel gelijk gebleven.

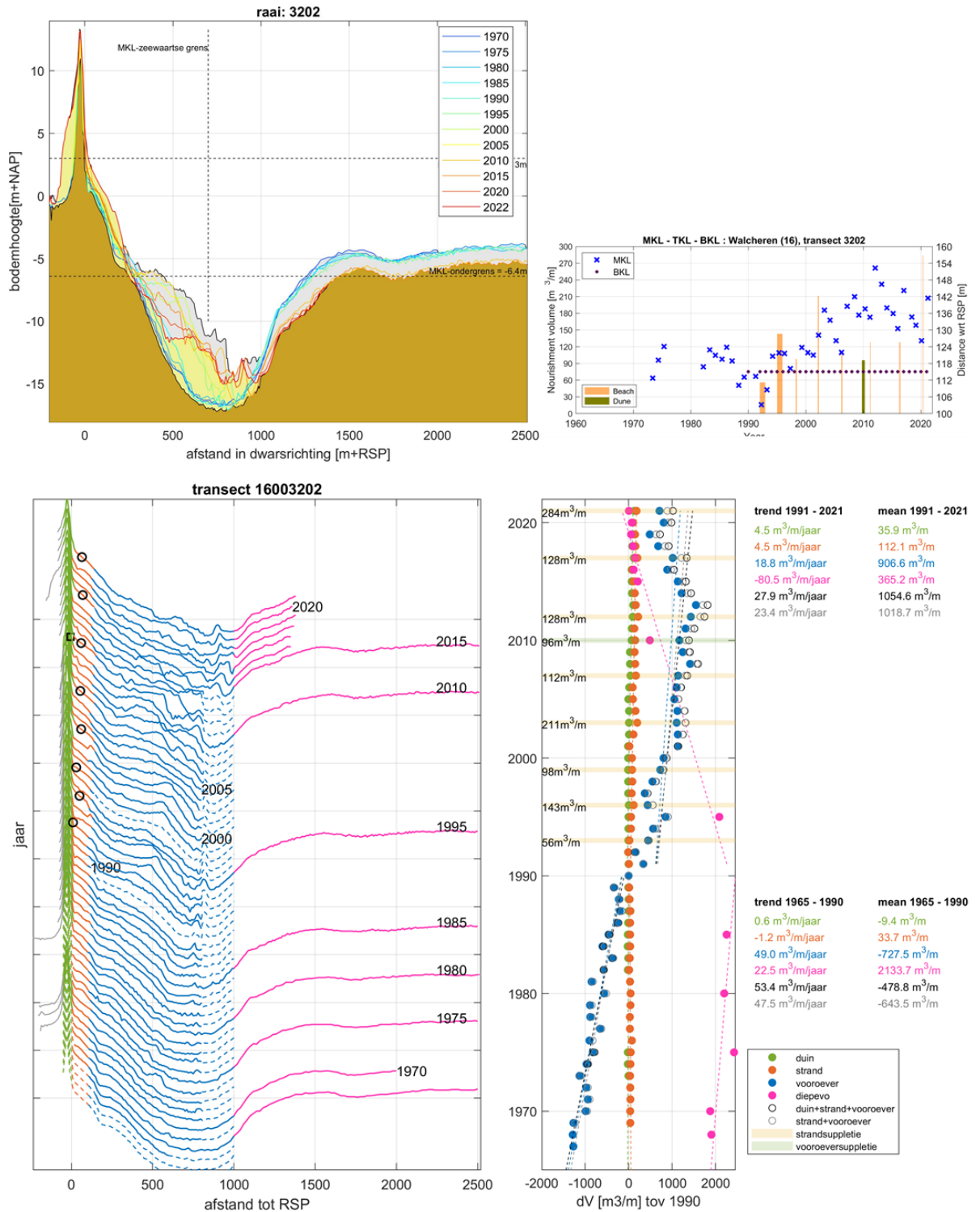
Raai 3202 (Figuur 4-7)

Raai 3202 ligt centraal in het drempelgebied. In deze raai vallen 2 zaken op. Ten eerste vindt een verlaging van het zeewaartse deel op (> 100m tot RSP). Deze raai doorsnijdt de ondiepe geul Deurloo Oost. Deze geul lijkt in de recente metingen zo'n 2m dieper dan in de oudere metingen.

In het diepe deel van de geul (< 1000m tot RSP) is een tweedeling in gedrag te zien. In het deel beneden de -5m dieptecontour valt vooral de grote variatie in diepteligging op. De geuldiepte ligt maximaal op -16m maar variaties van 5m in hoogte treden op. De 2021 bodem ligt ongeveer in het midden van de bandbreedte van de fluctuaties. Boven de -5m contour is de variatie in diepte veel geringer. Hier is de kust over het algemeen wat zeewaarts verplaatst. Een steile, smalle strandzone sluit direct aan op de duinen. De timestack van profielontwikkeling laat zien dat het geulprofiel sinds 1970 veranderd is. Tot ongeveer 1985 was de landwaartse geulwand veel steiler. De geulwand lijkt sindsdien wat flauwer te zijn geworden. Mogelijk is dit een indirect gevolg van de uitgevoerde suppleties.



Figuur 4-6: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 2990 d.m.v. het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1970-2021) in 5-jaars interval (linksboven), MKL-ontwikkeling (rechtsboven) en een timestack (links onder) met de volumeontwikkeling per kustzone.



Figuur 4-7: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 3202 d.m.v. het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1970-2021) in 5-jaars interval (linksboven), MKL-ontwikkeling (rechtsboven) en een timestack (linksonder) met de volumeontwikkeling per kustzone.

4.3 Suppleties en overige ingrepen

In de periode 1992 tot 2020 is er gemiddeld elke 3 jaar een strandsuppletie uitgevoerd rondom Dishoek. Door de aanwezigheid van de diepe geul Oostgat zijn vooroeversuppleties niet mogelijk en worden suppleties hier uitgevoerd in de vorm van een strandsuppletie. De BKL is in dit gebied sinds 1993 niet meer herzien. In 2009-2010 is er in het kader van het programma 'Zwakke Schakels' een duinverzwarende aangelegd tussen raaien 3153 – 3380. Bij raai 3202 is er naar aanleiding van de stormen Ciara en Dennis (2020) een deel van het strand geërodeerd. Omdat uit veiligheidssommen bleek dat niet gegarandeerd kon worden dat aan de nieuwe normen van 2017 kon worden voldaan, met het oog op het stormseizoen 2020-2021, is er in mei 2020 versneld gesuppleerd op de raaien 3165-3239. Ook is in het suppletieprogramma 2020-2023 een strandsuppletie opgenomen met uitvoer in 2020-2021 tussen raaien 2930-3458. In totaal zijn er 10 strandsuppleties aangebracht met een interval tussen de 1 en 5 jaar. Het gemiddelde volume per strekkende meter ligt op 147 m³/m over de periode 1992-2021. De gemiddelde lengte per suppletie bedraagt hierbij 4600 m.

Tabel 4-1: Overzicht suppleties Dishoek-Vlissingen

Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ)	
					[10 ³ m ³]	[m ³ /m]
Zwanenburg	1952	32.60	33.40	strandsuppletie	775	969
Dishoek 'Huvers'	1987	29.50	29.70	duinverzwarende	30	150
Vijgeter-Vlissingen	1992	31.60	34.63	strandsuppletie	169	56
Zoutelande-Vijgeter	1993	27.63	31.68	strandsuppletie	619	153
Zoutelande	1995	29.83	33.06	strandsuppletie	463	143
Zuidwestkust Walcheren	1998	28.20	33.95	strandsuppletie	564	98
Zoutelande-Vlissingen	2002	29.40	34.75	strandsuppletie	1,130	211
Zuid-west	2006	21.80	34.70	strandsuppletie	1,439	112
Nolle Westduin (Zw.Sch.)	2010	31.53	33.80	duinverzwarende	217	96
Dishoek	2011	29.50	34.60	strandsuppletie	653	128
Dishoek-Vlissingen	2016	29.50	34.58	strandsuppletie	650	128
Dishoek	2020	31.65	32.39	strandsuppletie	210	284
Vlissingen-Dishoek	2021	29.50	34.58	strandsuppletie	820	161
Totaal 1992-2020					6,934	1,474

Het kustdeel tussen de Westkapelse Zeedijk en Vlissingen wordt beschermd door strandhoofden, behalve een gedeelte van 2 à 3 km halverwege (bij Zoutelande). De constructie van de strandhoofden begon in 1865 ten noorden van Vlissingen (Verhagen, en van Rossum, 1990). Het strandhoofdenveld werd uitgebreid in noordwestelijke richting tussen 1861 en 1866 en in 1916 werden de laatste hoofden in het zuiden toegevoegd. Ten zuiden van Westkapelle is een ongeveer 5 km lang strandhoofdenveld gebouwd tussen 1852 en 1894. Tezamen waren deze strandhoofden in staat om de kustlijn terugtrekking ten gevolge van de landwaartse migratie van het Oostgat aanzienlijk te verminderen. De erosiesnelheden bij Westkapelle namen af van 3-4 tot 0.4-0.8 m/jaar, en richting Vlissingen van 1,7 - 2,7 tot minder dan 1 m/jaar (Verhagen en van Rossum, 1990).

Niettemin maakte de doorgaande migratie van het Oostgat uitgebreide beschermings- en onderhoudsmaatregelen van de strandhoofdpunten nodig, terwijl langs de kust regelmatig zandsuppleties nodig waren om de stranden te onderhouden. Aanvankelijk werd dit gedaan door vervanging en toevoeging van steenbestorting, maar sinds 2005 worden zowel de hoofden als de kustlijn onderhouden door geulwandsuppleties. De geulwandsuppleties zijn tot op heden nog niet uitgevoerd bij Dishoek, maar wel ten noorden in het Oostgat, westelijk van Zoutelande.

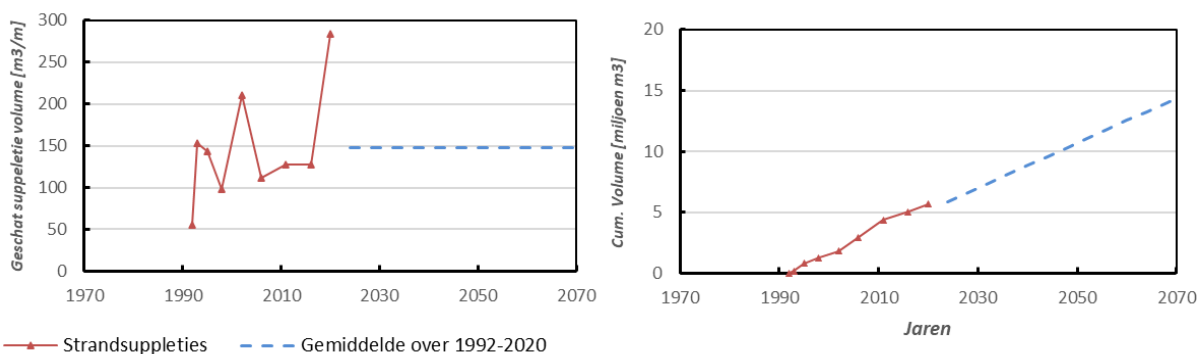
4.4 Voortzetting huidige suppletie inspanningen

4.4.1 Scenario 1; Voortzetting huidige ontwikkelingen (gemiddeld)

Een schatting van de toekomstige suppletiebehoefte is gebaseerd op de aangebrachte strandsuppletievolumes in de periode 1992-2021. Het gemiddelde strandsuppletievolume is 147 m³/m over een gemiddelde lengte van 4600m. Hierbij is de duinverzwaring in het kader van de Zwakke Schakel versterking niet meegenomen.

Voor de berekening van de toekomstige suppletiebehoefte wordt aangenomen dat de suppleties over een gebied van 5000 m worden aangebracht (raaien 2950 tot 3458, zoals in de 2011, 2016 en 2021 strandsuppletie), met een herhalingstijd van 4 jaar. Voor een tijdsduur van 50 jaar geeft dit een totale suppletievolume van 8,8 miljoen m³. Hierbij wordt aangenomen dat het huidige kustbeleid wordt voortgezet, en dus aangenomen dat de huidige kustfuncties in stand worden gehouden (o.a. waterveiligheid, recreatie en natuur).

De suppletievolumes in de periode 1992 – 2021 fluctueren sterk, waardoor het niet logisch is om een (toenemende) trend in suppletievolume af te leiden. Wel wordt het gemiddelde suppletievolume beïnvloed door de relatief grote suppletie in 2020 van 284 m³/m (t.o.v. gemiddelde van 147 m³/m). Deze (extra) suppletie is uitgevoerd in verband met waterveiligheid naar aanleiding van twee stormen. Hiermee nemen in het gemiddelde suppletievolume indirect het effect van een incidentele storm op het suppletievolume mee.



Figuur 4-8: Weergave van de suppletiebehoefte (links) en de cumulatieve suppletievolumes (rechts) op basis van de gemiddelde in suppletievolumes over 1992-2021.

4.5 Samenvatting van de suppletiehoeveelheden

Bij Dishoek (raaien 2990 - 3202) zal er naar verwachting in de komende 50 jaar 8,8 miljoen m³ zand gesuppleerd moeten worden, onder aanname dat de huidige suppletie-inspanning wordt voortgezet.

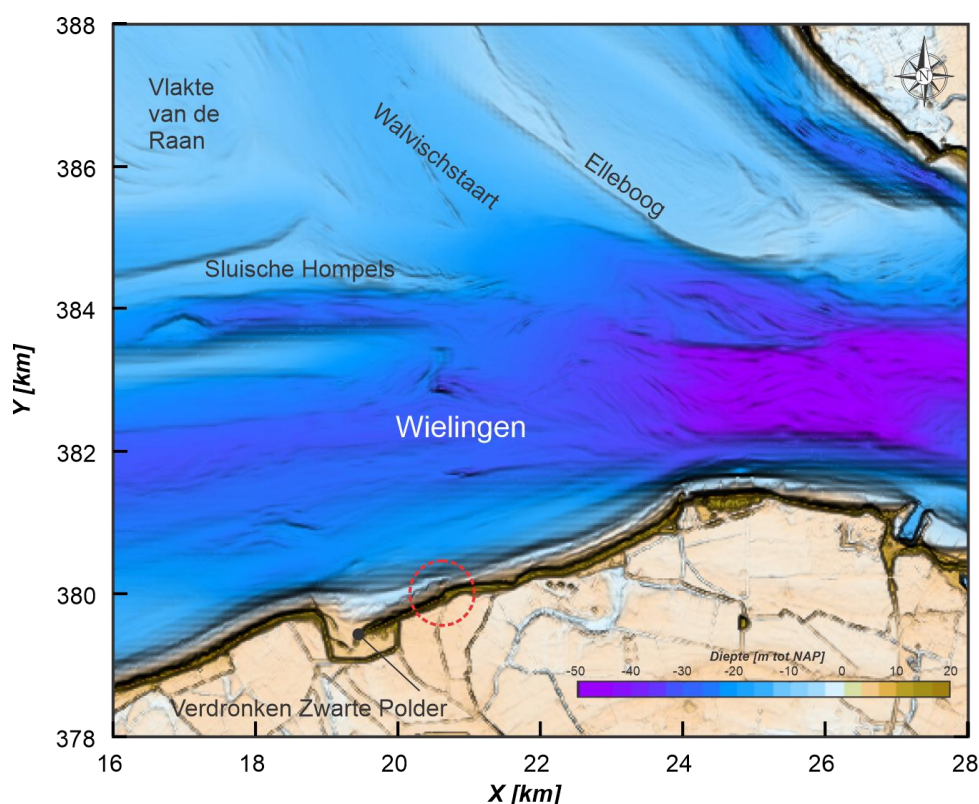
Tabel 4-2 Samenvatting verwachte suppletie inspanning voor alle scenario's bij Dishoek-Vlissingen

Scenario	gem. volume per suppletie	Terugkeertijd suppleties	Cumulatief volume (miljoen m ³) benodigd komende 50 jaar
1. Voortzetting huidige ontwikkelingen: gemiddelde trend	147 m ³ /m	Strandsuppletie elke 4 jaar	8,8

5 Nieuwvliet-Groede

5.1 Overzicht van de probleemlocatie

De kust tussen Nieuwvliet en Groede vormt onderdeel van de Westerscheldemonding. Direct voor de kust ligt de diepe geul Wielingen (Figuur 5-1). Deze geul ligt ingeklemd tussen de kust van Zeeuws-Vlaanderen en de grote ondiepte Vlake van de Raan, met een diepte tussen de -2 en -10 m NAP. Aan de oostzijde bevinden zich hierop de banken Sluische Hompels. Voor de probleemlocatie Nieuwvliet-Groede is alleen de geul Wielingen van direct belang. Deze diepe oost-west lopende geul is de belangrijkste toegangsheul voor de scheepvaart naar de Westerschelde en haven van Antwerpen. Sinds de jaren 60 wordt de Wielingen door baggerwerkzaamheden op een diepte van circa -20 m NAP gehouden.



Figuur 5-1 Een overzicht van de grootschalige morfologische kenmerken rond de probleemlocatie Nieuwvliet-Groede

Een detailbeeld van de probleemlocatie Nieuwvliet - Groede wordt weergegeven in Figuur 5-2. In dit gebied is een bolwerk zichtbaar, waarbij de BKL ongeveer 75 m zeewaarts uitsteekt bij raai 791 ten opzichte van het omliggende gebied (raai 822-730). Zeewaarts en aan de westkant van het bolwerk ligt de hoekvormige harde structuur Kruishoofd. Ter hoogte van het Kruishoofd bevindt zich een fietspad over een duin, welke dicht tegen het strand aanligt. Direct achter het duin ligt een autoweg ('Zeeweg').

Ondanks de flinke suppletie inspanningen blijkt de huidige BKL voor de raaien 768-791 niet handhaafbaar. De kustlijnligging neemt in deze raaien gemiddeld met 4 tot 8 meter per jaar af. Voor landwaartse verlegging van de BKL kan niet zomaar gekozen worden: er is geen brede duin aanwezig in het achterland, waardoor waterveiligheid mogelijk in het geding komt bij het

toestaan van kustachteruitgang. Verder bemoeilijkt het aanwezige fietspad op het duin en strandopgang voor voertuigen (o.a. hulpdiensten) een landwaartse verplaatsing van de BKL.

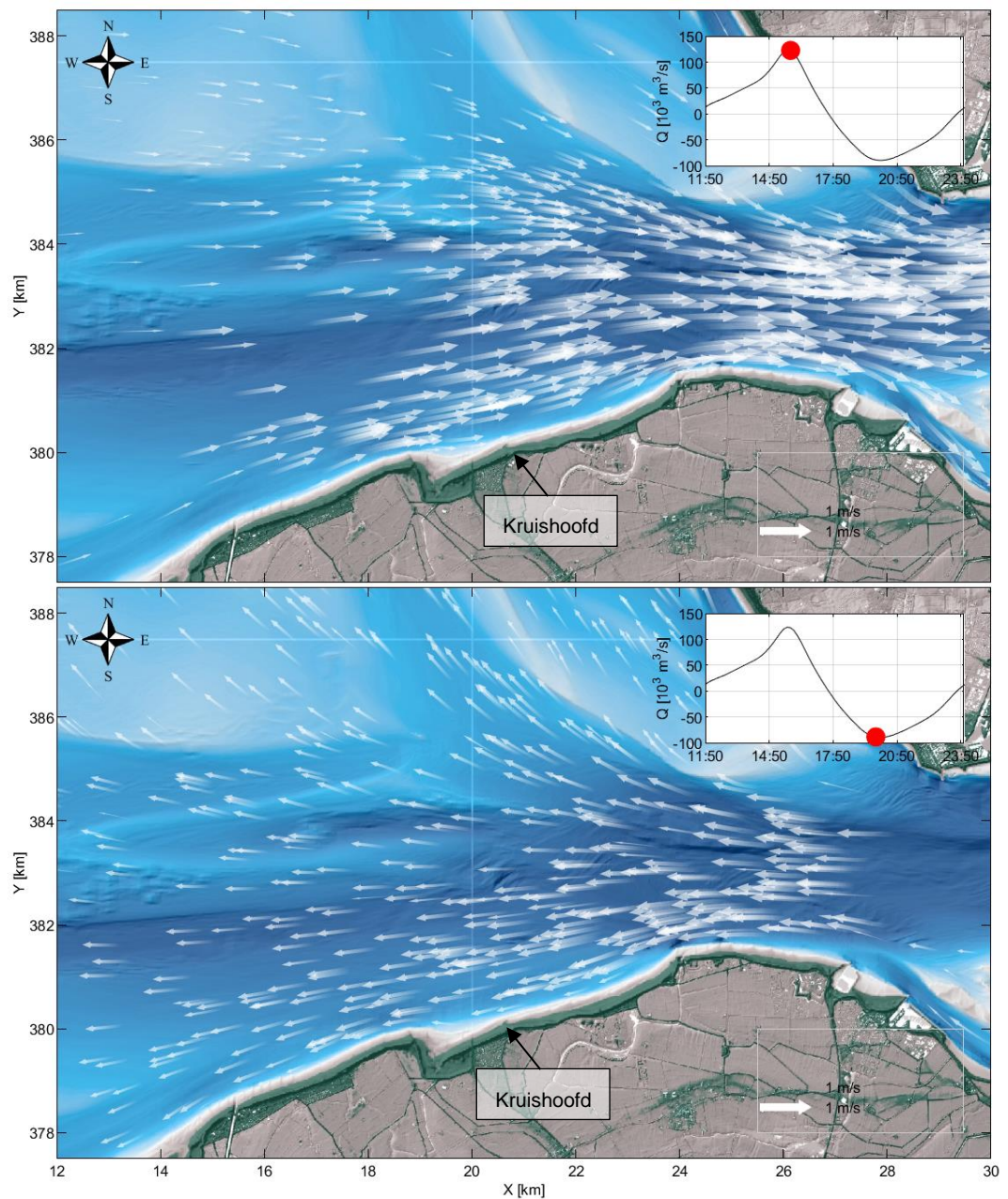


Figuur 5-2 ; Overzicht van de probleemlocatie Nieuwvliet-Groede met daarin de resultaten van de toetsing van de kustlijn (2021). Bij het Kruishoofd ligt de TKL landwaarts van de BKL en is de trend negatief. Onder: een overzicht van ligging van het droogvallende strand, duinen en harde verdedigingswerken aan de hand van een satellietopname van 11-08-2021.

5.2 Morfologische karakterisering

5.2.1 Grootschalige veranderingen van de monding

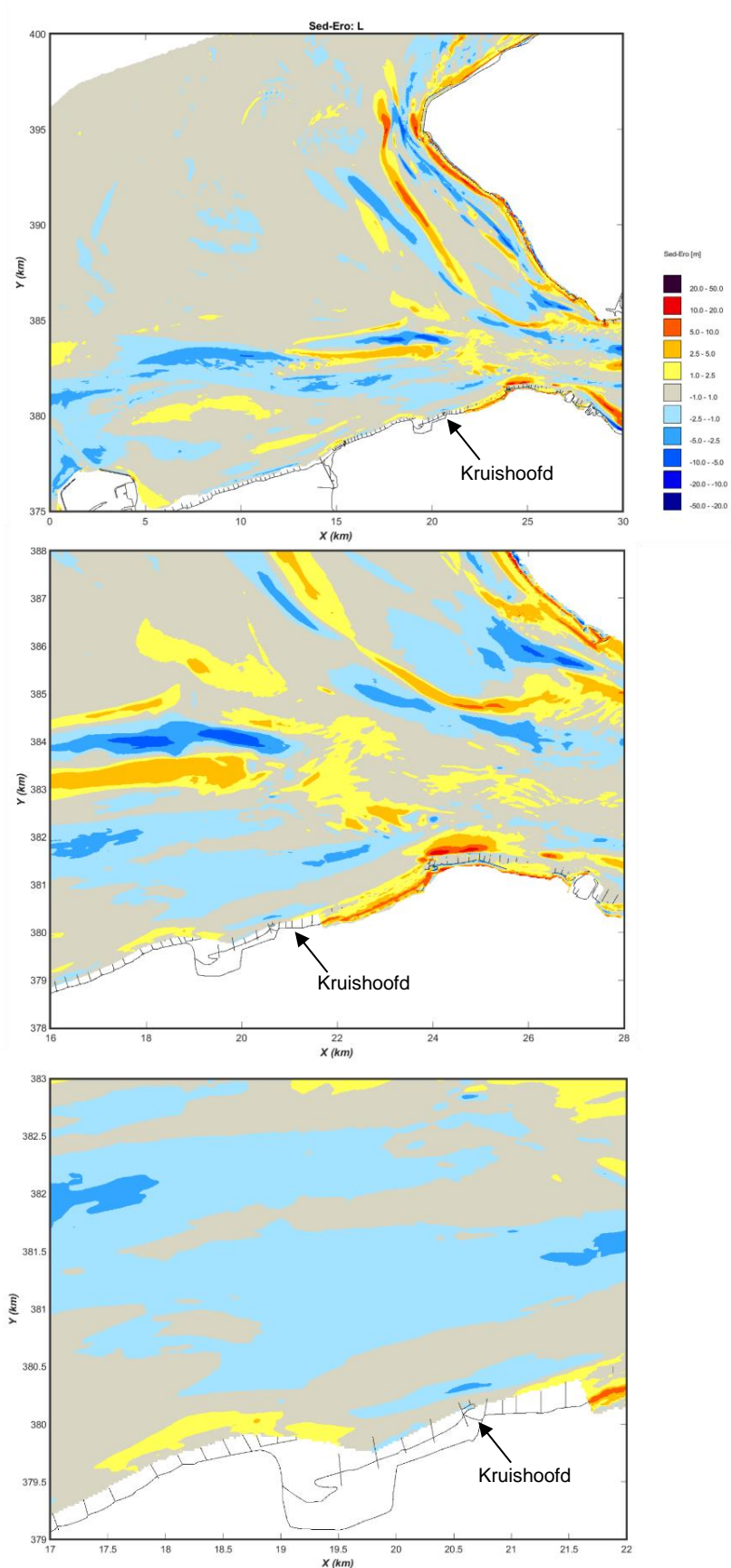
Grote getijstromingen treden op in de Wielingen (Figuur 5-3). Het getij op de schaal van de gehele monding is complex door de interactie van het kustlangs (noord-zuid) getij in de Noordzee en het kustdwars (west-oost) getij in en uit het Westerschelde estuarium. Langs de probleemlocatie zijn de stromingen relatief eenvoudig (Figuur 5-3). Het getij propageert kustlangs door de geul Wielingen. Er ontstaan dan sterke stromingen langs de gehele kustlijn tijdens eb en vloed. Netto zijn de vloedgerichte stromingen dominant, waardoor het sedimenttransport langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen oostwaarts, richting het estuarium, is gericht. Net oostelijk van de Verdronken Zwarte Polder is er een luwtegebied zichtbaar, waar lokaal de snelheden wat lager zijn. Ter hoogte van het uitstekende Kruishoofd zijn de snelheden weer iets hoger. Contractie van de stroming om het kruishoofd heen kan een verklaring zijn voor de structurele erosie die hier optreedt.



Figuur 5-3; Een overzicht van de stromingen in de monding tijdens maximale eb- en vloeduitstroom.

Gedetailleerde dieptemetingen van de Voordelta zijn beschikbaar vanaf 1964. Analyse hiervan laat zien dat sinds 1964 de Westerscheldemonding stabiel in vorm is gebleven (Elias et al. 2016; Elias en Van der Spek, 2015). Dit is opmerkelijk omdat in de Westerschelde, zo'n 400 miljoen in-situ m³ sediment is verplaatst door baggeren en storten, en 114 miljoen m³ zand is gewonnen sinds 1955 (Haecon, 2006). Wel verliest de monding sediment. Over de periode 1964-2011 wordt het verlies in het Nederlandse deel van de monding geschat op 67 miljoen m³ (Elias et al, 2016). De verliezen in het Belgische deel (ten westen van Cadzand-Bad) zijn echter veel groter. De recente studie van Elias (2022) geeft een verlies van 353 miljoen m³ over de periode 1978-2020. De grootste verliezen treden op in de kustzone gelegen ten zuiden van de Wielingen (-141 miljoen m³) en op de Vlakte van de Raan (-182 miljoen m³). Een deel van het sedimentverlies in de monding is direct gerelateerd aan menselijk ingrijpen. Zo nam de Wielingen toe in diepte door de hier uitgevoerde verdiepingen, maar ook het baggeren in het estuarium speelt een rol. Het baggeren in de Westerschelde en met name het verwijderen van de ondiepe drempels in de vaargeul, verminderde de hydraulische weerstand, waardoor het getijvolume met 5 tot 7% toenam.

De sedimentatie-erosie kaarten weergegeven in Figuur 5-4 laten de verdieping van het diepere deel van de kustzone duidelijk zien. Het ondiepe deel van de kust laat juist vooral een toename van de bodemhoogte zien. Deze toename is gerelateerd aan de uitgevoerde suppleties en versterkingen. Alleen ter plaatse van Nieuwvliet-Groede neemt de diepte toe. De grote afname van volume van de Vlakte van de Raan is in deze figuur niet direct te herleiden. Dit komt door de omvang van deze Vlakte. Een volume afname van 182 miljoen m³ geeft een gemiddelde daling van 37 cm. Dit valt binnen de bandbreedte van het grijze vlak. Wat in de sedimentatie-erosiekaarten wel duidelijk zichtbaar is zijn bank-geul verplaatsingen. Deze zullen vooral een rol spelen voor de kust van Walcheren.



Figuur 5-4; Een overzicht van de grootschalige morfologische verandering van de Westerscheldemonding (a), ingezoomd op de kust van Zeeuws-Vlaanderen (b) en het kustgebied rondom het Kruishoofd bij Nieuwvliet-Groede (c) over de periode 1990-2020.

5.2.2 Lokale ontwikkeling van de kustlijn (1997-2020).

Grootschalig lijken er geen grote veranderingen op te treden die de ontwikkeling van de probleemlocatie direct beïnvloeden. Een beeld van de lokale kustlijnontwikkeling wordt weergegeven in Figuur 5-5 aan de hand van de LiDAR opnamen. Deze opnamen vormen onderdeel van de JarKus metingen. Sinds 1996 worden de hoogtewaarnemingen van het strand en de duinen opgenomen met een laserscanner (LiDAR) aan boord van een vliegtuig. Na analyse 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 hoge resolutie maakt het mogelijk de droogvallende kustzone in hoge resolutie weer te geven (Figuur 5-5 en Appendix D). Voor de kust van Nieuwvliet-Groede zijn jaarlijkse metingen over de periode 1997-2020 beschikbaar.

De verschilkaart tussen de 1997 en 2020 bodem bevestigt het beeld dat de droogvallende kustzone over het algemeen in volume is toegenomen (Figuur 5-5 onderste deelfiguur). Wat met name opvalt is de sterke toename van de duinvolumes tussen 2008 en 2009 (Figuur D - 6) ten gevolge van de Zwakke Schakel versterking.

Een beeld van de dwarsprofielontwikkeling kan worden verkregen door analyse van geselecteerde dwarsprofielen (weergegeven in Figuur 5-6, Figuur 5-7 en Figuur 5-8). Raaien 791 en 730 geven de ontwikkeling ten oosten van het Kruishoofd weer en raai 851 ten westen ervan.

Raai 730 (Figuur 5-6)

Raai 730 laat een overwegend uitbouwende MKL zien tussen 1964 en 1988. De MKL stabiliseert tussen 1990 en 2000 op een afstand van ongeveer 450 m tot de RSP. De gekozen BKL-positie in 1990 ligt dan eigenlijk ver zeewaarts t.o.v. de oudere kustlijnligging. Na een periode van stabiliteit is er vanaf 2000 een duidelijk terugtrekkende trend zichtbaar waardoor de BKL wordt overschreden. De BKL wordt dan in 2003 verlegt naar een positie rond de 240 m tot de RSP-lijn. Hierdoor wordt de overschrijding eigenlijk opgelost. Tot 2007 blijft de MKL landwaarts verplaatsen. In 2008 en 2009 verplaatst de positie al iets zeewaarts. Een grote zeewaartse verplaatsing treedt op na de Zwakke Schakel versterking. De MKL verplaatst dan zo'n 300 m zeewaarts en ligt dan ver zeewaarts van de oude en vernieuwde BKL-posities. De MKL blijft stabiel en in de recente jaren verplaatst deze zelfs iets zeewaarts. De uitgevoerde strandsuppleties in 2014 en 2019 zullen hierin ook een rol hebben gespeeld.

De relatieve stabiliteit van deze raai heeft ook te maken met de oriëntatie van de lokale kustlijn. Ter hoogte van raai 684 ligt de kust iets verder zeewaarts waardoor raaien 705 tot en met 751 enigszins in de luwte van deze uitbouw liggen. Hierdoor kan een wat bredere strandzone ontstaan die waarschijnlijk ook iets minder gevoelig is voor fluctuaties in positie.

Raai 791 (Figuur 5-7)

Raai 791 ligt direct ten oosten van het Kruishoofd. Hier wordt de BKL regelmatig overschreden sinds de Zwakke Schakel versterking in 2009. Uit de gedetailleerde profielontwikkeling is de ontwikkeling van de Zwakke Schakel versterking duidelijk te volgen.

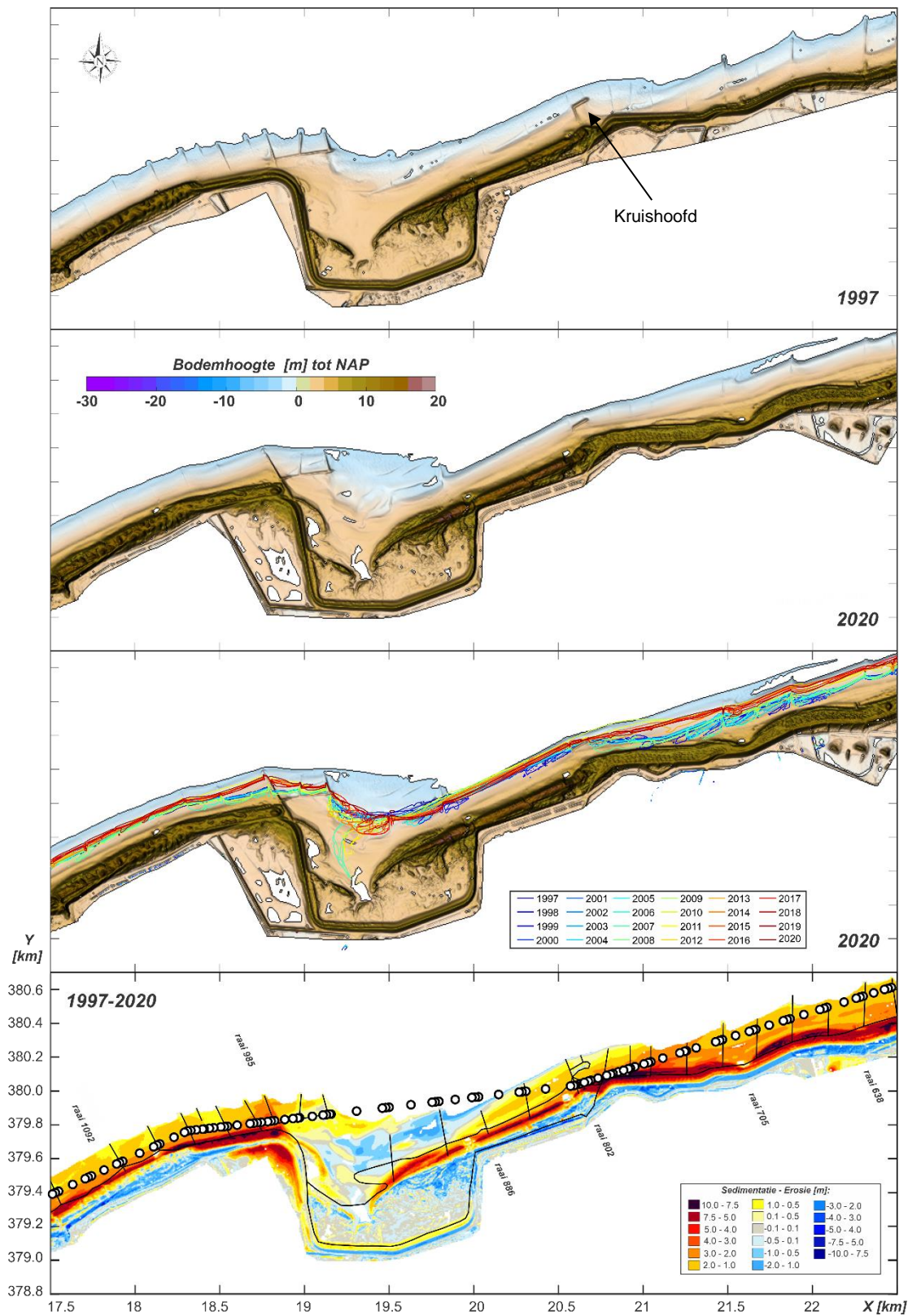
De Zwakke Schakel versterking bouwt de kust hier initieel zeer ver uit. Er is hier een nieuw duin aangelegd dat aansluit op een hoog en relatief steil strandprofiel. Direct na aanleg ligt de MKL dan zo'n 550m verder zeewaarts. Dit komt mede doordat bij aanleg van de Zwakke Schakelversterking hier gekozen is om een erosieberm van 200.000 m³ aan te leggen ter hoogte van deze raai. Deze positie neemt vervolgens sterk af. Het duin erodeert en de hoogte van het strand neemt af. In de 5 jaar na aanleg verplaatst de MKL 450m landwaarts. Met strandsuppleties in 2014 en 2019 wordt de MKL vervolgens gehandhaafd. Na de suppletie verplaatst de MKL 200m zeewaarts om vervolgens in een jaar of 4-5, weer landwaarts te verplaatsen. Alleen direct na een strandsuppletie wordt in deze raai de BKL positie bereikt.

Het dwarsprofiel laat ook zien dat het strand en de vooroever een vrijwel continue steile helling hebben. Een bufferzone als overgang tussen strand en vooroever, bijv. in de vorm van een bankengebied of drempelgebied is hier niet aanwezig. Zo'n buffer probeert zich wel te vormen na de suppleties; er is drempelvorming rond de -2 m zichtbaar. Door suppletie wordt deze drempel eigenlijk weer opgevuld, waarna weer grote erosie kan optreden. Het zeewaarts verplaatsen van de gehele kustlijn lost dit fundamenteel erosieprobleem niet op, maar maakt het eigenlijk alleen groter omdat de kustlijn nog verder uit evenwicht wordt geplaatst. Dit uit evenwicht zijn van de MKL ligging is in de tijdserie van de MKL zichtbaar. Hierin is duidelijk te zien dat de huidige BKL nog ver zeewaarts ligt van de eerdere posities. In het verleden lag de MKL eigenlijk altijd tussen de 0 en 240m tot de RSP. Posities zeewaarts hiervan komen eigenlijk niet voor. Op basis van deze observaties zou hier de conclusie getrokken kunnen worden dat de huidige BKL eigenlijk te veel afwijkt van de evenwichtsligging die hier zou willen optreden. In de huidige kustlijnconfiguratie kan zo'n BKL dan ook eigenlijk niet gehandhaafd worden. Deze ligging is eigenlijk alleen mogelijk als er grootschalig veranderingen optreden waardoor de gehele kustlijn van het kustvak zeewaarts verplaatst.

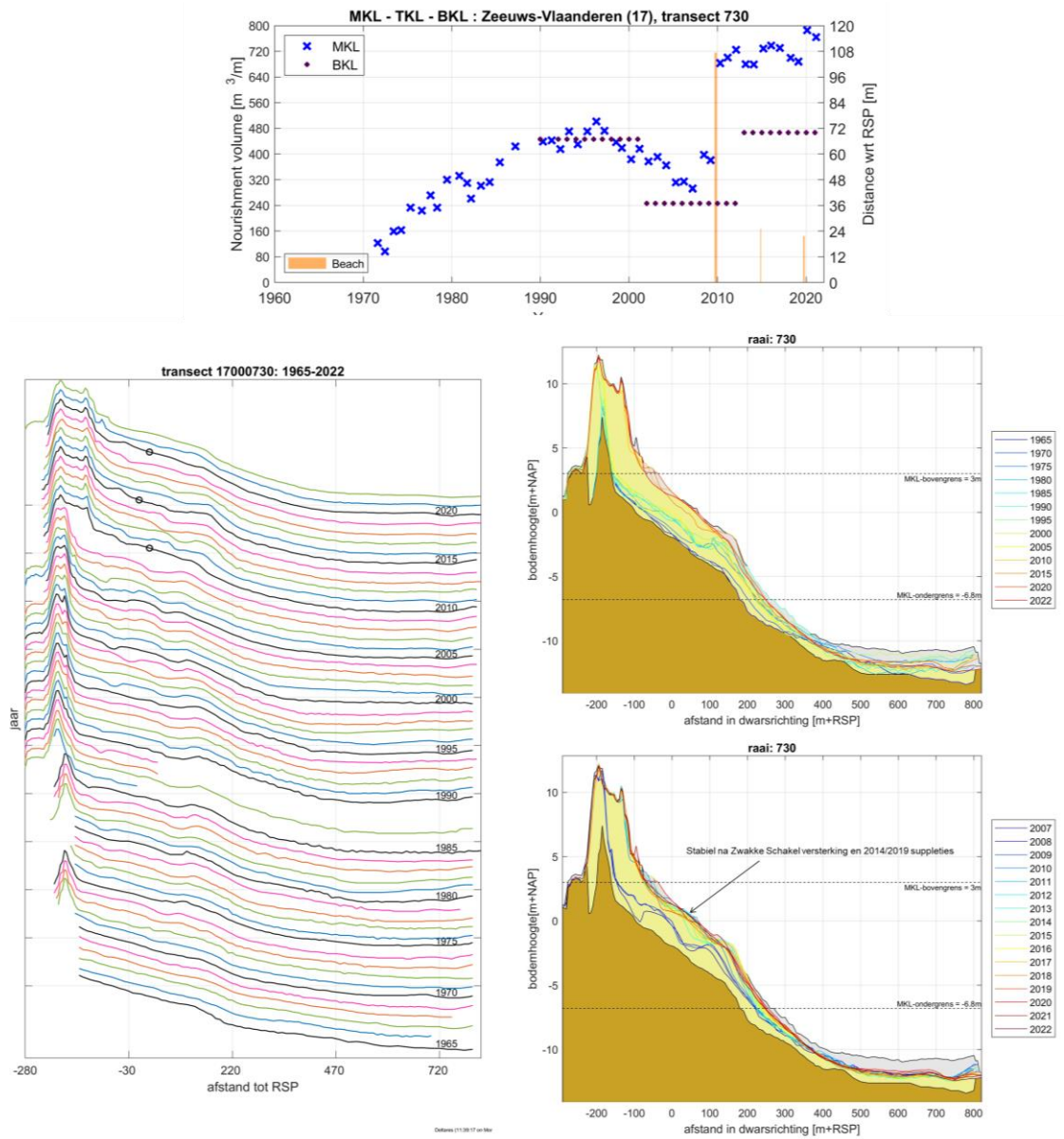
Raai 851 (Figuur 5-8)

Raai 851 ligt ten westen van het Kruishoofd, ongeveer in het midden tussen Kruishoofd en eerstvolgende palenrij. In dit dwarsprofiel ligt de MKL verder zeewaarts dan ten oosten van het Kruishoofd. Tot 1990 lag de MKL gemiddeld rond de 250 m tot de RSP lijn. De MKL nam tot 1982 nog in volume toe, maar in de periode 1982-1992 verplaatst de MKL zich meer dan 100m landwaarts. De BKL positie van in 1990 ligt ten opzichte van de MKL ligging in de periode 1964-1990 op een minimum positie. Toch is er in 1994 een suppletie nodig om de BKL te handhaven. Deze suppletie is beperkt succesvol. De MKL verplaatst na suppletie wel zeewaarts van de BKL maar in de volgende jaren wordt de positie dan weer snel overschreden. Alleen door herhaald suppleren kan de MKL gehandhaafd worden op de 1990 positie. Verlegging van de BKL in 2012 zorgt er wel voor dat de huidige MKL ver zeewaarts ligt t.o.v. de actuele BKL-positie.

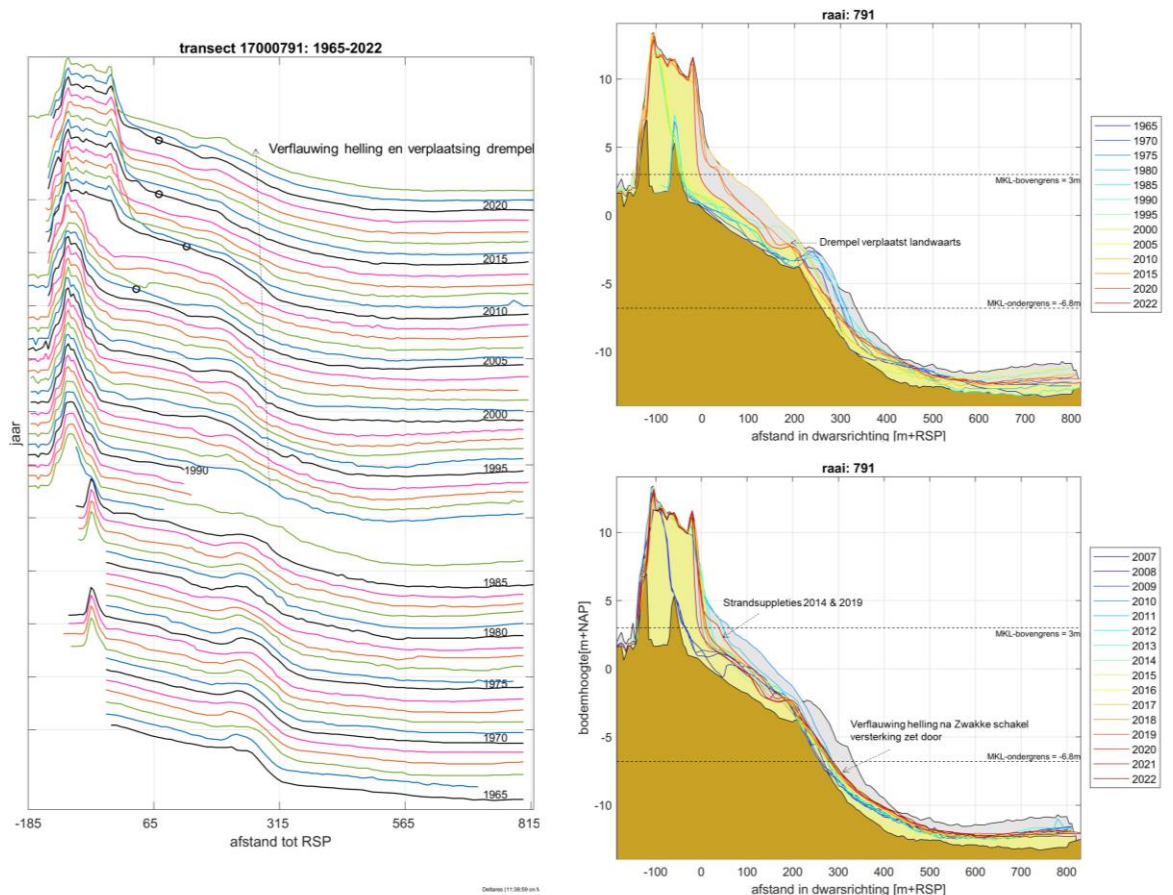
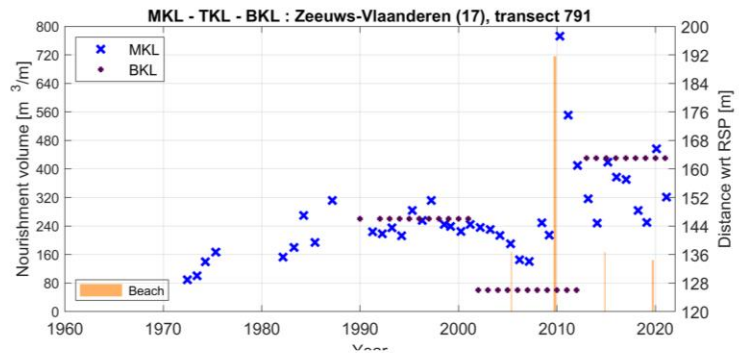
In dit profiel treden wel een paar opvallende veranderingen op. De MKL vertoont een terugtrekkende trend, maar de duinen blijven hier over de gehele periode uitbouwen. Deze aangroei van het duinprofiel is ook te zien in de andere raaien ten westen van Kruishoofd. Ook de diepere vooroever (onder de -5 m) vertoont een stabilisatie. Dit deel van de vooroever is sinds 1990 ondieper geworden.



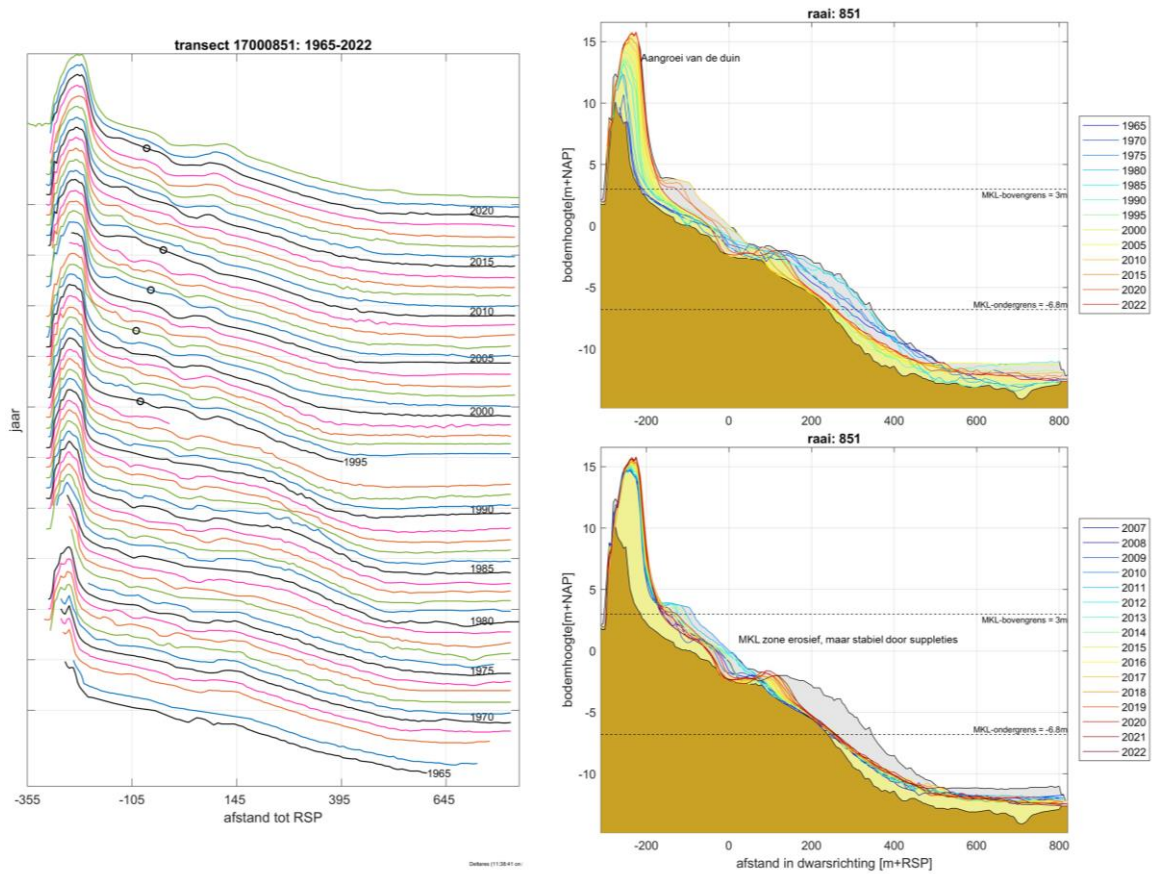
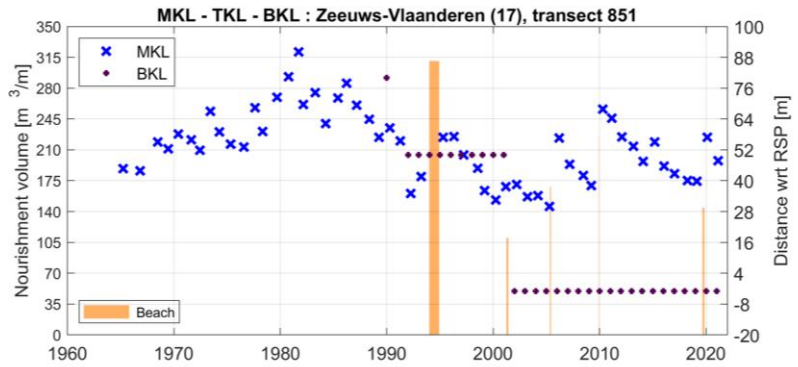
Figuur 5-5; Een overzicht van de kustlijnontwikkeling rond de probleemlocatie op basis van de LiDAR metingen. Van boven naar beneden: 1997 LiDAR opname, 2020 LiDAR opname, 2020 LiDAR opname inclusief 0m contour lijnen over de periode 1997-2020 en het verschil tussen de 1997 en 2020 opname. De bolletjes geven de locatie van de raaien op RSP = 0m weer.



Figuur 5-6; : Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 730 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1965-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).



Figuur 5-7; : Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 791 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1965-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).



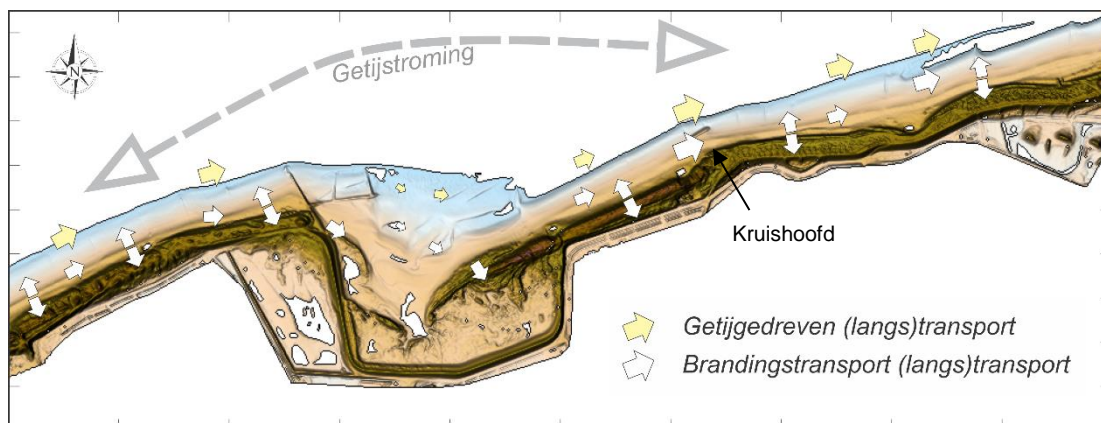
Figuur 5-8; : Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 851 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1965-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).

5.2.3 Conceptuele weergave van de processen

Zowel grootschalige processen (Figuur 5-9) en lokale effecten (Figuur 5-10) spelen bij Nieuwvliet-Groede een rol in de erosieproblematiek.

Getijstromingen spelen een dominante rol in de zandverliezen uit het kustvak. Golfgedreven transporten zijn hier in vergelijking tot de Hollandse kust veel kleiner. De Vlakte van de Raan zorgt voor een efficiënte golfafscherming, waardoor de hogere Noordzee golven de kust niet bereiken. De Vlakte van de Raan vertoont wel veranderingen, zoals een kleine afname in hoogte en plaat-geuldynamiek langs de kust van Walcheren, maar het lijkt niet waarschijnlijk dat deze veranderingen een dominante invloed hebben op golfgedreven processen langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. Dit wil niet zeggen dat golven geen rol spelen. Ook kleinere golven geven golfbreking en opwoeling van sediment in de brandingszone. De erosie van de kustlijn wordt vanuit dit oogpunt nog steeds gedreven door de golven. De getijstrooming zorgt ervoor dat dit opgewoelde sediment efficiënt kustlangs weggevoerd kan worden. Het kustlangse getij speelt hierom een dominante rol in de zandverliezen. Dit kustlangse getij is sterk door de in- en uitstroming van het Westerschelde estuarium.

Langs een ongestoorde kustlijn (Hollandse kust) treedt tijdens hoge golven veel erosie op van het strand en soms de duinen. Dit zand verplaatst naar het diepere deel van het profiel waar het tijdelijk gebufferd wordt (het profiel verandert van vorm). Tijdens kalme periode wordt er zand vanuit de diepere vooroever terug richting het strand getransporteerd. Dit zorgt ervoor dat er gemiddeld geen grote verliezen optreden. Dit mechanisme kan rond zeegaten en de monding van de Westerschelde niet plaatsvinden. Het zand verplaatst vanaf de strandzone naar de diepere vooroever, waar het kustlangs afgevoerd wordt door de sterke getijstrooming. Dit betekent dat er wel sterke (golfgedreven) erosie van het strand optreedt maar geen of weinig herstel door het gebrek aan bufferruimte. Dit zand kan dan alleen door frequent suppleren worden aangevuld.

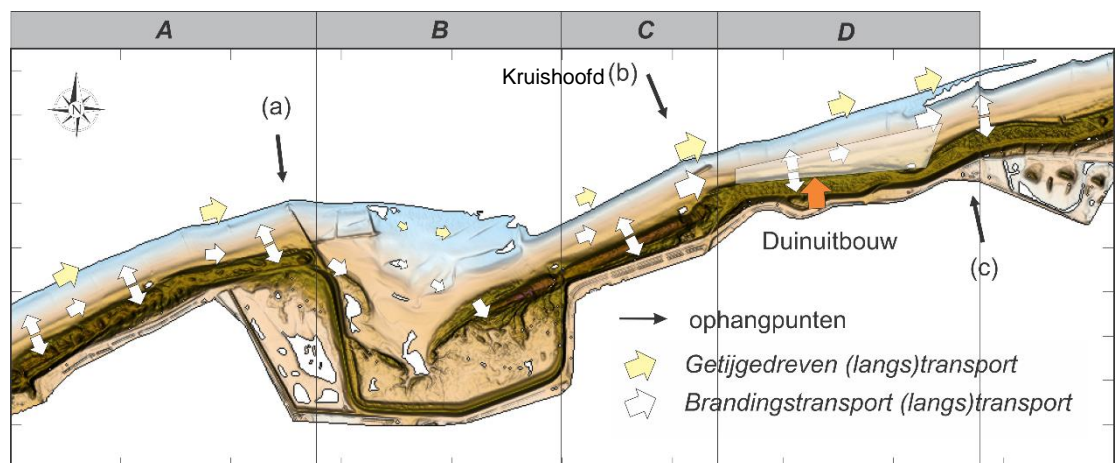


Figuur 5-9; Een conceptuele weergave van de processen die spelen in de kustzone bij Nieuwvliet-Groede.

Naast de grootschalige processen speelt ook de lokale kustlijnligging en de verschillende constructies (ophangpunten) een belangrijke rol in de erosieproblematiek. Het kustvak is geen rechte, vloeiende kustlijn maar bevat verschillende knikpunten. Hierdoor ontstaan gebieden die wat verder zeewaarts liggen en gebieden die wat verder landwaarts liggen. De Verdrongen Zwarte Polder (Gebied B in Figuur 5-10) is een voorbeeld van zo'n gebied waar de zeekering verder landwaarts ligt. Er is hier een groot ondiep gebied aanwezig waarin zich lokaal een evenwicht heeft ingesteld. In deze bufferzone is duin- en spitvorming mogelijk. Samen met de strekdammen/constructie aan de zeezijde van de Herdijkte Zwarte polder (ophangpunt a) wordt het merendeel van het kustlangse transport in de brandingszone hier waarschijnlijk ingevangen. Dit zorgt ervoor dat het gebied ten oosten hiervan geen of weinig aanvoer van zand heeft.

Het Kruishoofd vormt een tweede ophangpunt. Het gebied tussen de Verdrongen Zwarte Polder en het Kruishoofd (Gebied C) probeert hier een evenwichtsligging te ontwikkelen. In dit profiel is ruimte voor een smalle strandzone, waardoor er een bufferzone aanwezig is voor het aanwezige zand. Deze bufferzone zorgt ervoor dat het MKL volume hier robuuster is ten opzichte van het gebied ten oosten van het Kruishoofd.

Ten oosten van het Kruishoofd en ophangpunt (c) ligt een gebied met toenemende breedte van de strandzone (gebied D). Nabij het ophangpunt kan een wat breder strand gehandhaafd worden (zie het witte vlak in Figuur 5-10). Hier is de bufferfunctie van het strand efficiënter, waardoor ook de MKL beter gehandhaafd kan worden. Nabij het Kruishoofd is een strandzone vrijwel niet aanwezig. Hier gaat de duinenrij vrijwel direct over in de diepe vooroever. Erosie van de strandzone geeft hier gelijk een groot volumeverlies uit de MKL-zone. De uitbouw van de duinenrij door de Zwakke Schakel versterking heeft dit probleem eigenlijk groter gemaakt. Door het gebrek aan bufferruimte in de vorm van een strandzone is de MKL hier eigenlijk niet zeewaarts van de BKL te handhaven.



Figuur 5-10; Een conceptuele weergave van de kleinschalige, lokale effecten die een rol spelen in de kustzone bij Nieuwvliet-Groede.

5.3 Suppleties en overige ingrepen

Langs de gehele Zeeuwse kust zijn 84 strandhoofden aanwezig, die zijn gebouwd gedurende de tweede helft van de 19e eeuw. Sindsdien is de kusterosie duidelijk afgenomen met 0,2 tot 2,7 m/jaar (Verhagen en Van Rossum, 1990). In dit kustvak is sprake van een sterke getijstroom langs de kust, waardoor de hoofden ook een kribfunctie hebben.

In 2009 is dit gebied binnen het project Zwakke Schakels versterkt met een strandduinsuppletie aan de zeewaartse zijde van het bestaande duin (Figuur 5-11). Hier is over een lengte van ongeveer 3 km een nieuwe duin aangelegd tegen de bestaande dijk. Er is 2,8 miljoen m³ zand op het strand gespoten, waardoor de kustlijn ongeveer 50 m richting zee is opgeschoven. Ter hoogte van het Kruishoofd (raai 802) is een erosieberm aangelegd van ongeveer 180.000 m³ zand met als bedoeling het strand op een natuurlijke wijze te voeden. Het zand van deze erosieberm bleek na zo'n twee jaar te zijn afgevoerd. Als gevolg van de Zwakke Schakel versterking ontstond een bolwerk ter hoogte van raai 791.



Figuur 5-11; Overzicht van de Zwakke Schakel versterking bij Nieuwvliet-Groede in 2009. De paarse kleur geeft de locatie van de erosieberm weer, en de groene de duinversterking (Vermeer en van der Werf, 2022).

Sinds 2009 is er tweemaal een strandsuppletie geweest op het traject Nieuwvliet-Groede (Tabel 5-1). Voor de raaien 768-791 is er beide keren ongeveer 290 m³/m zand gesuppleerd. In 2012 is de BKL zeewaarts verlegt om deze versterking in stand te houden (Tabel 5-2). In het huidige suppletieprogramma staat een strandsuppletie gepland voor 2022-2023 gezien de huidige BKL-overschrijdingen.

Tabel 5-1: Overzicht suppleties Nieuwvliet-Groede. De strandsuppletie van 2023 is schuingedrukt, deze staat ten tijde van schrijven op de planning voor uitvoering.

Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ)	
					[10 ³ m ³]	[m ³ /m]
Adornispolder	1994	8.06	9.18	strandsuppletie	348	311
Adornispolder	2001	8.00	9.20	strandsuppletie	132	110
Adornispolder	2005	7.86	9.36	strandsuppletie	252	168
Nieuwvliet Groede (Zw.Sch.)	2009	4.61	8.02	strand-duinsuppletie	2,448	718
Adornispolder	2009	8.02	9.04	strandsuppletie	230	226
Nieuwvliet-Groede	2014	4.61	8.77	strandsuppletie	650	156
Nieuwvliet-Groede	2019	4.61	8.77	strandsuppletie	600	144
<i>Nieuwvliet-Groede</i>	<i>2023</i>	<i>4.61</i>	<i>8.77</i>	<i>strandsuppletie</i>	<i>700</i>	<i>168</i>
Totaal 1994-2020					5,361	2,002

Tabel 5-2: BKL locaties ten opzichte van de RSP-lijn. Landwaartse verplaatsingen zijn rood gemarkeerd, zeewaartse verplaatsingen groen.

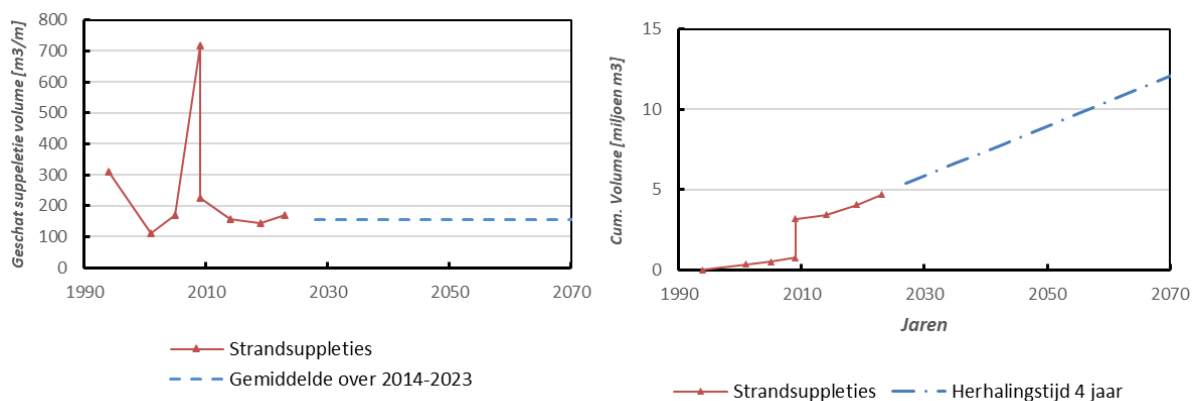
Raai	BKL 1992	BKL 2001	BKL 2012	BKL 2017
684	64	44	70	70
705	53	33	63	63
730	67	37	70	70
751	77	37	96	96
768	112	82	132	132
778	139	109	153	153
791	146	126	163	163
802	183	133	142	142
822	133	73	73	73
851	50	-3	-3	-3
877	-34	-55	-55	-55

5.4 Voortzetting huidige suppletie inspanningen

5.4.1 Scenario 1; Voortzetting huidige ontwikkelingen (gemiddeld)

Een schatting van de toekomstige suppletiebehoefte is gebaseerd op de aangebrachte strandsuppletievolumes (en geplande suppletie in 2022-2023) in de periode na de Zwakke Schakel versterking; 2014-2023. Het gemiddelde strandsuppletievolume is 156 m³/m over een gemiddelde lengte van 4000 m. Hierbij is de strand-duinsuppletie in het kader van de Zwakke Schakel versterking (2.448.696 m³) niet meegenomen.

Voor de berekening van de toekomstige suppletiebehoefte wordt aangenomen dat de suppleties tussen raaien 461 en 877 worden aangebracht, zoals voor de strandsuppleties 2014, 2019 en 2023. Dit geeft een kustlangs-gebied van 4000 m. De herhalingsstijd van de suppleties na de Zwakke Schakel versterking was 5 jaar. De geplande suppletie voor 2023 is echter vervroegd naar aanleiding van de kustlijntoetsing, dit geeft een herhalingsstijd van 4 jaar. Voor een tijdsduur van 50 jaar wordt er een totale suppletievolume verwacht 7 miljoen m³ bij een herhalingsstijd van 4 jaar. Hierbij wordt aangenomen dat het huidige kustbeleid wordt voortgezet, en dus aangenomen dat de huidige kustfuncties in stand worden gehouden (o.a. waterveiligheid, recreatie en natuur).



Figuur 5-12: Weergave van de suppletiebehoefte (links) en de cumulatieve suppletievolumes (rechts) op basis van de gemiddelde in suppletievolumes over 2014-2023.

5.5 Samenvatting van de suppletiehoeveelheden

Bij Nieuwvliet-Groede (raaien 768-791) zal er naar verwachting in de komende 50 jaar 7 miljoen m³ zand gesuppleerd moeten worden, onder aanname dat de huidige suppletie-inspanning wordt voortgezet.

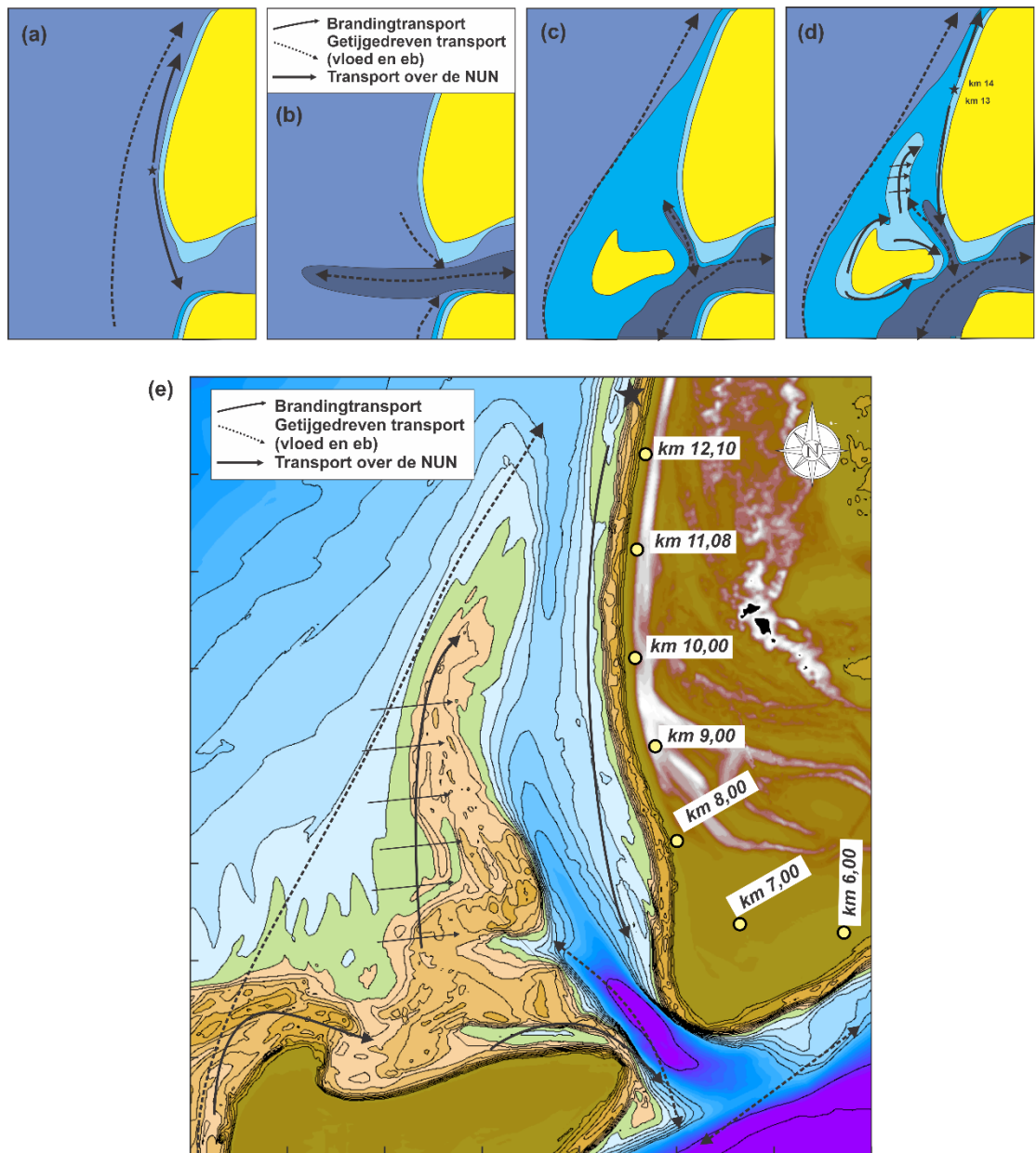
Tabel 5-3 Samenvatting verwachte suppletie inspanning voor alle scenario's bij Dishoek-Vlissingen

Scenario	gem. volume per suppletie	Terugkeertijd suppleties	Cumulatief volume (miljoen m ³) benodigd komende 50 jaar
1. Voortzetting huidige ontwikkelingen: gemiddelde trend	156 m ³ /m	Strandsuppletie elke 4 jaar	7

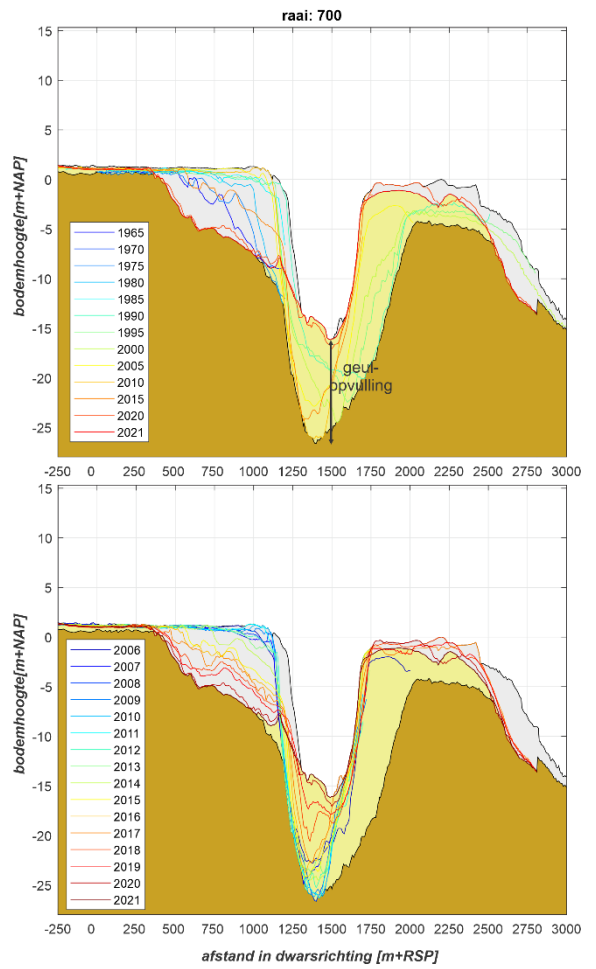
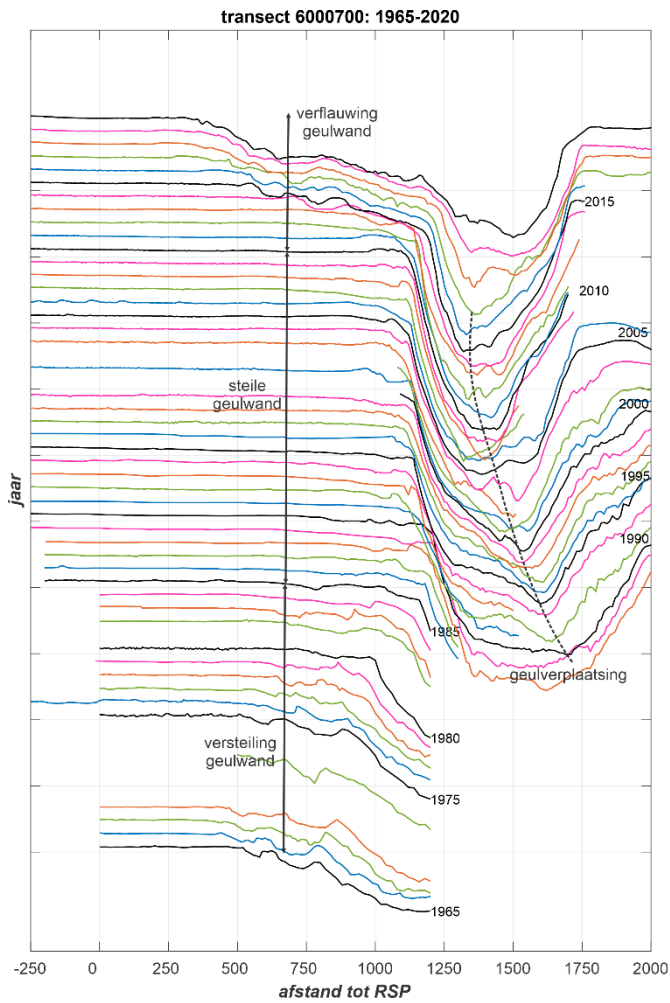
6 Referenties

- Cleveringa, J., 2001. Zand voor zuidwest Texel. Technisch advies RIKZ over vier mogelijke ingrepen in het Zeegat van Texel. Rapport RIKZ/OS/2001/ 031. Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee / RIKZ.
- Elias, 2006. Morphodynamics of Texel Inlet. Thesis, Delft university of Technology, Delft.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., 2017. Dynamic preservation of Texel Inlet, the Netherlands: understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. Netherlands Journal of Geosciences 96 (4), 293–317.
- Elias, E.P.L., 2021. De morfologische ontwikkeling van de Noordelijke Uitlopers van de Noorderhaaks. Rapport 11208035-001, Deltares, Delft, 55 p.
- Elias, E.P.L., Pearson, S. en van Weerdenburg, R. (2021). Evaluatie systeemsuppletie Bankje van Zoutelande. Deltares rapport 11205236-003-ZKS-0002
- Haecon, 2006. Actualisatie van de zandbalans van de Zee- en Westerschelde. Report 1249760008/lvp. Haecon (Ghent).
- Rakhorst, H.D., 1983. Plan afsluiting Molengat; een globale beschouwing. Notitie WWK-83.H230. Rijkswaterstaat, directie waterhuishouding en waterbeweging. District kust en zee. Adviesdienst Hoorn, 21 p.
- Rakhorst, H.D., 1984. Werking strandhoofden Noord-Holland, Texel, Vlieland, Rijkswaterstaat, adviesdienst Hoorn, Nota WWKZ-84.H007, 15 pag., 16 bijlagen.
- Steyaert, F.H.I.M., Prakken, A., Nicolai, A. (1999) KUSTVERDEDIGING VLIELAND NOORD-OOST. Nota ANZ 94.07, Rijksinstituut voor Kust en Zee & Directie Noord-Nederland.
- Teerenstra, G.L. 1999. Evaluatie zeewaartse projecten Vlieland noordoost en Ameland zuidwest, Rapport Rijkswaterstaat, Directie Noord- Nederland, 43 p.
- Van Heuvel, Tj. (1999). Evaluatie van zeewaartse kustverdediging. Rapport RIKZ-99.009. Rijkswaterstaat RIKZ.
- Verhagen, H. J. en van Rossum, H. (1990). Strandhoofden en paalrijen: evaluatie van hun werking. Min V&W, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Van der Werf, J.J, Giardino, A., Santinelli, G., 2011. Aanzanding en onderhoudsbaggerwerkzaamheden in de Sardijngeul. Rapport 1204421-004, Deltares, Delft, 44p.
- Vermeer, N. en Van der Werf, J.J., (2022, in voorbereiding). Morfologische studie Zeeuws-Vlaanderen. Rapport 11208035-004. Deltares, Delft.

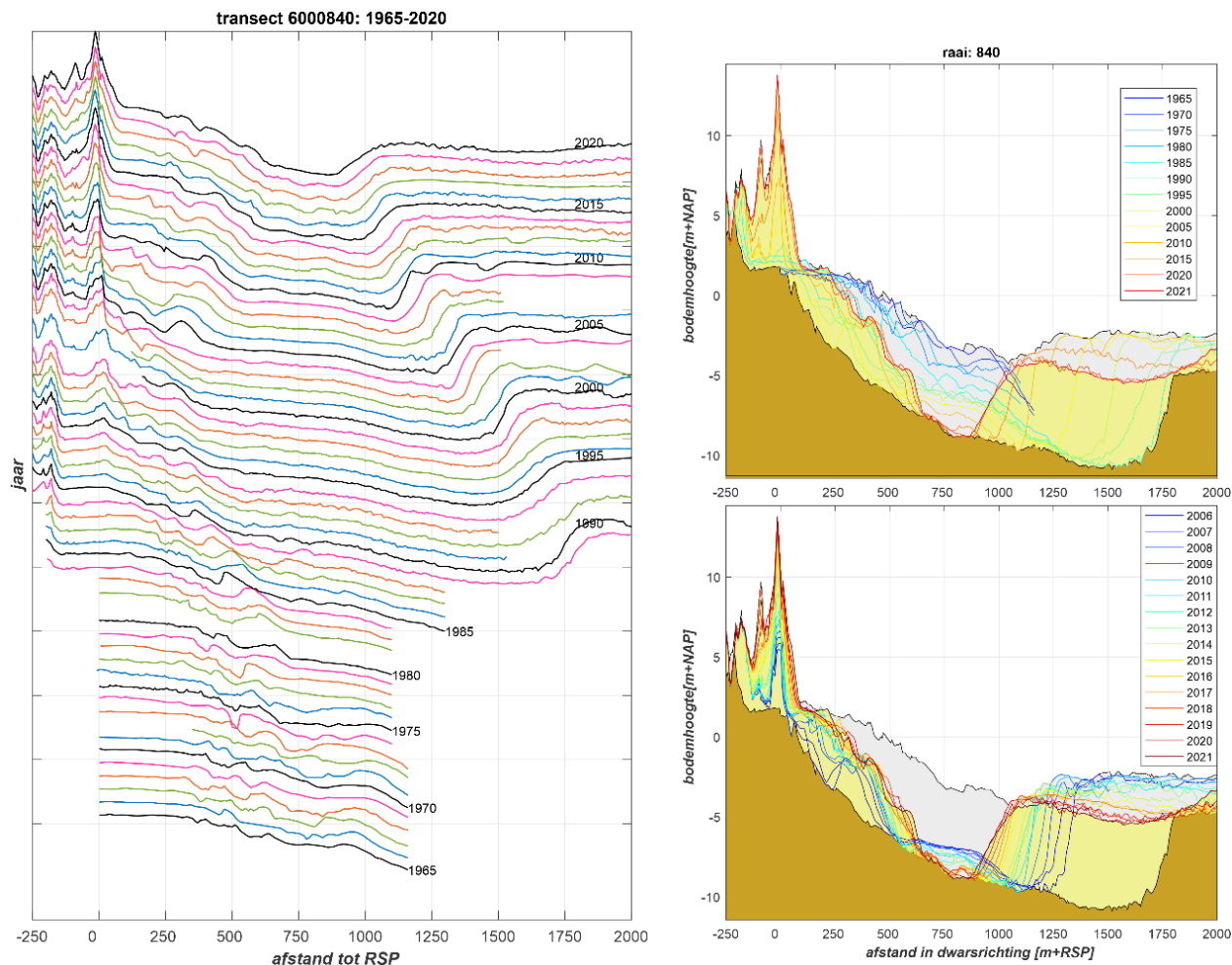
A Aanvullende figuren Texel zuidwest



Figuur A- 1: Conceptuele weergave van de onderliggende processen bij zuidwest Texel. (a) uniforme kustprocessen, (b) de bijdrage van getijstromingen door het zeegat, (c) vorming van de buitendelta en (d) lokale beïnvloeding van de processen door de buitendelta. (e) Processen ingetekend op de 2000 bodem.

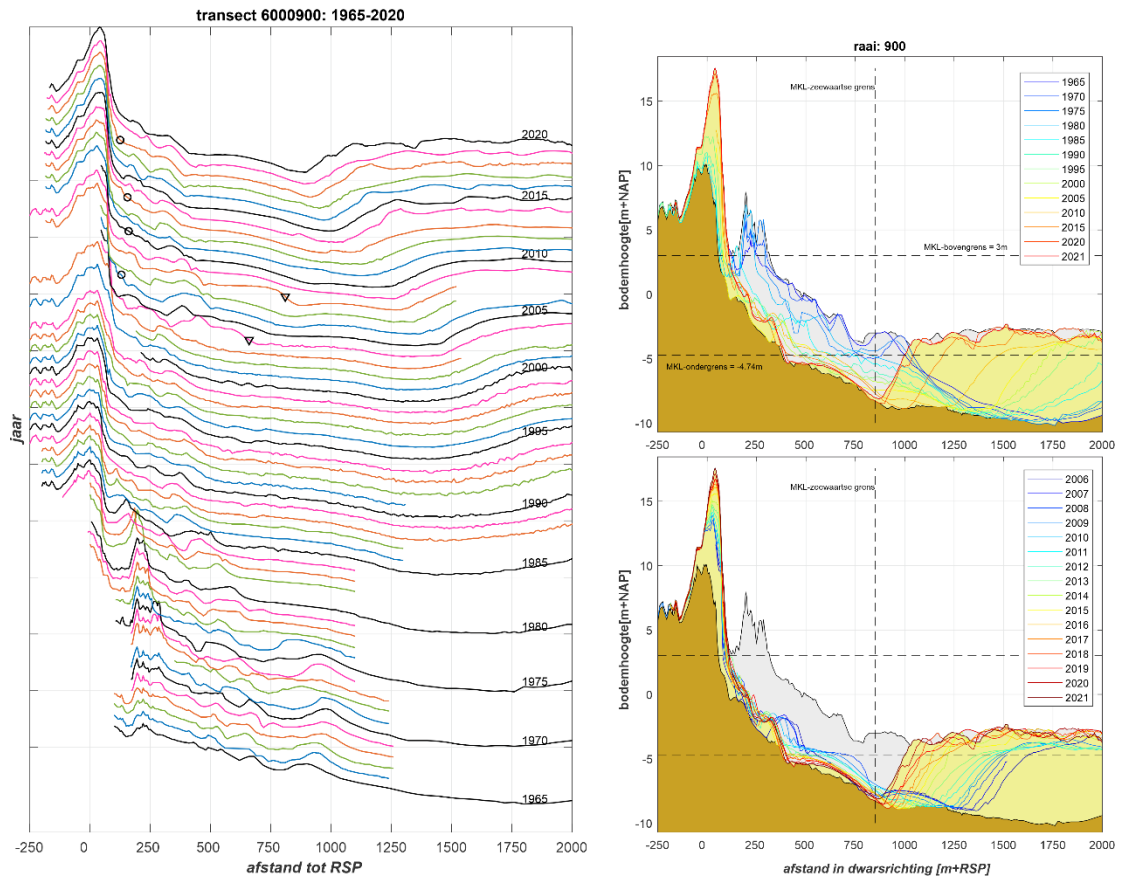
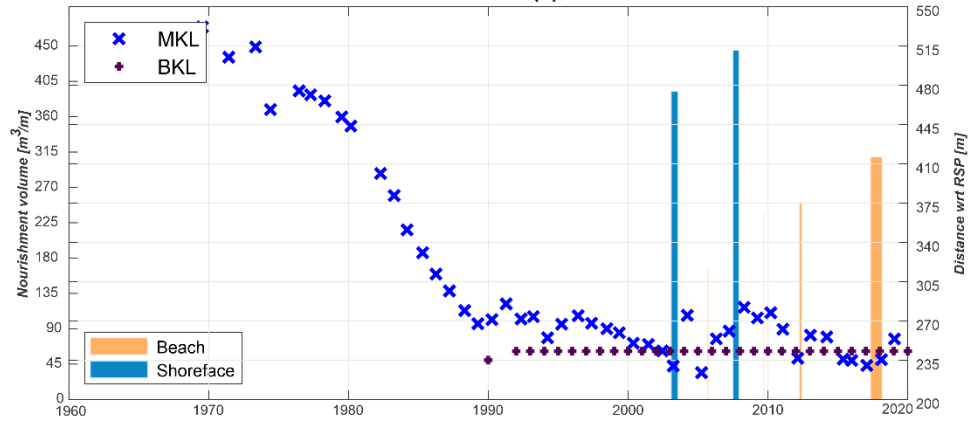


Figuur A- 2: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 700 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

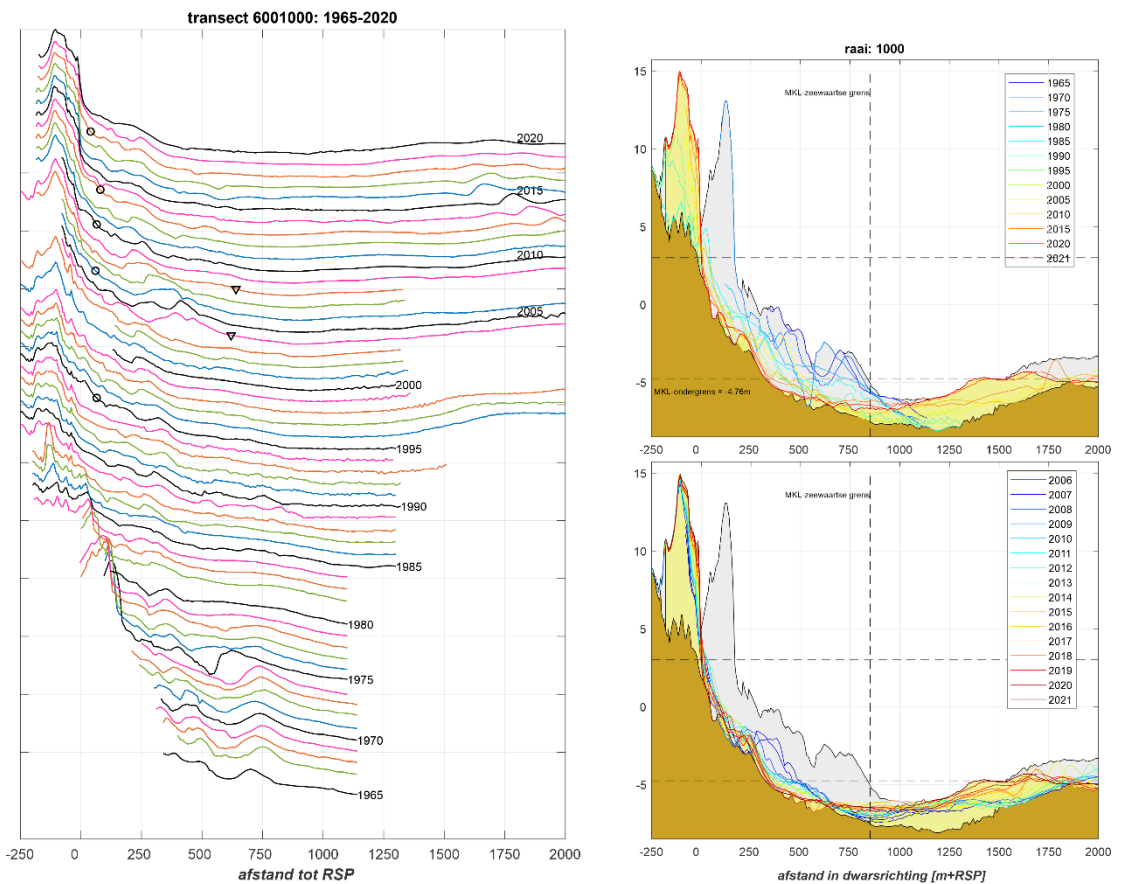
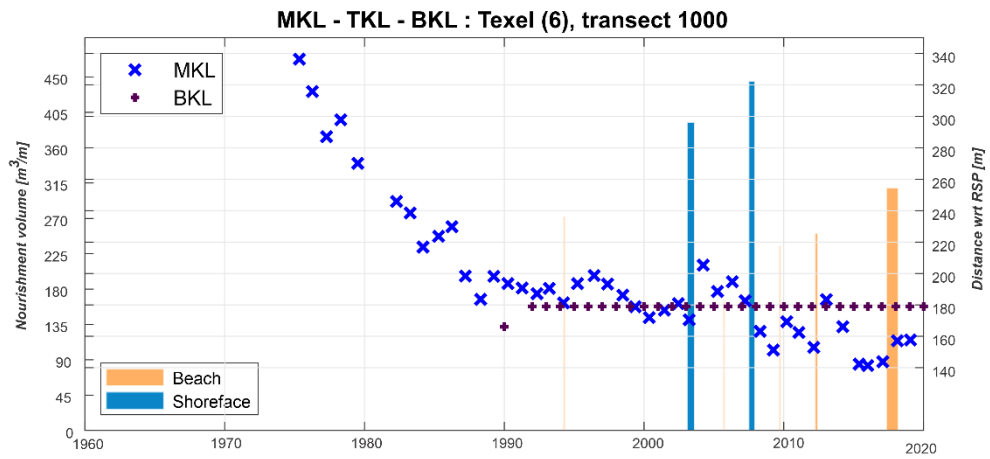


Figuur A- 3: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 840 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

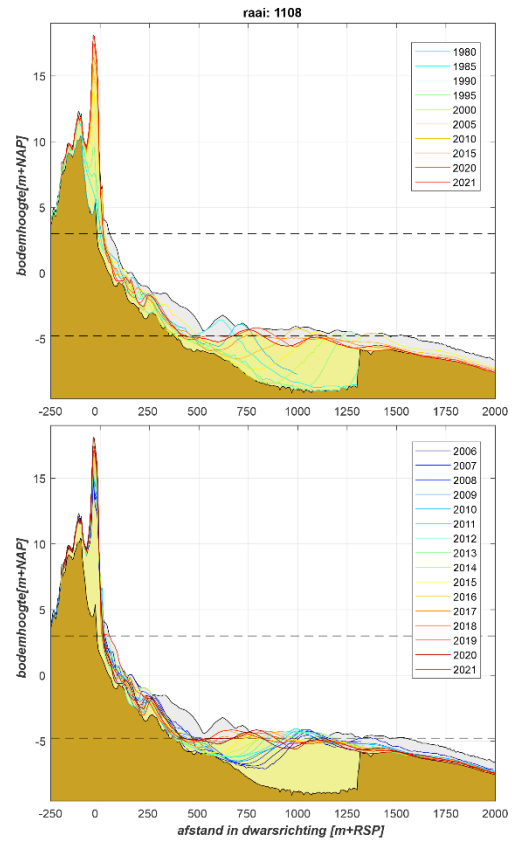
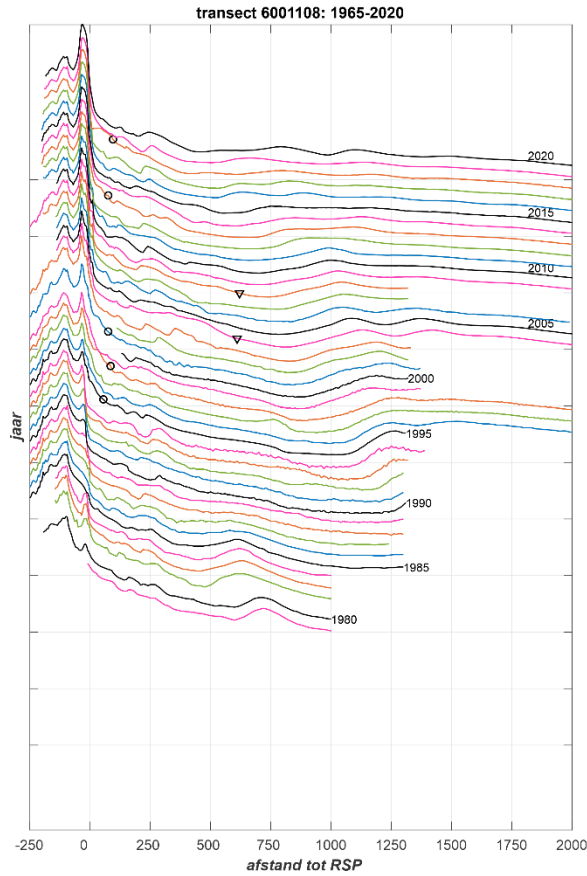
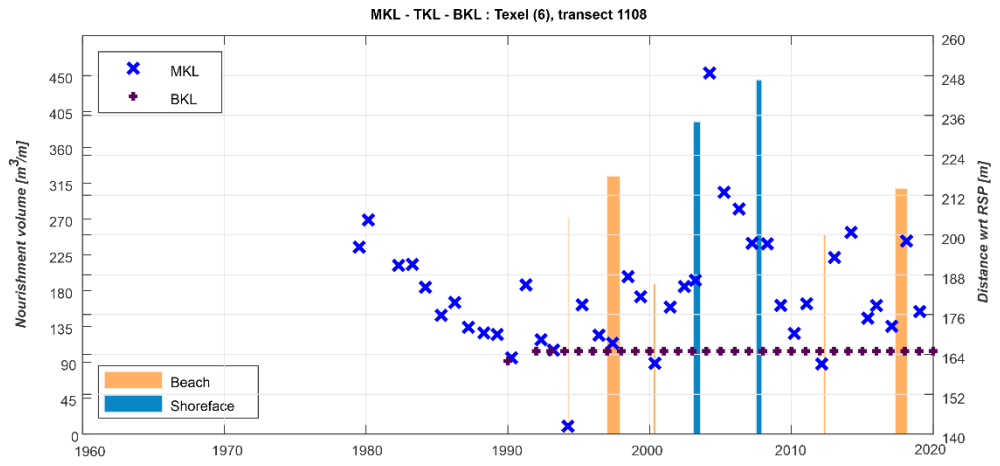
MKL - TKL - BKL : Texel (6), transect 900



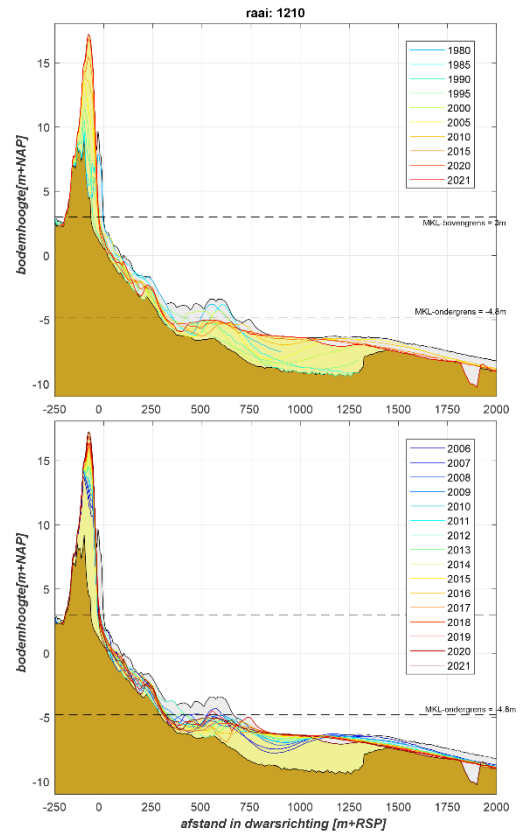
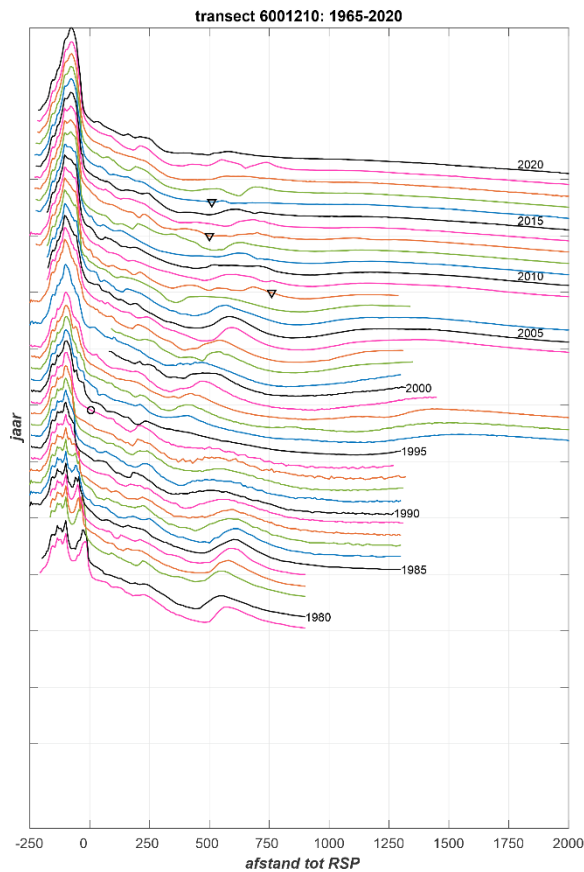
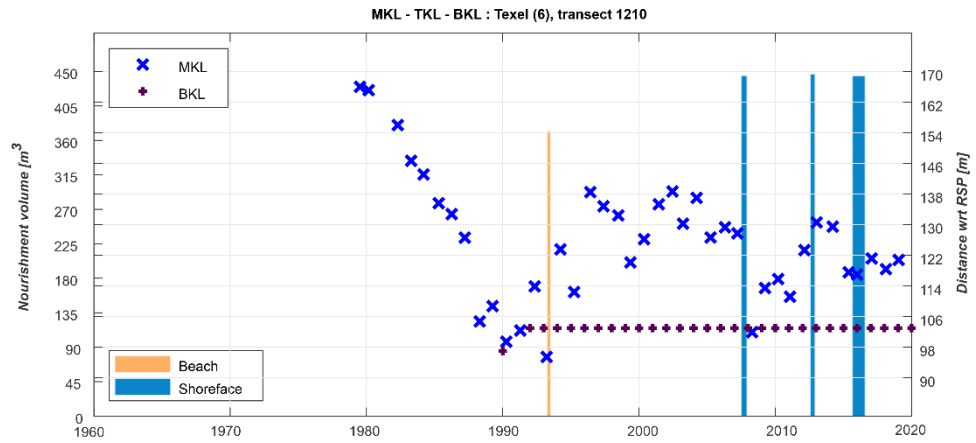
Figuur A- 4: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 900 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).



Figuur A- 5: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 1000 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

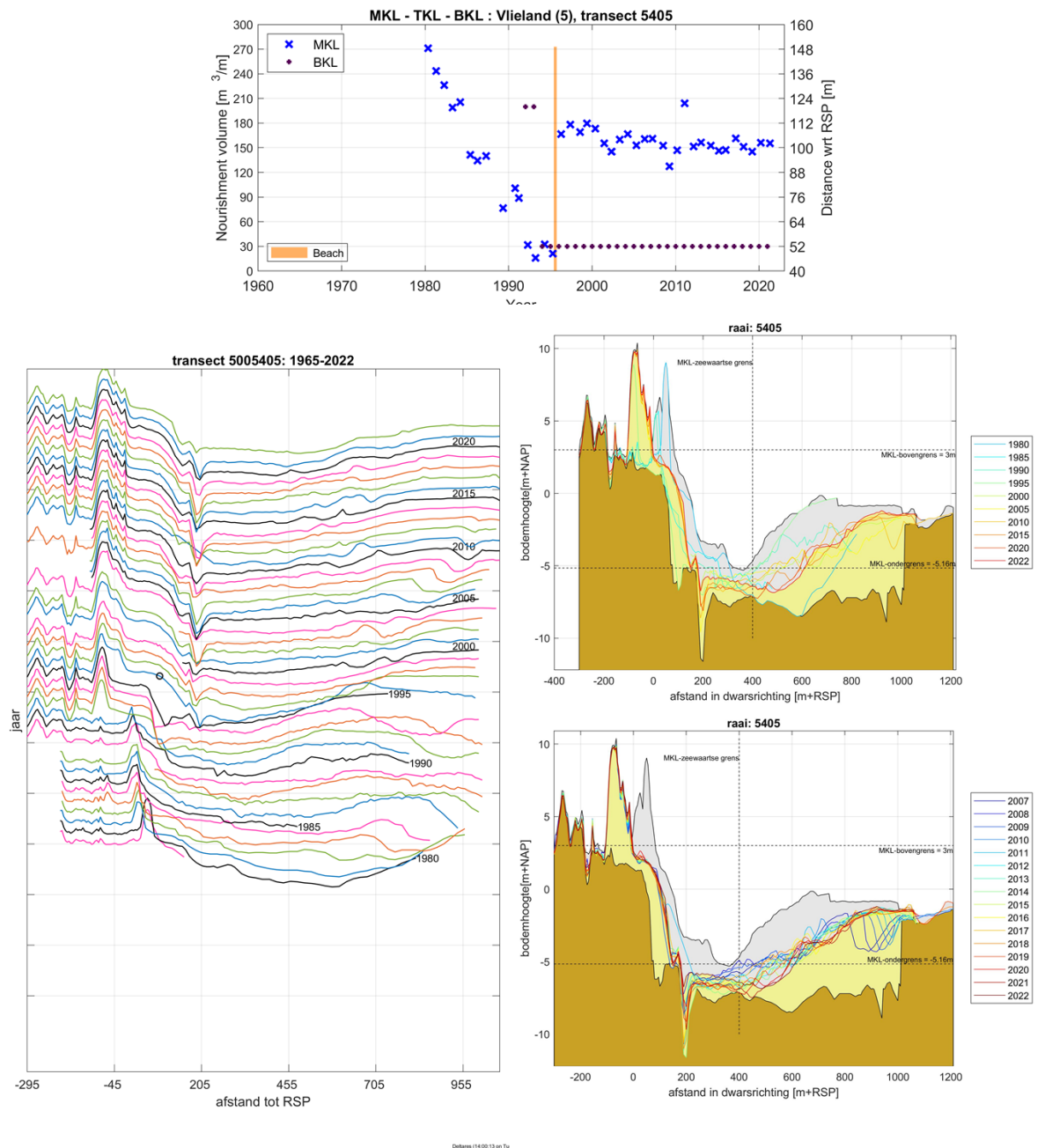


Figuur A- 6: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 1108 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

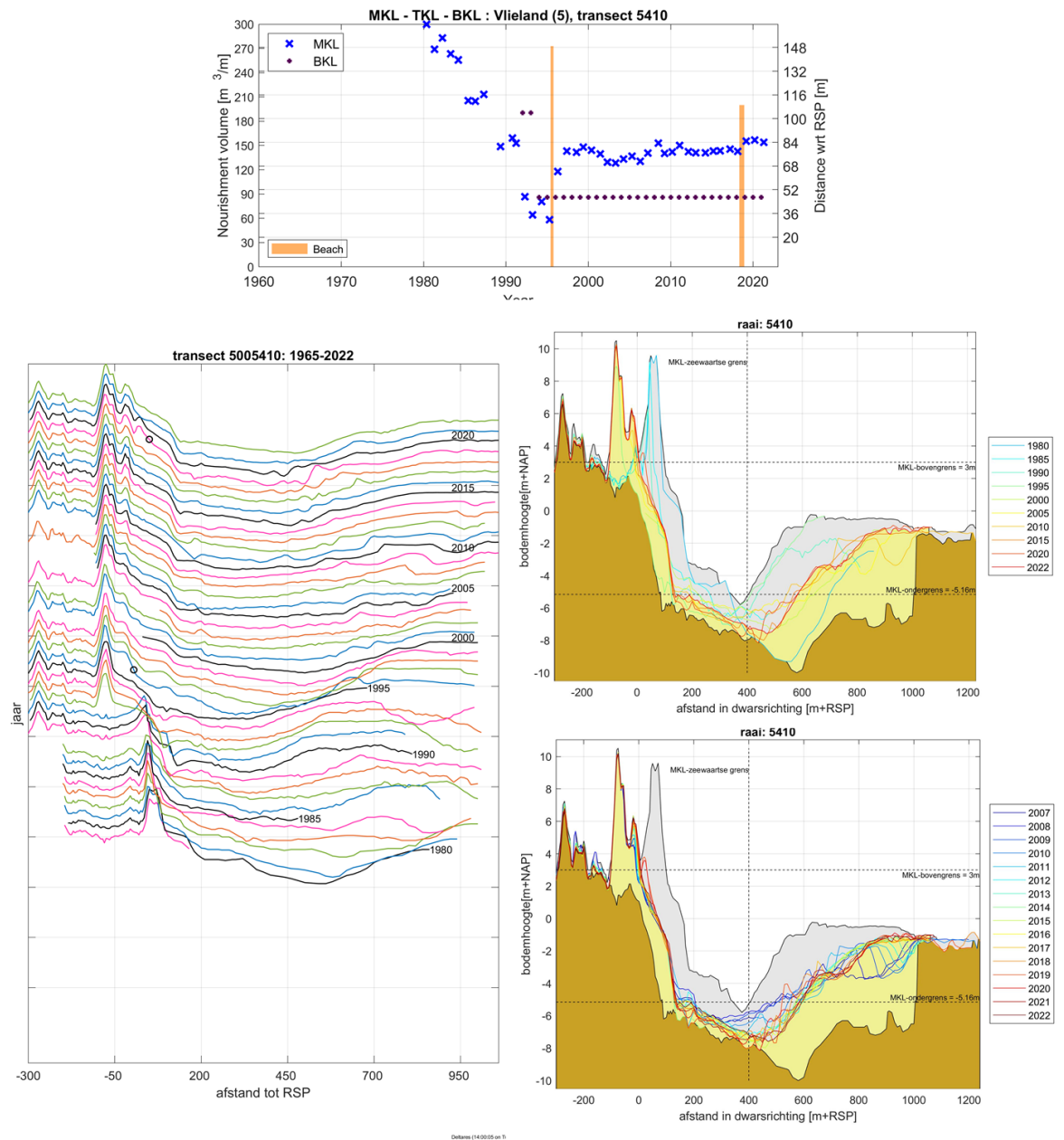


Figuur A- 7: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 1210 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2006-2021) met jaarlijks interval (rechtsonder).

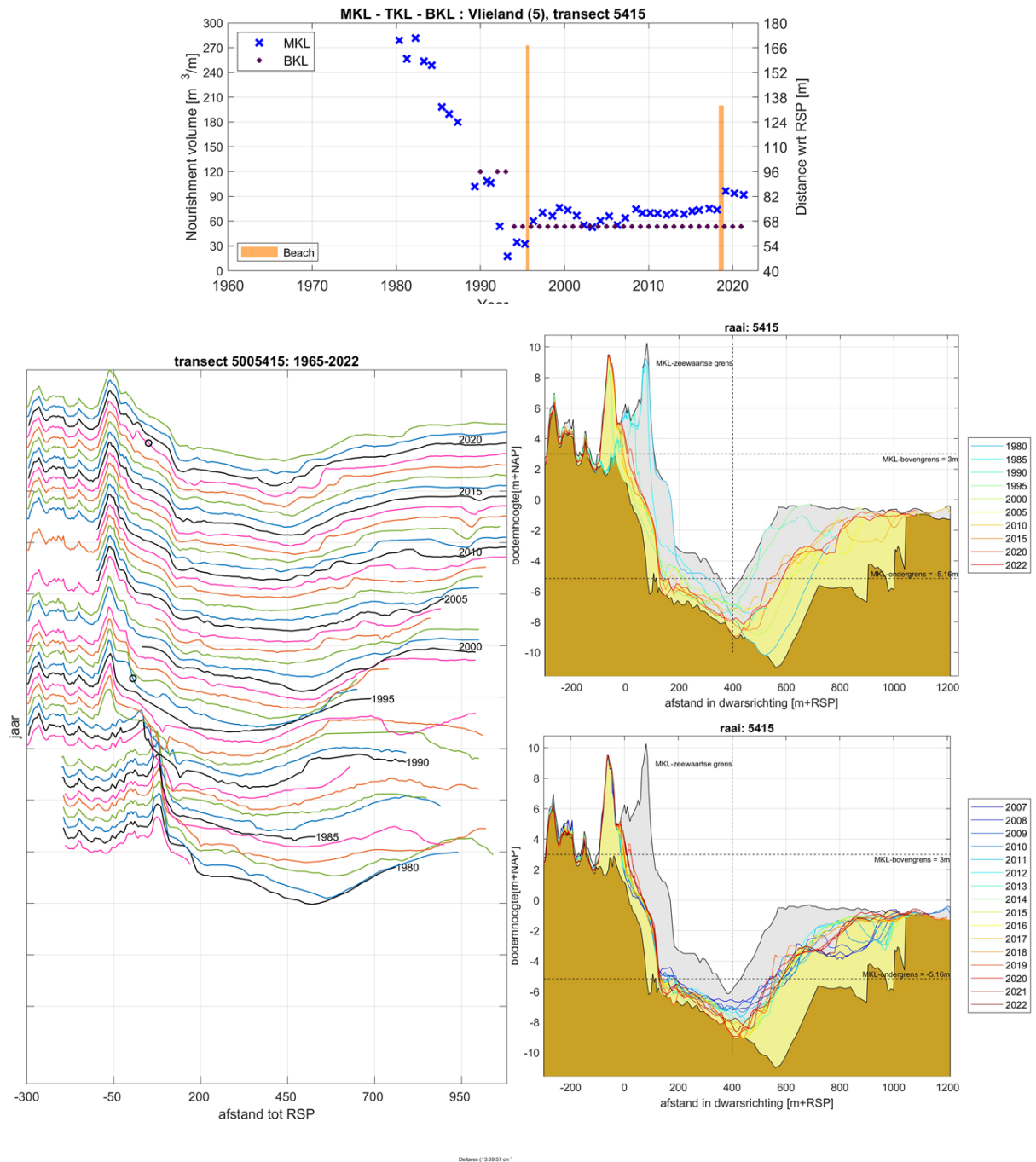
B Aanvullende figuren Vlieland Havenstrand



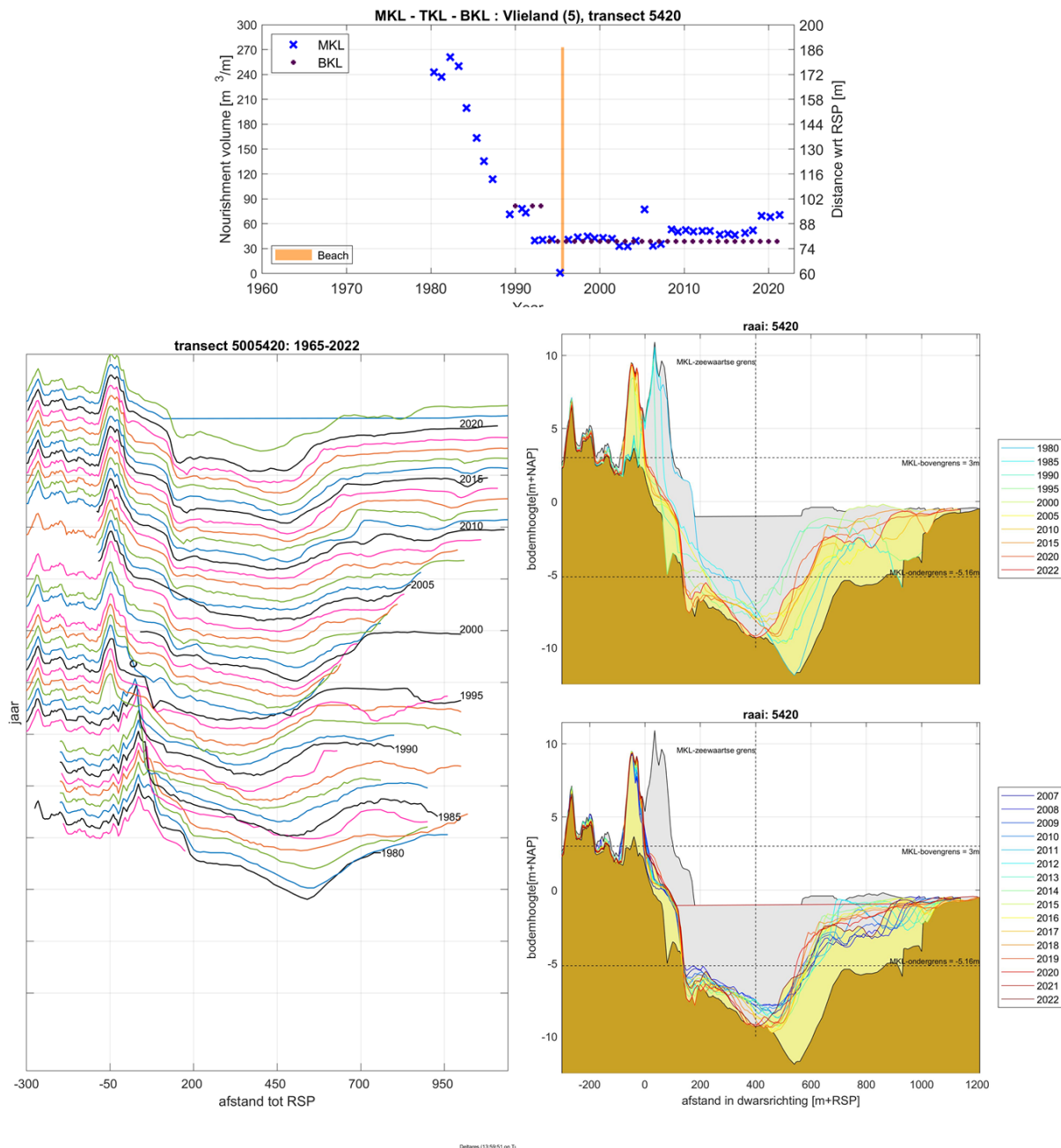
Figuur B- 1: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 5405 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1980-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).



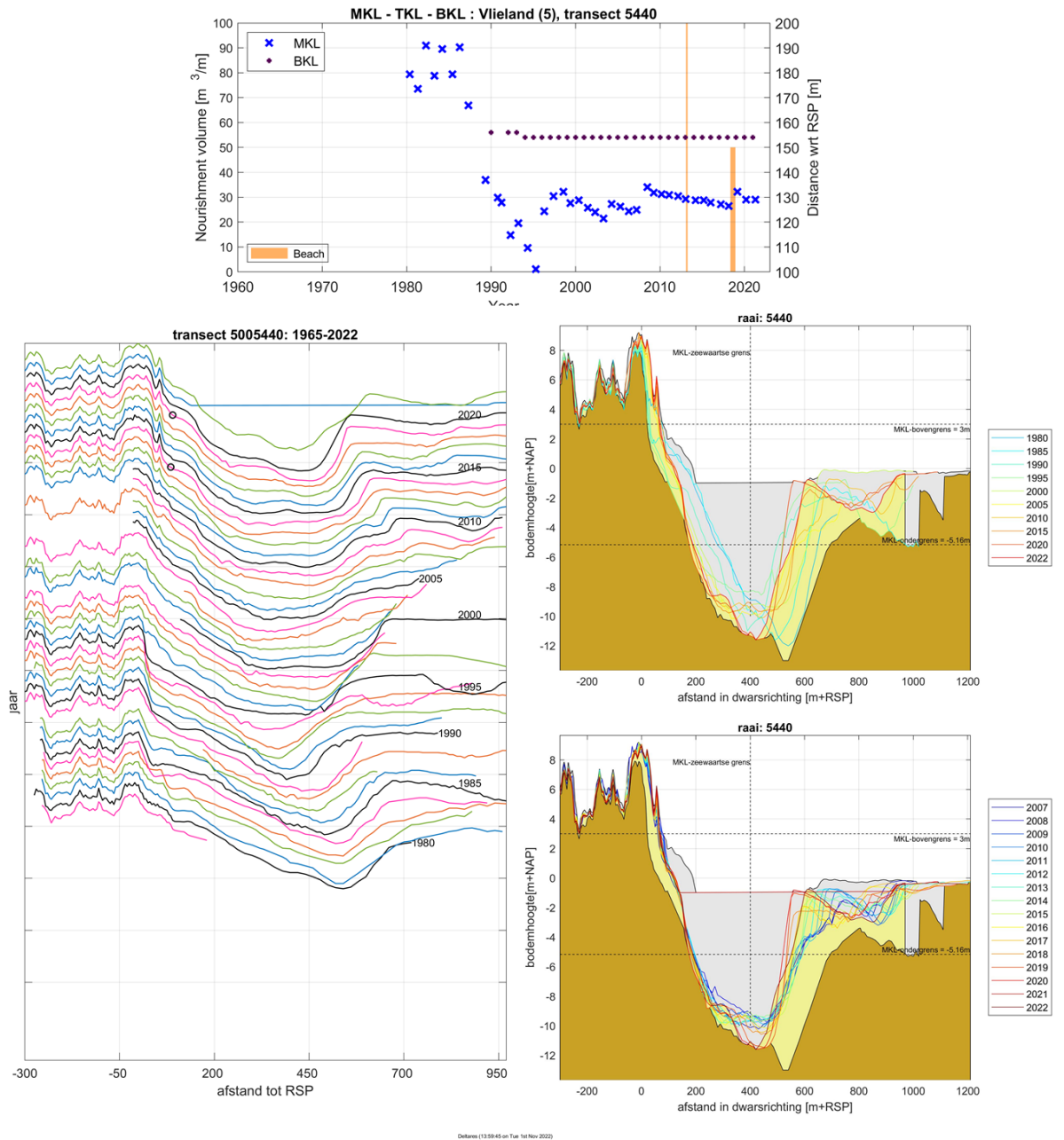
Figuur B- 2: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 5410 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1980-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).



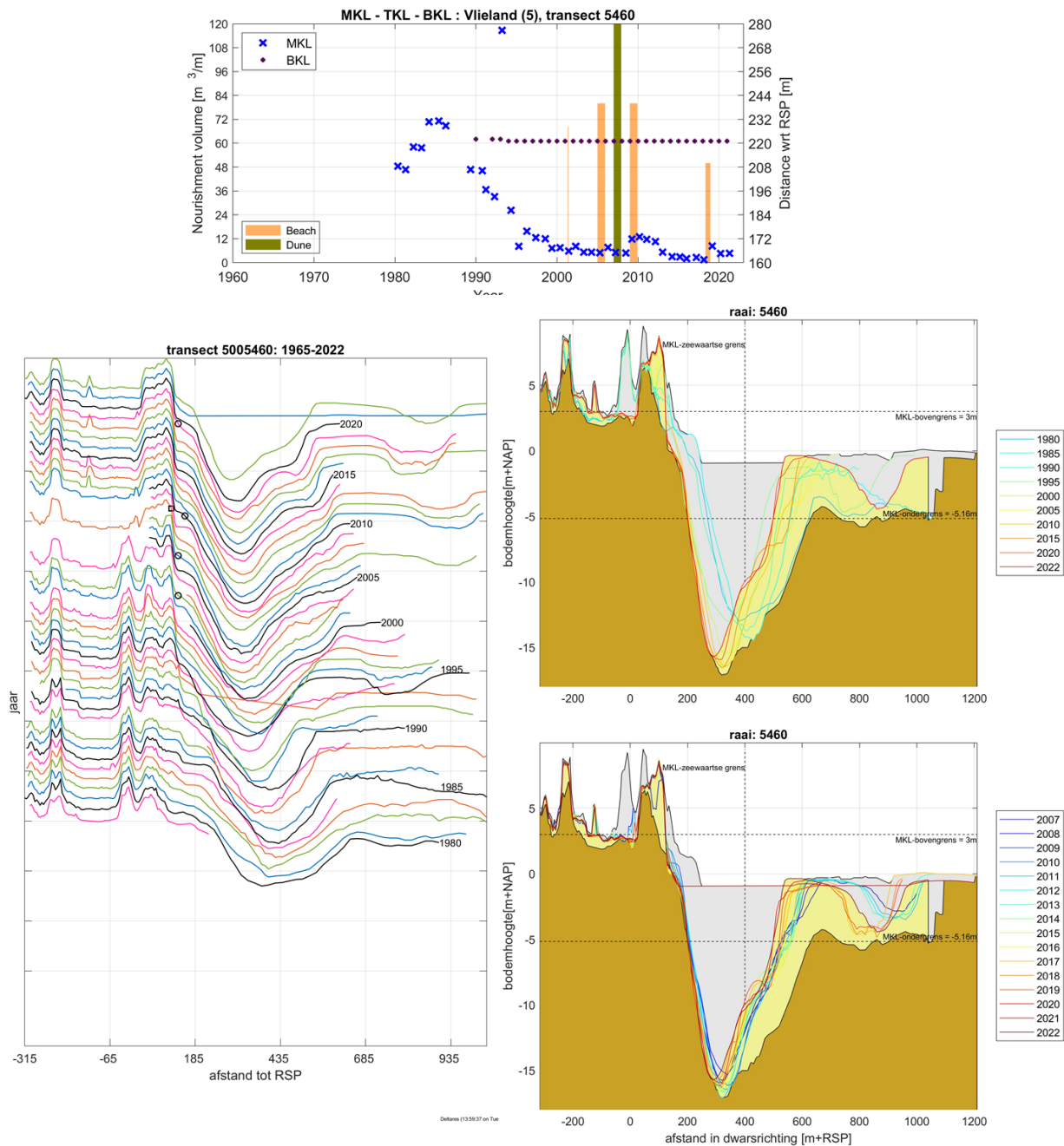
Figuur B- 3: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 5415 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1980-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).



Figuur B- 4: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 5420 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1980-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).

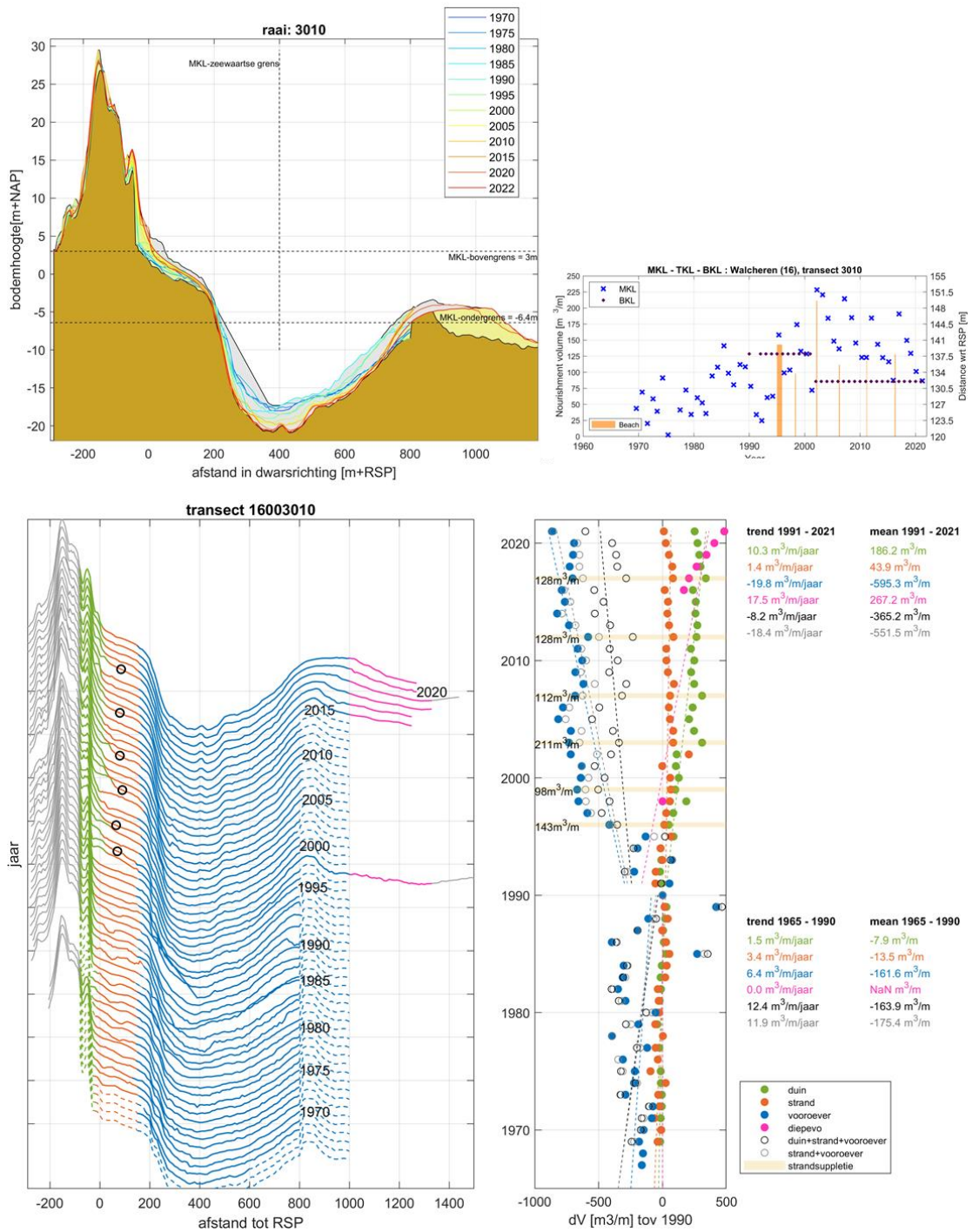


Figuur B- 5: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 5440 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1980-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).

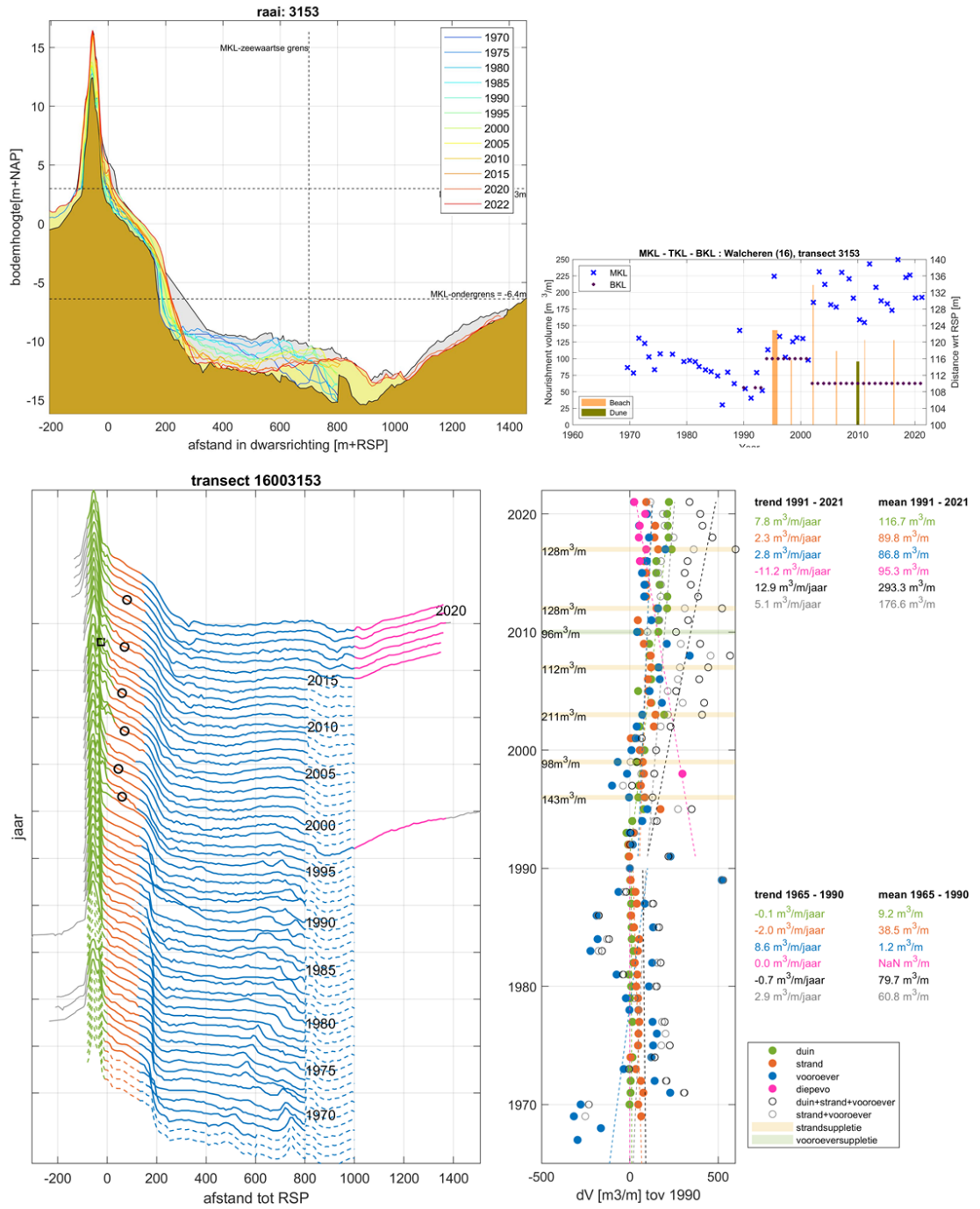


Figuur B- 6: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 5460 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1980-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).

C Aanvullende figuren Dishoek

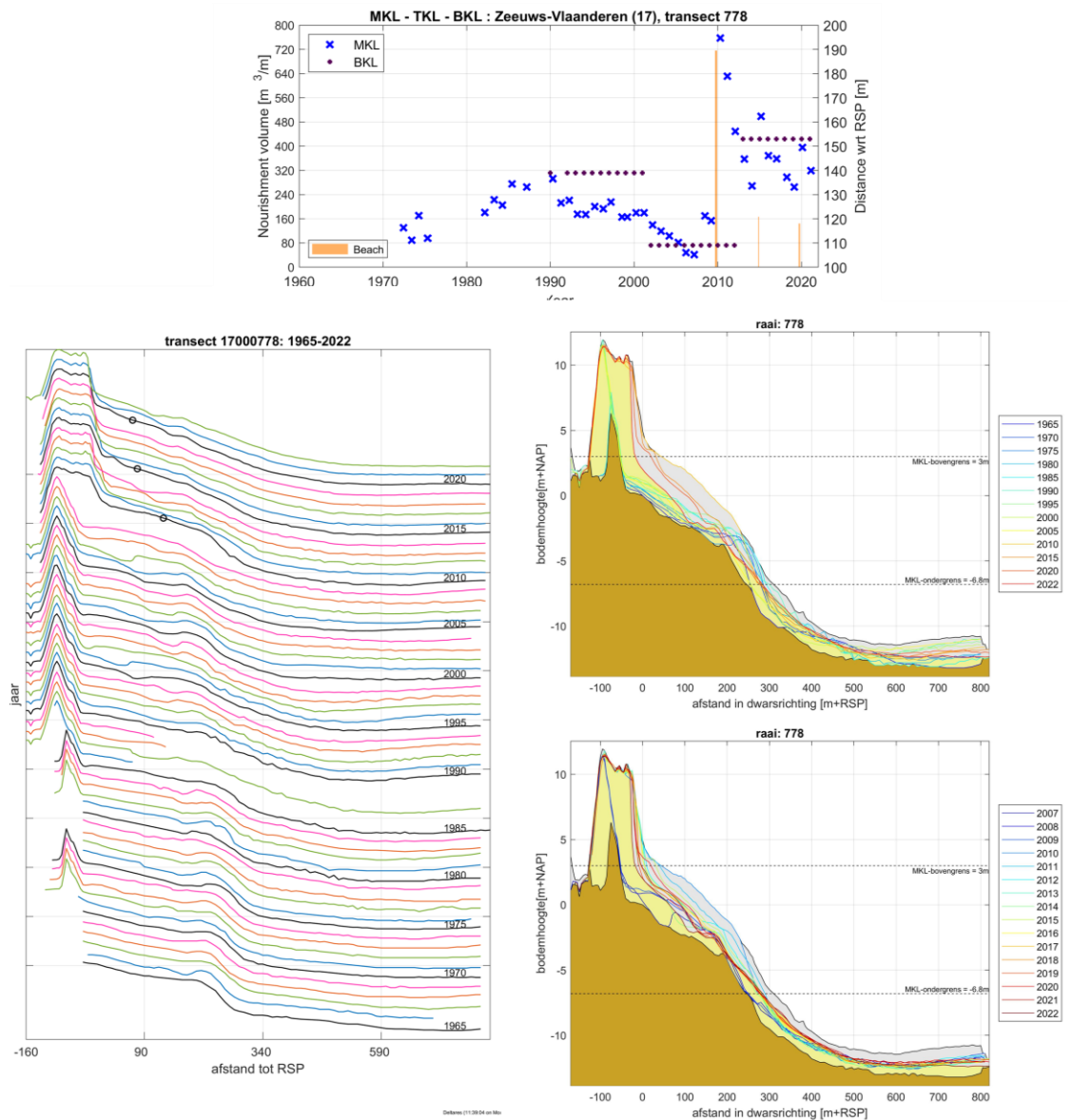


Figuur C- 1: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 3010 d.m.v. het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1970-2021) in 5-jaars interval (linksboven), MKL-ontwikkeling (rechtsboven) en een timestack (linksonder) met de volumeontwikkeling per kustzone.

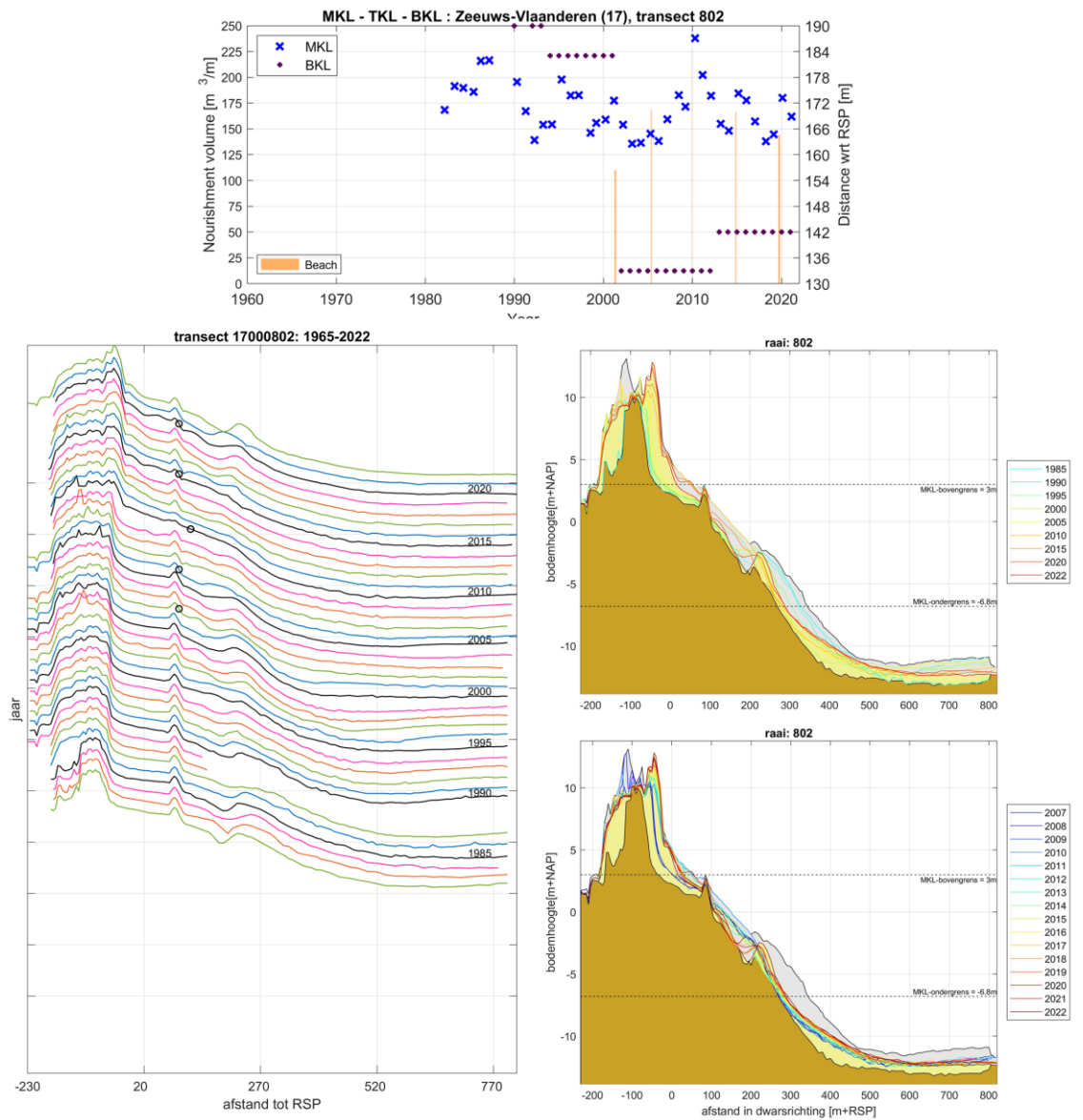


Figuur C-2: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 3153 d.m.v. het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1970-2021) in 5-jaars interval (linksboven), MKL-ontwikkeling (rechtsboven) en een timestack (linksonder) met de volumeontwikkeling per kustzone.

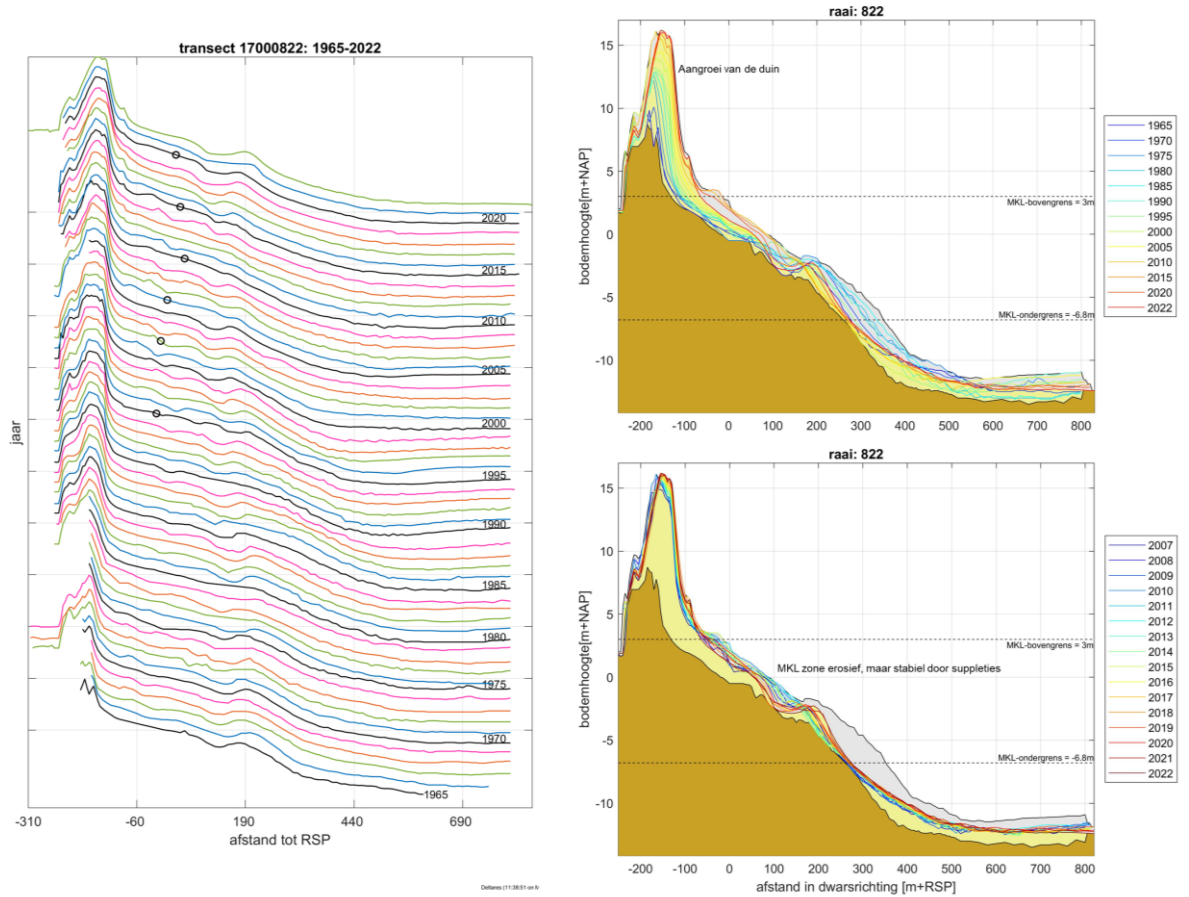
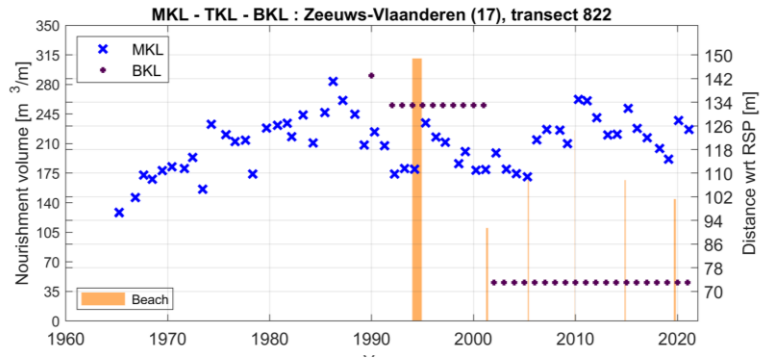
D Aanvullende figuren Nieuwvliet-Groede



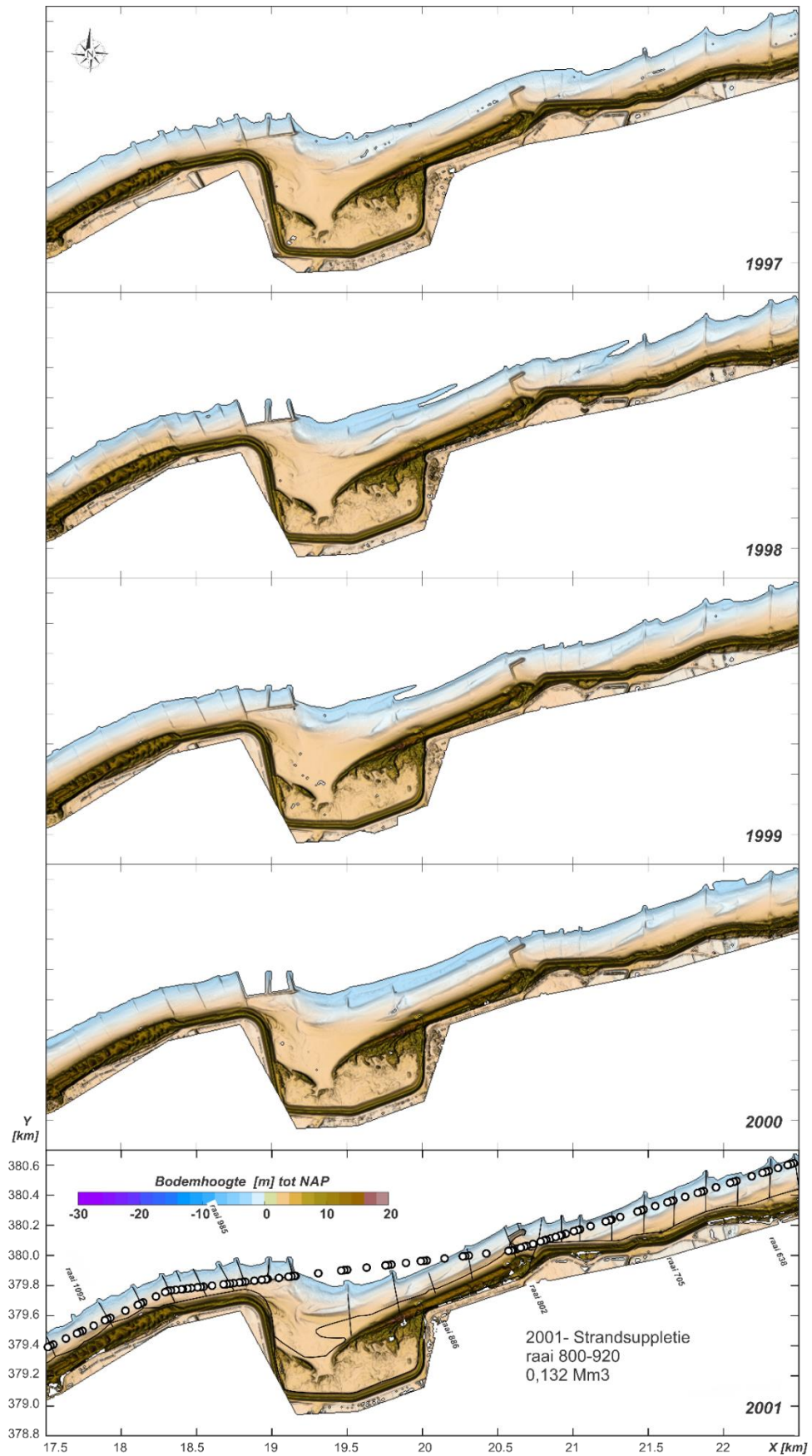
Figuur D - 1: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 778 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1965-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).



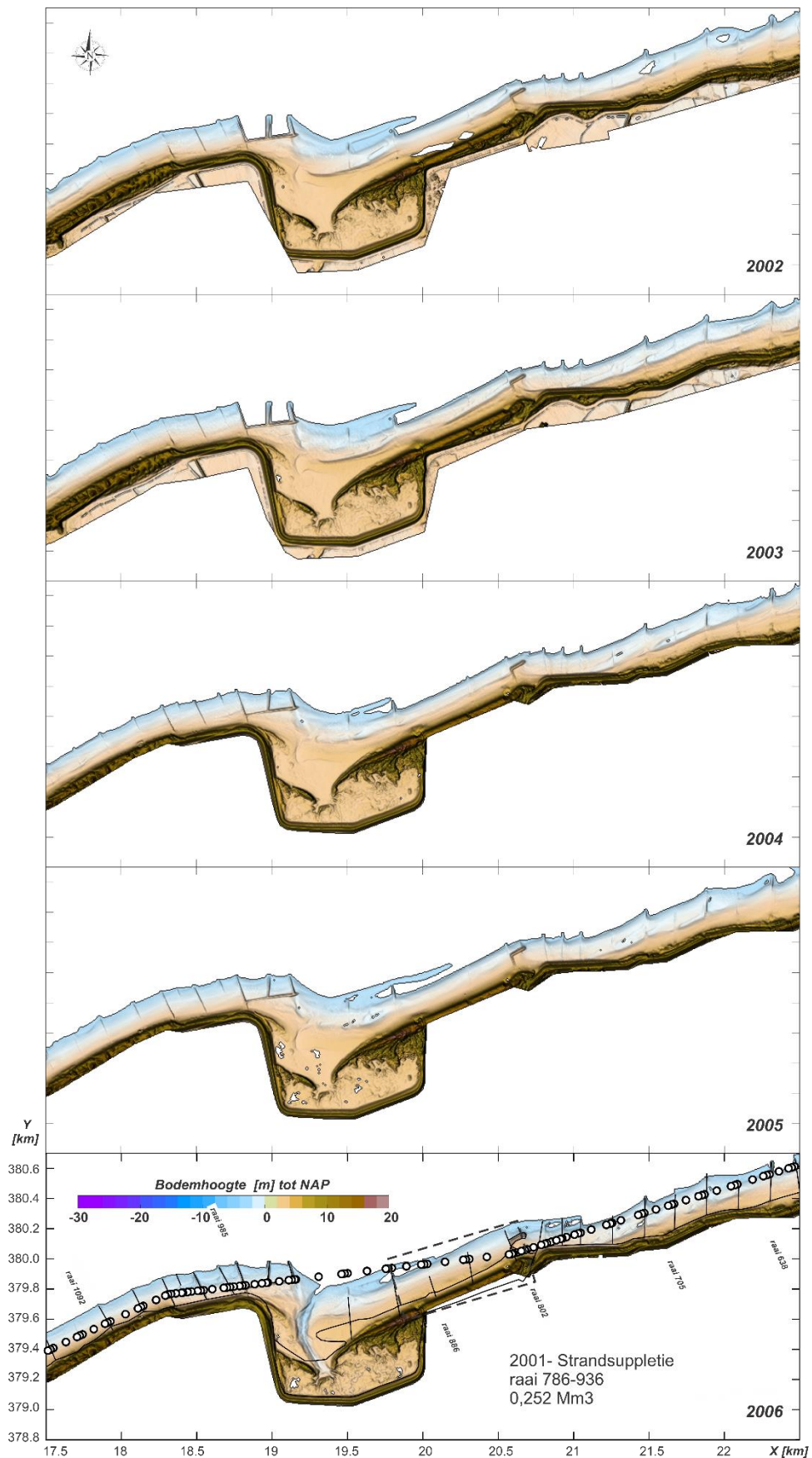
Figuur D - 2: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 802 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1965-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).



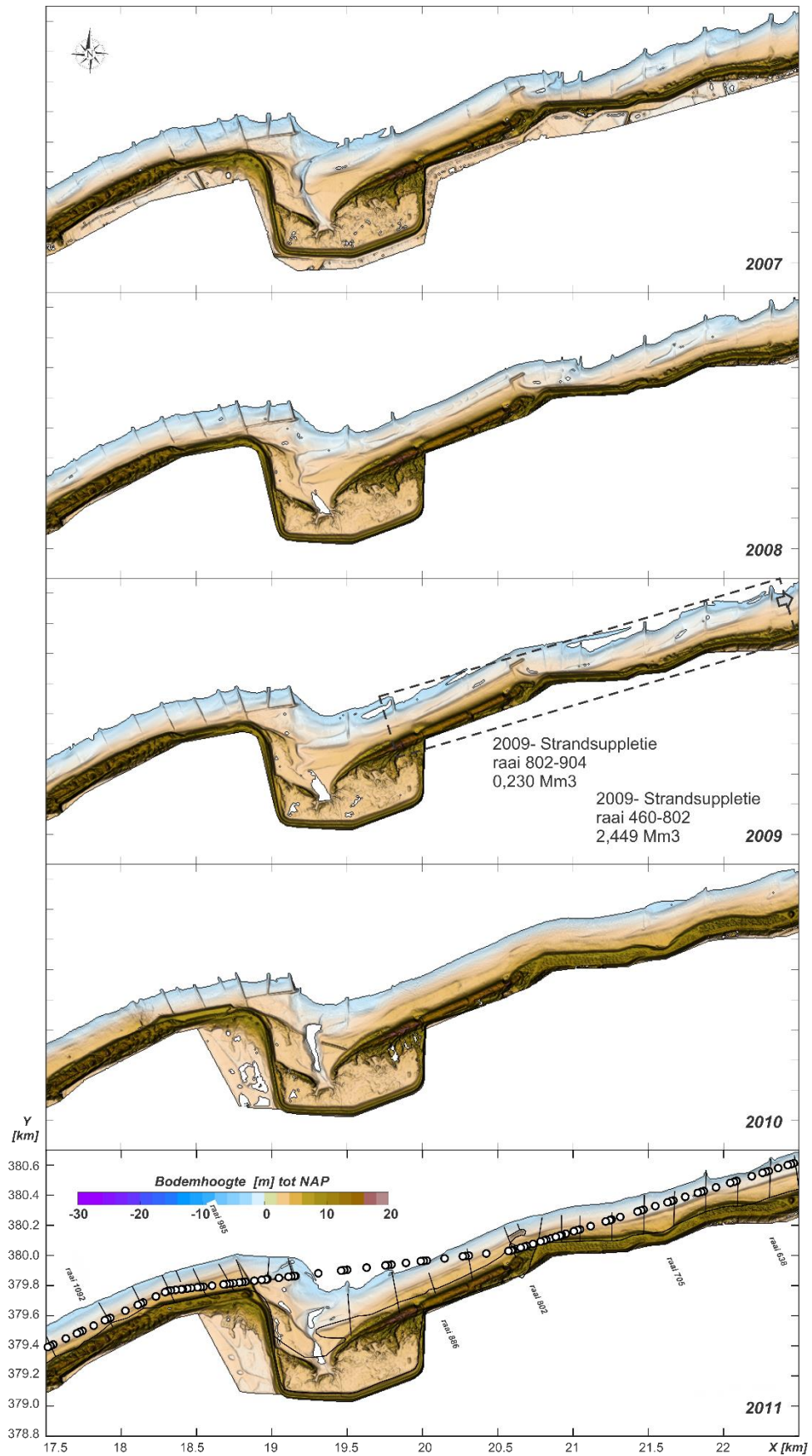
Figuur D - 3: Een overzicht van de ontwikkeling van Raai 822 d.m.v. een timestack (links) en het dwarsprofiel over de hele meetperiode (1965-2022) in 5-jaars interval (rechtsboven) en de recente metingen (2007-2022).



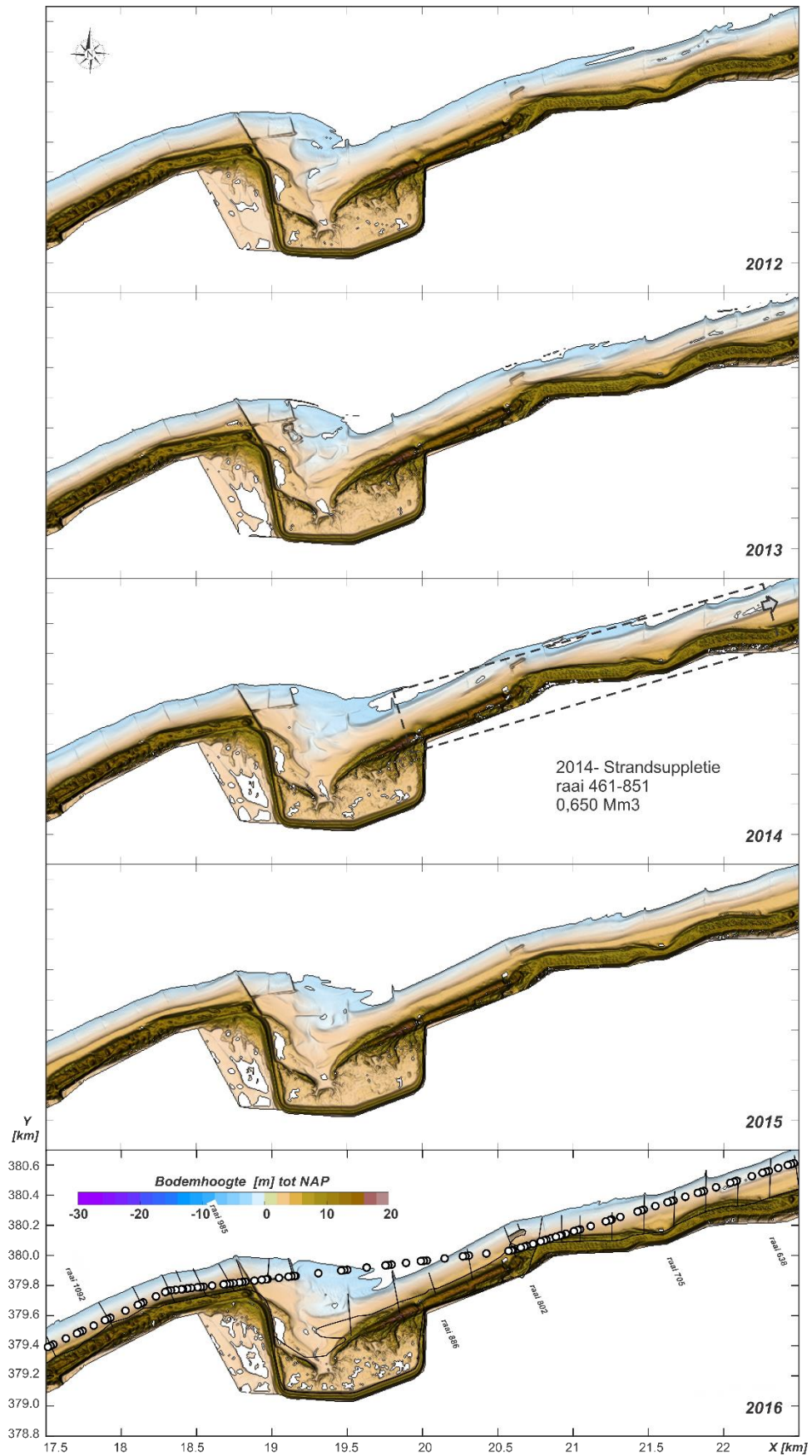
Figuur D - 4: Een overzicht van de LiDAR opnamen over de periode 1997-2001.



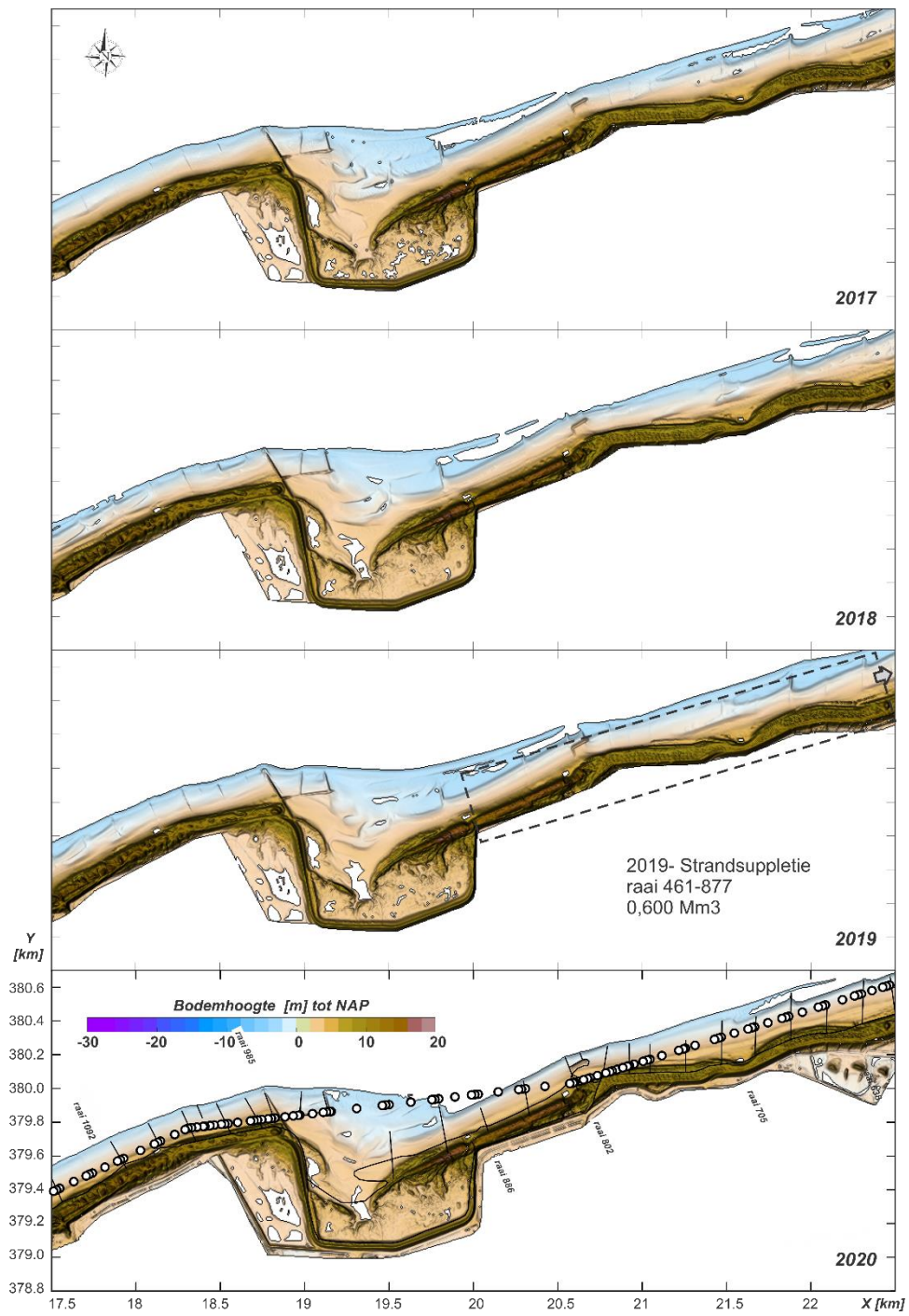
Figuur D - 5: Een overzicht van de LiDAR opnamen over de periode 2002-2006.



Figuur D - 6: Een overzicht van de LiDAR opnamen over de periode 2007-2011.



Figuur D - 7: Een overzicht van de LiDAR opnamen over de periode 2011-2016.



Figuur D - 8: Een overzicht van de LiDAR opnamen over de periode 2017-2020.

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