

Morfologische studie Zeeuws-Vlaanderen

Beschrijving van de morfologische ontwikkeling van de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede en de invloed van de Zwakke Schakel versterking



Morfologische studie Zeeuws-Vlaanderen

Beschrijving van de morfologische ontwikkeling van de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede en de invloed van de Zwakke Schakel versterking

Auteur(s)

Nienke Vermeer

Jebbe van der Werf

Morfologische studie Zeeuws-Vlaanderen

Beschrijving van de morfologische ontwikkeling van de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede en de invloed van de Zwakke Schakel versterking

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Stefan Pluis
Referenties	Zie Hoofdstuk 7
Trefwoorden	Voordelta, Westerscheldemonding, Wielingen, Zeeuws-Vlaanderen, Nieuwvliet-Groede, Kruishoofd, zandsuppleties, Zwakke Schakels

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	22-12-2022
Projectnummer	11208035-004
Document ID	11208035-004-ZKS-0003
Pagina's	71
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Nienke Vermeer	
	Jebbe van der Werf	

Samenvatting

Het onderzoeksprogramma Kennis Primaire Processen Beheer & Onderhoud Kust (KPP B&O Kust) ondersteunt Rijkswaterstaat bij het onderhoud en beheer van de kust. De onderhoudsinspanning van de kustlijn van Zeeuws-Vlaanderen is groot. Het begrijpen van het morfologische systeem is belangrijk voor het kustbeheer en –onderhoud in Zeeuws-Vlaanderen. Uit de beheerbibliotheek van Zeeuws-Vlaanderen (Mastbergen & Quataert, 2020) blijkt echter dat er weinig actuele kennis voor handen is voor dit kustvak. Deze studie heeft als doel om de morfologische kennis van de kust van Zeeuws-Vlaanderen te actualiseren met nadruk op de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede.

Uit de toetsing in 2005 bleek dat vijf locaties langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen niet meer aan de veiligheidsnorm voldeden en dus versterkt moesten worden. De kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede was één van deze Zwakke Schakels. Hier is de kust versterkt in 2009-2010 door een zeewaartse duinverzwaring in combinatie met een strandverbreding. Vervolgens is de BasisKustLijn (BKL) in 2012 zeewaarts verschoven om het nieuwe profiel in stand te houden. Daarnaast is bij wijze van pilot een ‘zandbrommer’ of ‘erosieberm’ aangebracht in de vorm van een vooroeversuppletie. Ondanks deze flinke suppletie-inspanningen blijkt het handhaven van de huidige BKL rondom het zogeheten Kruishoofd (JarKus raaien 768-791) niet mogelijk. Sinds de Zwakke Schakel versterking in 2009 erodeert hier de kust, in de periode tussen twee strandsuppleties, gemiddeld met 9 tot 12 meter per jaar.

In deze studie is met behulp van analyses van Vaklodingen en JarKus data de morfologische ontwikkeling in beeld gebracht. Vervolgens zijn berekeningen met het zogeheten VlaBa model (Röbke et al., 2018) gebruikt om de waterbeweging en netto zandtransporten in kaart te brengen.

Deze analyses en berekeningen laten zien dat de trends in verandering van de zandvolumes sterk zijn veranderd na de Zwakke Schakel versterking. Met name rondom het Kruishoofd is er sinds de versterking sprake van een sterk erosieve trend (gemiddeld -70, -22 en -21 m³/m/jaar voor het duin, het strand en de vooroever). Twee ontwikkelingen zorgen ervoor dat gesuppleerd zand hier gemakkelijk uit het profiel kan verdwijnen: Enerzijds is de kustlijn hier door de versterking sterk zeewaarts verschoven waardoor het strand erg smal is en de vooroever zeer steil. Anderzijds laten historische kaarten en bodemdata zien dat de geul die hier voor de kust ligt (de Wielingen) sinds de 17^e eeuw steeds ruimer (i.e. breder en dieper) is geworden en dichter bij de kust is komen te liggen. Doordat de brandingszone zeer smal is, is de kustdwarse zandaanvoer onder kalme condities waarschijnlijk beperkt. Daarnaast zal zand dat door golven is geërodeerd gemakkelijk via de nabijgelegen Wielingen kustlangs worden weggevoerd. De modelberekeningen bevestigen dat de kustnabije stroming door het landwaarts opschuiven van de dieptecontouren in de tijd is toegenomen. Voor de kust van Nieuwvliet-Groede zijn de transporten voldoende groot om door golven geërodeerd zand weg te voeren. Daarnaast is er waarschijnlijk beperkte zandaanvoer vanuit het westen, doordat hier als onderdeel van de Zwakke Schakel versterking een bijna driehonderd meter lange strekdam is aangelegd die het merendeel van het kustlangez transport in de brandingszone invangt.

Inhoud

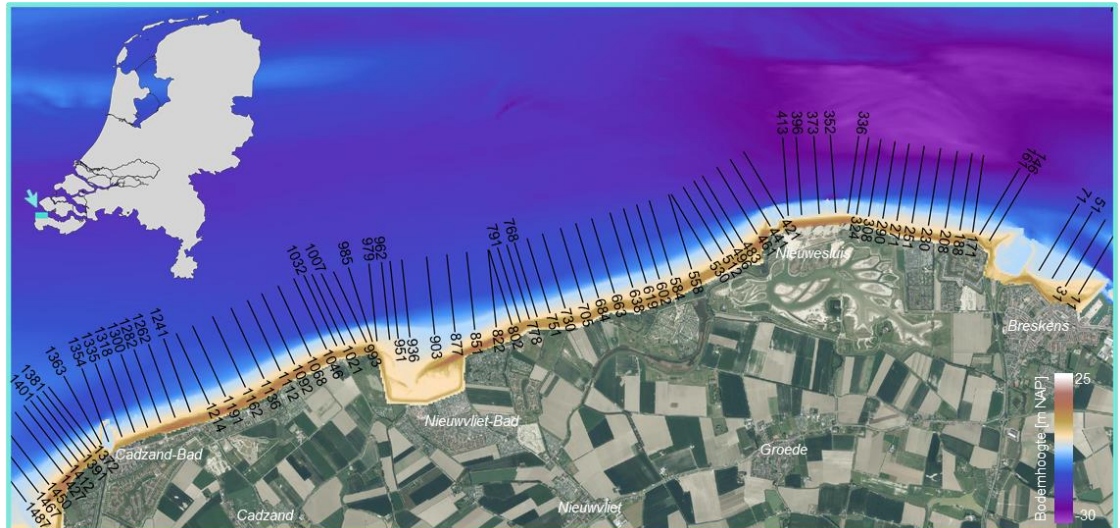
	Samenvatting	4
	Inhoud	5
1	Inleiding	7
1.1	Achtergrond	7
1.2	Doelstelling en vraagstelling	7
1.3	Schaalcascade	8
1.4	Aanpak	9
1.5	Opbouw van het rapport	10
2	Data en analysemethoden	11
2.1	Beschikbare data	11
2.2	Uitgevoerde analyses	11
3	Overzicht van de kust van Zeeuws-Vlaanderen	13
3.1	Huidige morfologie	13
3.1.1	Schelde-monding	13
3.1.2	Zeeuws-Vlaamse kust	13
3.2	Overzicht van suppleties en overige ingrepen	15
3.2.1	Suppleties	15
3.2.2	Zwakke Schakel versterkingen	17
4	Grootschalige morfologische ontwikkeling	19
4.1	Voordelta	19
4.2	Schelde-monding	19
4.2.1	Morfologische ontwikkeling	19
4.2.2	Samenhang monding en Westerschelde	21
4.2.3	Samenhang met Vlaamse kust	22
4.3	Ontwikkeling Zeeuws-Vlaamse kust	23
4.3.1	Morfologische ontwikkeling	23
4.3.2	Waterbeweging en netto zandtransporten	25
4.4	Samenvatting grootschalige morfologische ontwikkeling	27
5	Kleinschalige morfologische ontwikkeling	28
5.1	Morfologische ontwikkelingen	29
5.2	Lokale ontwikkeling van de kustlijn	37
5.3	Kwantificering van volumes	38
5.3.1	Volume(veranderingen) onder het gehele JarKus profiel	38
5.3.2	Volumeveranderingen per zone onder het JarKus profiel	39
5.3.3	Volumeveranderingen bij het Kruishoofd	41

5.3.4	Trends in volumeverandering	43
5.4	Waterbeweging en netto zandtransporten	46
5.5	Samenvatting kleinschalige morfologische ontwikkeling	48
6	Conclusies en aanbevelingen	49
6.1	Conclusies	49
6.2	Aanbevelingen	51
7	Referenties	52
A	Appendix	54
A.1	Satellietbeelden Zwakke Schakel versterkingen	54
A.1.1	Breskens (2011-2012)	54
A.1.2	Nieuwesluis (2013-2016)	55
A.1.3	Nieuwvliet-Groede (2009-2010)	55
A.1.4	Herdijkte Zwarte Polder (2010-2011)	56
A.1.5	Cadzand-Bad (2013-2016)	56
A.2	Bodemkaarten 1964-2020	57
A.3	LiDAR opnamen 1997-2020	61
A.4	MKL-BKL trends raai 461-851	65
A.5	Volumes onder het volledige JarKus profiel voor verschillende periodes	68
A.6	Trends in volumeverandering per periode tussen suppleties	69

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Zeeuws-Vlaamse kust strekt zich uit over ongeveer 15 km van Breskens aan het begin van de Westerschelde tot aan het Zwin bij de grens met België (Figuur 1-1). Dit kustvak heeft als gevolg van menselijke ingrepen, in het bijzonder de kustversterkingen in het kader van het project Zwakke Schakels (2009-2016), grote morfologische veranderingen ondergaan.



Figuur 1-1. Overzichtsfiguur van de kust van Zeeuws-Vlaanderen op basis van de 2020-Vakklodingen, aangevuld met vergride JarKus data en de luchtfoto uit 2020 (PDOK). De JarKus raaien zijn ook weergegeven.

Een gedegen morfologische analyse van de kustzone van Zeeuws-Vlaanderen is nog niet uitgevoerd (Mastbergen & Quataert, 2020). Actuele kennis over het morfologische functioneren van de Zeeuws-Vlaamse kust is nodig voor beheer en onderhoud.

Dit geldt met name voor de kust bij Nieuwvliet-Groede. Hier blijkt dat met name de kust ter hoogte van JarKus raaien 768-791 moeilijk te onderhouden is. Dit is een locatie langs de kust waar het lastig is om de kustlijn, met de BKL als referentie, door middel van reguliere zandsuppleties binnen het meerjarige suppletieprogramma van Rijkswaterstaat te handhaven. Dit leidt tot een (zeer) hoge onderhoudsinspanning door middel van suppleties. Daarnaast is een landwaartse verlegging van de BKL – om zo meer aan te sluiten bij de morfodynamica in het gebied – lastig of niet mogelijk gezien de aanwezige functies langs de kust. Bijkomstig is dat duinerosie als gevolg van de februari 2022 stormen Corrie, Dudley, Eunice en Franklin hier heeft geleid tot het verdwijnen van een stuk fietspad. Dit fietspad was na de versterking te ver zeewaarts aangelegd, boven het versterkte duin.

1.2 Doelstelling en vraagstelling

De doelstelling van dit rapport is het beschrijven en duiden van de morfologische ontwikkeling van de Zeeuws-Vlaamse kust, i.h.b. de rol van menselijke ingrepen.

De volgende onderzoeksvragen zullen beantwoord worden:

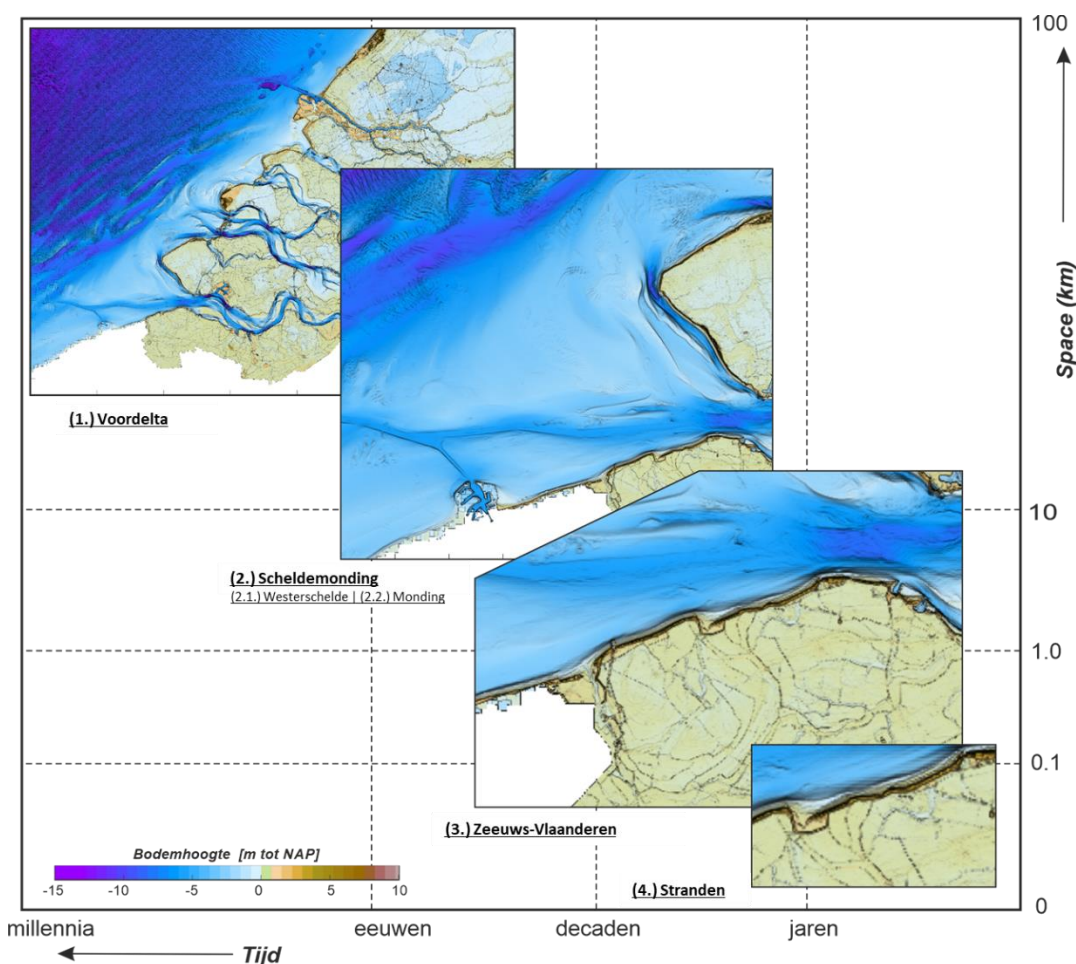
1. Welke ingrepen hebben aan de kust plaatsgevonden (i.h.b. de Zwakke Schakel versterkingen)?

2. Hoe hebben deze ingrepen de morfologische ontwikkeling beïnvloed?
3. Wat zijn de onderliggende processen (o.a. getij vs golven) en hoe beïnvloeden processen op de grote schaal (Scheldemonding) de processen op kleine schaal (strand Nieuwvliet-Groede) en vice versa?

Het onderzoek richt zich op de gehele Zeeuws-Vlaamse kust, met speciale aandacht voor de kust bij Nieuwvliet-Groede. Voor de kust bij Nieuwvliet-Groede loopt een studie naar een alternatieve oplossing dan reguliere zandsuppleties voor het efficiënter onderhouden van de kust (zie ook Elias & Quataert, in voorbereiding). In die studie ligt de focus op drie JarKus raaien (768, 778 en 791) rondom het Kruishoofd. Het voorliggend rapport levert belangrijke inzichten voor deze 'probleemlocatie'-studie. Naast de analyse van de morfologie op deze kleine schaal, worden ook de relevante morfologische ontwikkelingen op grotere schaal bestudeerd. Daarnaast worden de (veranderingen in) sedimentvolumes bij de raaien rondom het Kruishoofd gekwantificeerd.

1.3 Schaalcascade

Dit onderzoek wordt gestructureerd aan de hand van het schaalcascadeconcept (Figuur 1-2) waarbij het morfologisch systeem wordt opgedeeld in verschillende elementen c.q. aggregatieniveaus op basis van de (gekoppelde) tijd- en ruimteschalen (Cowell et al., 2003a,b).



Figuur 1-2. Schaalcascade die gebruikt is voor het structuren van de voorliggende studie naar de morfologische ontwikkeling van de Zeeuws-Vlaamse kust.

Analoog aan de schaalcascademodelen van het Amelanders Zeegat (Elias et al., 2019), Friesche Zeegat (Elias en Oost, 2021) en het Vlie (Elias, 2021), wordt het morfologische systeem opgedeeld in vier aggregatieniveaus:

1. De Voordelta. Dit grootste schaalniveau betreft de samenhang tussen de zeearmen Westerschelde, Oosterschelde, Grevelingen en Haringvliet die in belangrijke mate beïnvloed worden door de aanleg van de Deltawerken.
2. De Scheldemonding, bestaande de Westerschelde en de Zeeschelde en de monding.
 - a. De Westerschelde is en wordt grootschalig door de mens beïnvloed. Dit betreft met name de afsluiting van zeearmen en inpolderingen voor 1970 en de verdieping en het onderhoud van vaargeulen na 1970. Dit heeft ook gevolgen voor het mondingsgebied.
 - b. De monding bestaat uit de hoofdgeulen Wielingen langs de Zeeuws-Vlaamse kust en Oostgat-Sardijngeul langs de Walcherse kust, en de tussenliggende ondiepte Vlakte van de Raan. Het getij is de belangrijkste aandrijvende kracht. De mens baggert de geulen t.b.v. de scheepvaart.
3. Het kustvak Zeeuws-Vlaanderen. De mens probeert middels oeverwerken en later geulwandsuppleties de Wielingen geul op voldoende afstand van de kust te houden. Kustonderhoud bestaat uit palenrijen; sinds 1990 wordt de kustlijn structureel gehandhaafd middels zandsuppleties.
4. De kleinste schaal betreft individuele stranden, zoals bij Nieuwvliet-Groede. Golfgedreven processen spelen een belangrijke rol op deze schaal, alsook lokale menselijk ingrepen zoals (individuele) suppleties en strekdammen & palenrijen.

Er vinden tussen de verschillende schalen interacties plaats. De grotere schaal kan de kleinere beïnvloeden, maar omgekeerd kan ook. Een voorbeeld van de eerste interactie is het landwaartse oprukken van de Wielingen bij Nieuwesluis dat zorgt voor een terugschrijdende kustlijn. Omgekeerd zorgt de optelsom van individuele suppleties, die sinds de structurele kustlijnhandhaving in 1990 zijn uitgevoerd, er juist voor dat de Wielingen eigenlijk niet in landwaartse richting kan migreren.

1.4 Aanpak

Deze studie is gericht op schaalniveaus #3 en #4 (Figuur 1-2), namelijk de gehele Zeeuws-Vlaamse kust en het Kruishoofd bij Nieuwvliet-Bad, en de relevante interacties met de hogere niveaus.

Het vertrekpunt is de beheerbibliotheek uit 2020 dat een overzicht geeft van de kennis van het Zeeuw-Vlaamse kuststelsel, inclusief menselijk ingrepen. Dit overzicht is geactualiseerd. Vervolgens zijn verschillende soorten morfologische data geanalyseerd, zie Hoofdstuk 2 voor een beschrijving.

De (invloed van de) grotere schaalniveaus is in deze studie gebaseerd op eerder en lopend onderzoek. Voor schaalniveau #2 gaat het dan in het bijzonder om de studie Elias et al. (in voorbereiding) over de samenhang tussen de monding en de Westerschelde, en de studie van Beyaard (2022) dat een complete serie historische kaarten voor de periode 1800-1964 van zowel de monding als het westelijk deel van de Westerschelde omvat. Voor schaalniveau #3 zijn de relevante studies Van der Werf et al. (2020, 2021) over de Schelde-monding en de grootschalig morfologische elementen daarin.

De inzichten komen samen in een conceptuele beschrijving van de werking van de Zeeuws-Vlaamse kust; de drijvende morfodynamische processen, de schaalinteracties en het effect van menselijke ingrepen.

1.5 Opbouw van het rapport

In Hoofdstuk 2 worden de data en analysemethoden besproken. In Hoofdstuk 3 wordt de huidige morfologie van de Zeeuw-Vlaamse kust besproken, alsook de menselijk ingrepen, de Zwakke Schakel versterkingen in het bijzonder. Hoofdstuk 4 behandelt de grootschalige morfologische ontwikkelingen, waaronder de ontwikkeling van de Voordelta, de langetermijnontwikkeling van de Schelde-monding en de ontwikkeling van de Zeeuws-Vlaamse kust. In Hoofdstuk 5 staan de kleinschalige morfologische ontwikkelingen beschreven van de kust bij Nieuwvliet-Groede en worden de uitkomsten van de volumeberekeningen gepresenteerd. De verkregen inzichten worden gecombineerd in Hoofdstuk 6, waarin antwoord wordt gegeven op de onderzoeksvragen.

2 Data en analysemethoden

2.1 Beschikbare data

De basis voor de hier uitgevoerde analyses zijn historische kaarten, Vaklodingen, JarKus metingen en LiDAR metingen.

Beyaard (2022) omvat een complete serie historische kaarten van de monding en het westelijk deel van de Westerschelde voor de periode 1800-1964.

Naast historische kaarten is gebruik gemaakt van bodemdata die digitaal beschikbaar zijn bij Rijkswaterstaat. De eerste opname van de waterbodem, inclusief de droogvallende delen, in de Westerscheldemonding dateert uit 1964. Sinds 1970 wordt de bodemligging in de Westerscheldemonding elke één tot drie jaar ingemeten. Deze bodemhoogte wordt dan vervolgens geïnterpoleerd op een 20 m x 20 m rooster. Een morfodynamische analyse van historische Vaklodingen in de Westerscheldemonding is opgenomen in Elias & Van der Spek (2015) en in Elias et al. (2016). In die studies wordt ook de meeton nauwkeurigheid van de Vaklodingen data besproken.

De JarKus metingen bevatten hoogtedata langs kustprofielen voor de periode 1964-2022. Deze metingen geven informatie over o.a. de kusthelling, brekerbanken, kustnabije geulen, de Momentane KustLijn (MKL) positie, en het volume in de actieve kustzone. De profielmetingen worden jaarlijks opgenomen met een tussenafstand van 200-250 m en een lengte van 800-1200 m vanaf de RijksStrandPalen (RSP-lijn). De JarKus data wordt beheerd door Rijkswaterstaat. Naast de JarKus profielen is ook vergridde JarKus data gebruikt voor de periode 1990-2022. Hierbij zijn de profielmetingen bewerkt en naar een gebiedsdekkend rooster geïnterpoleerd met cellen van 20 m x 20 m. Hiervoor gebruikt Rijkswaterstaat de iteratieve lineaire interpolatiemethode DIGIPOL.

Als laatste zijn gebiedsdekkende LiDAR metingen (1997-2020) van het droogvallende strand (>NAP -1 m) en de eerste duinenrijen op een 5 m x 5 m rooster gebruikt om in detail de morfologische ontwikkeling van het strand en duin te visualiseren en analyseren.

2.2 Uitgevoerde analyses

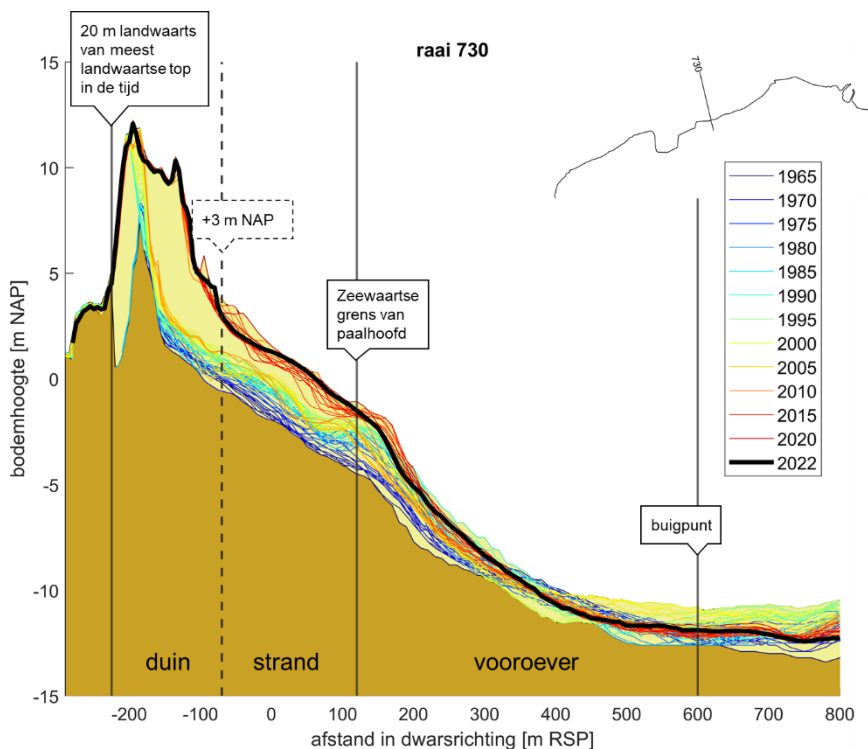
De serie historische kaarten is gebruikt om een beeld te krijgen van de grootschalige morfologische langetermijnontwikkelingen in de Westerschelde vanaf de 17^e eeuw. Vervolgens zijn de vaklodingen data gebruikt om de recente grootschalige morfologie en morfologische veranderingen (sedimentatie-erosie) in beeld te brengen.

De JarKus profielen zijn gebruikt om actieve sedimentvolumes (op tijdschaal van de beschikbare data) voor de kuststrook tussen Nieuwvliet-Bad en Groede te bepalen. Dit betreft het sediment dat over de beschouwde periode is veranderd en dus heeft deelgenomen aan de morfologische veranderingen. Het profiel is onderverdeeld in drie zones: duin, strand en (ondiepe) vooroever. De diepe vooroever maakt geen deel uit van de actieve zone. De positie van de landwaartse grens van het duin, de overgang van strand naar vooroever en de zeewaartse grens van de vooroever is per raai gelijk voor alle jaren (= alle profielen). De overgang van duin naar strand is bepaald op basis van een vaste diepteligging die varieert dus in de tijd (= per profiel). Een begrenzing op een vaste kustdwarse afstand is hier niet gewenst door de sterke zeewaartse uitbouw van het strand en duin door de Zwakke Schakel versterking.

Figuur 2-2 laat voor raai 730 zien waar de grenzen van de drie zones liggen. De landwaartse grens van het duin, tevens van de actieve zone, is per raai bepaald door voor elk jaar de meest landwaartse top van de eerste duinenrij te bepalen. De landwaartse grens is vervolgens per raai 20 m landwaarts van de meest landwaartse top van al deze landwaartse toppen gekozen. Er is voor 20 m gekozen, zodat ook landwaartse groei van het duin wordt meegenomen in de volumebepaling. De zeewaartse grens van het duin (en de landwaartse grens van het strand) is vastgelegd op +3 m NAP (duinvoet). De zeewaartse grens van het strand (en de landwaartse grens van de ondiepe vooroever) komt overeen met de zeewaartse grens van de paalhoofden. Figuur 2-1 laat de kustlangse lijn zien die de zeewaartse grens van de paalhoofden met elkaar verbindt. Deze lijn is getrokken op basis van de satellietfoto van 2020 en komt grofweg overeen met de -2 m NAP dieptecontour. De zeewaartse grens van de ondiepe vooroever is visueel afgeleid op basis van het buigpunt van de min of meer gelijkmatige diepe vooroever naar het steilere profiel. De volumes onder het profiel zijn vervolgens bepaald ten opzichte van het de minimale bodemhoogte in het kustdwarse profiel over de periode 1965-2022.



Figuur 2-1. Lijn die de zeewaartse grens van de paalhoofden verbindt. Deze lijn is tevens de gekozen zeewaartse grens van het strand voor de volumebepaling. De achtergrond is de PDOK Luchtfoto 2020 Ortho 25 cm RGB.



Figuur 2-2. Van links naar rechts is de locatie van de verticale lijnen per profiel als volgt bepaald: 20 m landwaarts van de meest landwaartse duintop in de tijd, op de kruising van het jaarlijks profiel met +3 m NAP, de zeewaartse grens van het (geïnterpoleerde) paalhoofd in 2020, het buigpunt in het profiel. De gestippelde lijnen geven aan dat de ligging van de grens per profiel (= per jaar) varieert. Het bruine vlak is het minimum profiel over de periode 1965-2022 en het gele vlak het maximum profiel.

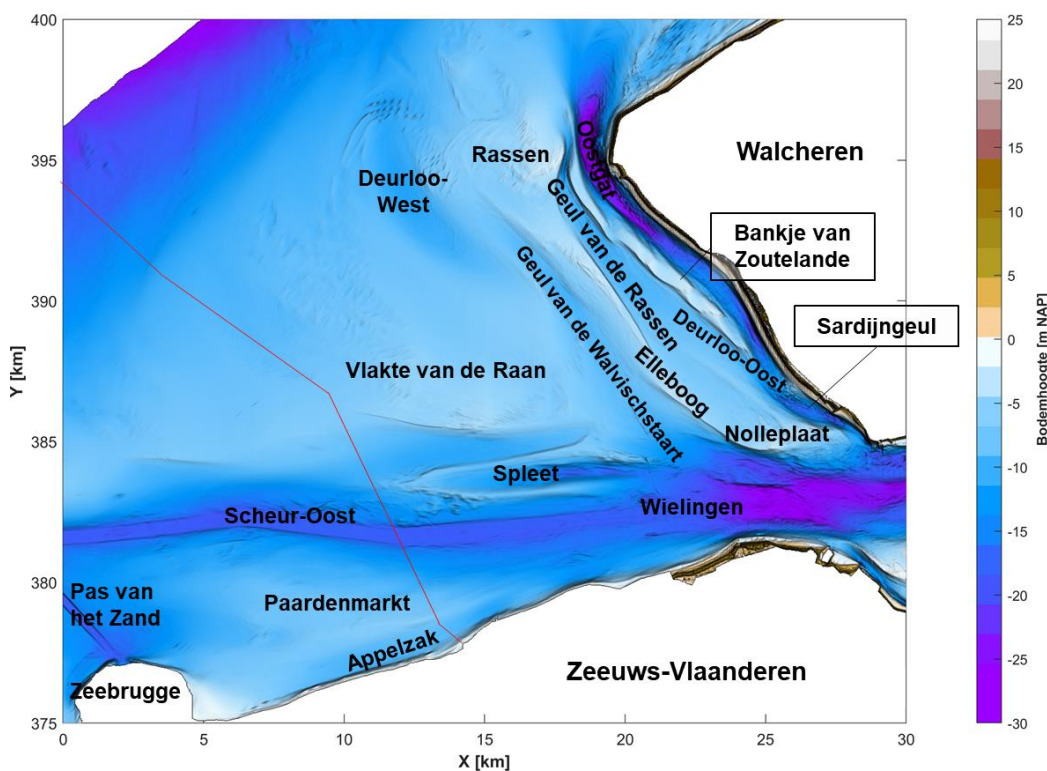
3 Overzicht van de kust van Zeeuws-Vlaanderen

3.1 Huidige morfologie

3.1.1 Schelde-monding

De monding van het Schelde-estuarium ligt ten westen van de lijn Vlissingen - Breskens (Figuur 3-1). Het bestaat uit twee grote geulen, het Oostgat c.q. de Sardijngeul (#1) langs de kust van Walcheren en de Wielingen (#2) langs de kust van (Zeeuws-)Vlaanderen. Hiertussen ligt de ondiepte Vlakte van de Raan (#3). De Wielingen gaat in de Westerschelde over in de Honte (#4). Ten zuiden hiervan loopt de vloedgeul Schaar van de Spijkerplaat (#5), en langs de kust bij Breskens het Vaarwater langs de Hoofdplaat (#6).

Walcheren vormt de noordoostelijke begrenzing. Het is niet eenduidig waar de zeewaartse en zuidelijke grens precies liggen. In zeewaartse richting loopt de monding over in de kust-parallelle Zeeuwse/Vlaamse banken. Ten zuiden van de Wielingen ligt de haven van Zeebrugge en de (Zeeuws-)Vlaamse kustzone.



Figuur 3-1. De bodemligging van de Schelde-monding op basis van Vaklodgingen data uit 2020 met hierop aangegeven de belangrijkste geulen en platen. De landsgrens is aangegeven met een rode lijn.

3.1.2 Zeeuws-Vlaamse kust

De Zeeuws-Vlaamse kust strekt zich uit over ongeveer 15 km van Breskens aan het begin van de Westerschelde tot aan het Zwin bij de grens met België (Figuur 3-2). De kust bestaat uit duinen en zeedijken, met een voorliggend strand. De gesloten kustlijn wordt onderbroken door de havens van Cadzand-Bad en Breskens, en daartussen, de waterinlaat naar het achterliggende natuurgebied Waterdunen bij Nieuwesluis. Bij Nieuwvliet-Bad bevindt zich een sprong in de kustlijn, ontstaan na een dijkdoorbraak in 1802.



Figuur 3-2. Overzicht van de Zeeuws-Vlaamse kust (PDOK luchtfoto 2020). De zwarte lijnen geven de steenzettingen (palenrijen, strekdammen en andere harde elementen) weer.

Op basis van morfologische kenmerken kan de Zeeuws-Vlaamse kust worden ingedeeld in vier deelgebieden (Figuur 3-2, zie ook Mastbergen & Quataert, 2020).

Deelgebied 1: Breskens – Nieuwesluis, JarKus raaien 11 – 441. Dit bestaat uit een stukje strand-duin ingeklemd tussen de Handelshaven en Veerhaven (raai 11 – 71), een relatief breed strand ten westen van de westelijke havendam (raai 146 – 290), en een uitstekend deel tot Nieuwesluis (raai 308 – 441) met een relatief smal strand waar strandhoofden, oeverwerken en suppleties de getijgeul Wielingen op afstand houden. De verdedigde spuisluis en getijdenduiker richting het natuurgebied Waterdunen vormen de grens met het tweede deelgebied.

Deelgebied 2: Nieuwesluis – Kruishoofd (raaien 461 – 802). De kust is concaaf (hol) tussen de harde “ophangpunten” Nieuwesluis en Kruishoofd.

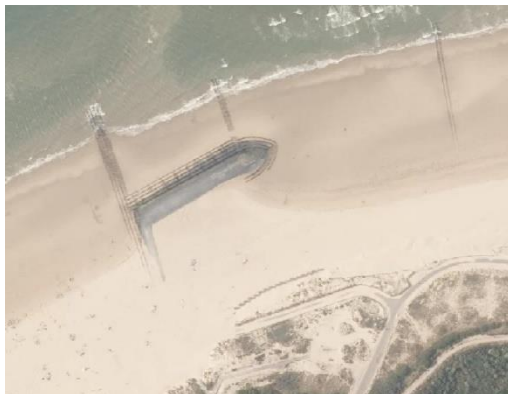
Deelgebied 3: Zwarte Polder (raaien 822 – 1032). Dit gebied is gevormd door een dijkdoorbraak in 1802 waarbij de Zwarte Polder overstroomde. Het westelijk gedeelte is in 1829 opnieuw bedijkt, de zogeheten *Herdijkte Zwarte Polder* (raai 985 – 1032). De overgang met de *Verdrongen Zwarte Polder* (raai 877 – 979), een sluftergebied, is abrupt middels een sprong in de kustlijn.

Deelgebied 4: Zwarte Polder – Cadzand-Bad (raaien 1046 – 1487). Dit gebied bestaat uit een deel ten oosten van de jachthaven (aangelegd in 2016, voorheen een afwateringskanaal) van Cadzand-Bad (raai 1046 – 1335). Het gebied ten westen hiervan (raai 1363 – 1487) gaat over in het Zwin dat het strand van Cadzand-Bad (Nederland) van Knokke (België) scheidt. Het Zwin staat in open verbinding met de zee en kan volledig overstroomd tijdens springtij of gedurende een storm.

3.2 Overzicht van suppleties en overige ingrepen

De Zeeuws-Vlaamse kust is mede gevormd door menselijk ingrijpen. In Mastbergen & Quataert (2020) wordt hiervan een uitgebreid overzicht gegeven. In deze paragraaf wordt dit overzicht samengevat en geactualiseerd. Hierbij staan we expliciet stil bij de uitgevoerde zandsuppleties en Zwakke Schakel versterkingen.

De menselijke ingrepen betreffen onder andere inpolderingen vanaf de 11^e eeuw. Ook zijn er zeedijken aangelegd en strekdammen ten behoeve van de havens van Breskens en het afwateringskanaal (later de jachthaven) bij Cadzand-Bad.



Figuur 3-3. Luchtfoto van het Kruishoofd (PDOK, 2020).

Bij JarKus raai 802 bevindt zich het cultuur historisch monument Het Kruishoofd, ook wel Westnol genoemd (Provincie Zeeland, 2020). Er wordt aangenomen dat dit een restant van een voormalige 17^e-eeuwse zeedijk van de Adornispolder is vanwege de T-vorm, de hoogte (+3.25 m NAP) en de breedte (ca. 30 m op 0 m NAP). De Adornispolder werd in 1536 bedijkt, maar ging daarna weer verloren. In 1615 werd twee-derde van de polder herdijkt. Aan het begin van de 19^e eeuw werden verdedigingswerken op dit dijkrestant geplaatst en rond 1800 werden aan de zeezijde twee palenrijen geplaatst.

In de tweede helft van de 19^e eeuw zijn langs de gehele kust strandhoofden (palenrijen) gebouwd om de kusterosie te remmen (Verhagen en Van Rossum, 1990). Oeverwerken (zinkstukken en bestortingen) zijn aangelegd om de steile onderwateroever te verdedigen tegen de sterke stroom van de Wielingen bij Nieuwesluis en het gebied direct ten oosten hiervan. In de periode 2016-2019 is het Zwin intergetijdengebied met 120 ha uitgebreid, grotendeels op Belgische grondgebied, mede ter verhoging van het getijdeprisma ter bevordering van het open blijven van de toegangsecul.

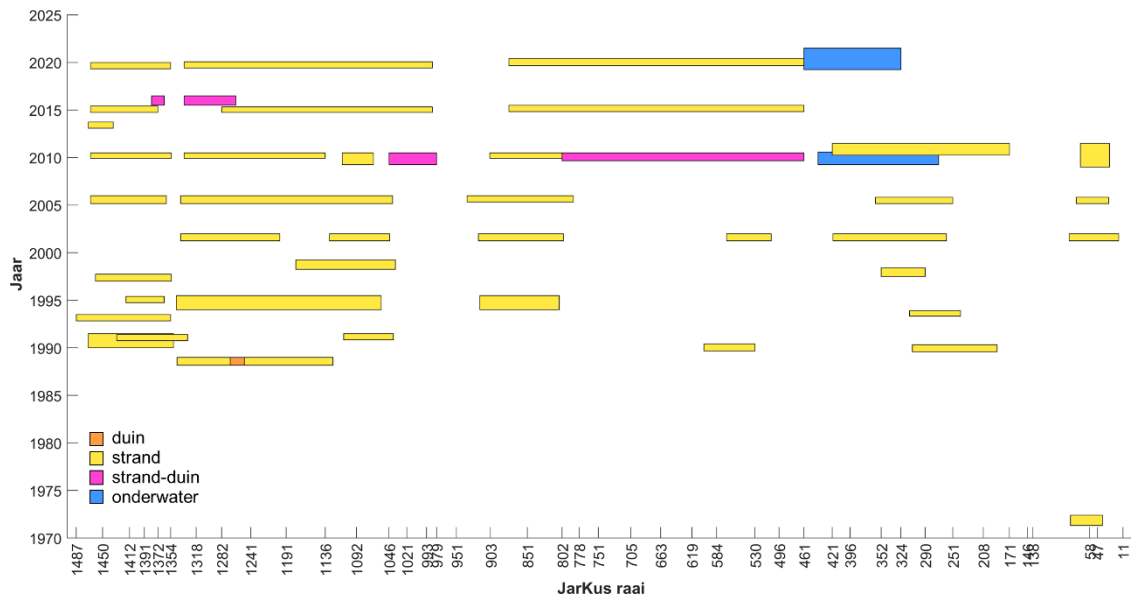
3.2.1 Suppleties

Sinds 1990 wordt de Nederlandse kust dynamisch onderhouden middels zandsuppleties, waarbij de kustlijn met de Basiskustlijn (BKL) als referentie wordt gehandhaafd. Na de vaststelling van de BKL in 1990 is deze op een aantal raaien langs de Zeeuws-Vlaamse kust herzien in 2001, 2012 en 2017, mede gekoppeld aan de Zwakke Schakel versterkingen (zie Mastbergen & Quataert, 2020).

Tabel 3.1 geeft een overzicht van de uitgevoerde suppleties langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. In Figuur 3-4 zijn de suppleties in de tijd uitgezet tegen de locatie langs de kust. Het merendeel van de suppleties voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen zijn strandsuppleties geweest. Lokaal zijn er verschillen in het suppletietype: Zo zijn er bij Nieuwesluis (raai 271-441) geulwandsuppleties uitgevoerd vanwege de nabijheid van de Wielingen. Het gemiddelde volume van strandsuppleties is 275.000 m³. In dit gemiddelde volume zit het volume van strand-duinsuppleties niet meegenomen. Wordt dit volume wel meegenomen, dan wordt het gemiddelde 343.000 m³. Deze toename komt met name door twee grote strand-duin suppleties die in 2009 zijn uitgevoerd, waaronder de Zwakke Schakel versterking bij Nieuwvliet-Groede. De duinversterkingen en -suppleties hebben een gemiddeld volume van 397.000 m³. De onderwatersuppleties hebben een gemiddeld volume van 905.000 m³. De geulwandsuppletie van 2009 bij Nieuwesluis levert een grote bijdrage aan dit gemiddelde.

Tabel 3.1. Overzicht van de uitgevoerde zandsuppleties langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen tot juli 2022. De suppleties ten behoeve van de Zwakke Schakel versterkingen zijn geel gemarkeerd.

Locatie	Startdatum	Einddatum	Begin raai	Eind raai	Lengte [m]	Type	Volume [10 ³ m ³]
Breskens	26054	26238	40	85	450	strandsuppletie	206
Cadzand	mrt-88	jun-88	1125	1345	2200	strandsuppletie	936
Cadzand (depot)	mrt-88	jun-88	1250	1270	200	duinverzwaring	93
Breskens	aug-89	okt-89	188.5	308	1195	duinverzwaring	1,171
Breskens	aug-89	okt-89	188.5	308	1195	strandsuppletie	227
Groede	sep-89	nov-89	530	602	720	vooroeversuppletie	437
Groede	sep-89	nov-89	530	602	720	strandsuppletie	437
Kievitte-west	jan-90	dec-90	1350	1470	1200	strandsuppletie	388
Cadzand-west	okt-90	nov-90	1330	1430	1000	vooroeversuppletie	119
Cadzand-west	okt-90	nov-90	1330	1430	1000	duinverzwaring	55
Cadzand-west	okt-90	nov-90	1330	1430	1000	strandsuppletie	200
Tienhonderdpolder	nov-90	dec-90	1040	1110	700	vooroeversuppletie	200
Tienhonderdpolder	nov-90	dec-90	1040	1110	700	duinverzwaring	270
Tienhonderdpolder	nov-90	dec-90	1040	1110	700	strandsuppletie	168
Zwin-noord	nov-92	dec-92	1354	1487	1330	strandsuppletie	67
Breskens-Schooneveld	mei-93	mei-93	240	312	720	strandsuppletie	90
Adomispolder	jan-94	dec-94	806	918	1120	strandsuppletie	348
Cadzand	jan-94	dec-94	1057	1346	2890	strandsuppletie	560
Zwin-noord	okt-94	nov-94	1363	1417	540	strandsuppletie	91
Kievitte-West	jan-97	mrt-97	1353	1460	1070	strandsuppletie	95
Breskens-Schooneveld	jul-97	nov-97	290	352	620	strandsuppletie	185
Tienhonderdpolder	apr-98	sep-98	1037	1177.5	1405	strandsuppletie	314
Adomispolder	apr-01	jun-01	800	920	1200	strandsuppletie	132
Breskens	apr-01	jun-01	17	87	700	strandsuppletie	197
Breskens Schooneveld	apr-01	jun-01	260	420	1600	strandsuppletie	168
Cadzand	apr-01	jun-01	1200	1340	1400	strandsuppletie	258
Groede	apr-01	jun-01	507	570	630	strandsuppletie	52
Tienhonderdpolder	apr-01	jun-01	1045	1130	850	strandsuppletie	123
Breskens	mrt-05	apr-05	31	77	460	strandsuppletie	124
Kievitte oost	mrt-05	jun-05	1041	1340	2990	strandsuppletie	305
Kievitte west	mrt-05	jun-05	1360	1467	1070	strandsuppletie	106
Schooneveld	mrt-05	apr-05	251	360	1090	strandsuppletie	142
Adomispolder	mei-05	jun-05	786	936	1500	strandsuppletie	252
Kom Breskens	jan-09	dec-10	30	71	410	strandsuppletie	127
Herdijkte Zwarte Polder	apr-09	dec-09	979	1046	670	strand-duinsuppletie	1,515
Nieuwesluis	apr-09	jan-10	271	441	1700	geulwandsuppletie	2,670
Tienhonderdpolder	apr-09	dec-09	1068	1112	440	strandsuppletie	191
Nieuwliet-Groede	sep-09	dec-09	461	802	3410	strand-duinsuppletie	ca. 2,209-2,229
Nieuwliet-Groede	sep-09	dec-09	730	802	720	strandsuppletie	ca 220-240
Adomispolder	dec-09	dec-09	802	904	1020	strandsuppletie	230
Cadzand (Kievitte Oost)	dec-09	dec-09	1136	1335	1990	strandsuppletie	527
Cadzand (Kievitte West)	dec-09	dec-09	1353	1467	1140	strandsuppletie	240
Schoneveld	apr-10	dec-10	171	421	2500	strandsuppletie	430
Cadzand	feb-13	mrt-13	1435	1470	350	strandsuppletie	12
Cadzand (Kievitte West)	okt-14	nov-14	1372	1467	950	strandsuppletie	180
Herdijkte Zwarte Polder-Cadzand Bad	okt-14	okt-14	985	1282	2970	strandsuppletie	600
Nieuwliet-Groede	nov-14	dec-14	461	877	4160	strandsuppletie	650
Cadzand-Bad oost	jul-15	dec-15	1262	1335	730	strand-duinsuppletie	55
Cadzand-Bad west	jul-15	dec-15	1363	1381	180	strand-duinsuppletie	14
Cadzand (Kievitte West)	mei-19	jun-19	1354	1467	1130	strandsuppletie	150
Herdijkte Zwarte Polder-Cadzand Bad	jun-19	jul-19	985	1335	3500	strandsuppletie	600
Nieuwliet-Groede	sep-19	nov-19	461	877	4160	strandsuppletie	600
Nieuwesluis	apr-19	dec-20	324	461	1370	geulwandsuppletie	1,100

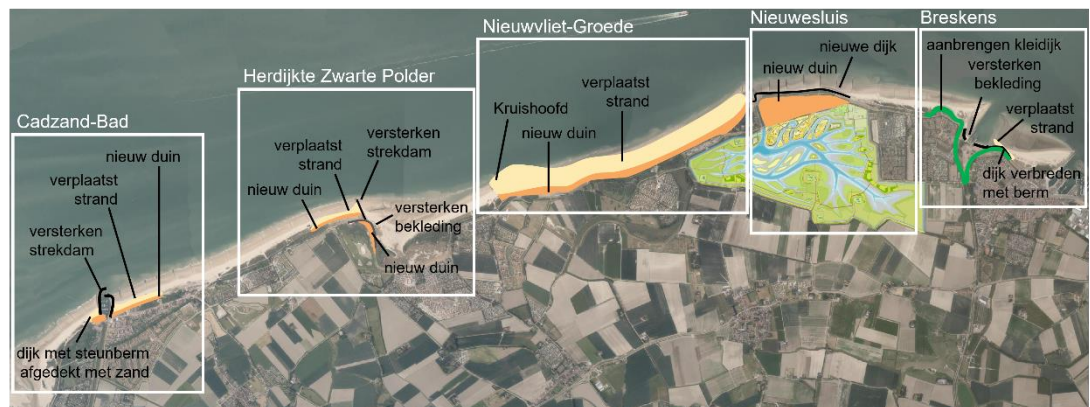


Figuur 3-4. Overzicht van de uitgevoerde suppleties langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. De blokken zijn van de start van de suppletie tot ca. een half jaar (voor visualisatie) na de afronding van de suppletie geplot en de kleur van elk blok weergeeft het type (duin, strand, strand-duin of onderwater) suppletie. Zie Tabel 3.1 voor gesuppleerde volumes.

3.2.2 Zwakke Schakel versterkingen

Deze paragraaf is grotendeels gebaseerd op Sectie 5.1.3 uit Mastbergen & Quataert (2020).

Uit de toetsing in 2005 bleek dat tien delen van de Nederlandse kust niet in staat waren een superstorm te weerstaan en dus versterkt moesten worden, de zogenoemde Zwakke Schakels. De Zeeuws-Vlaamse kust was hier één van. De Zwakke Schakel versterkingen langs de Zeeuws-Vlaamse kust betrof vijf deelgebieden (Figuur 3-5). Appendix A1 bevat satellietweergaven van de versterkingen.



Figuur 3-5. De vijf Zwakke Schakel deelgebieden langs de Zeeuws-Vlaamse kust. (gebaseerd op Waterschap Zeeuws-Vlaanderen, n.d.).

De kustversterking rondom Breskens (2011-2012). Hierbij is bij het Badstrand (raaien 11 – 71) 400 m aan dijk versterkt en verhoogd, en afgedekt met zand. De zeedijk op het Veerplein is verhoogd en zeewaarts verbreed. De zeedijk bij het Strandpark Scheldeveste is versterkt en verhoogd (raaien 146 – 208); zeewaarts versterken was een te moeilijk en dure optie vanwege de geul (verbinding Wielingen en Vaarwater langs de Hoofdplaat) die dicht bij de kust ligt.

De kustversterking rondom Nieuwesluis (2013-2016), raaien 271 – 530. Er is hier gekozen voor landwaartse versterking, omdat de diepe Wielingen geul dicht bij de kust ligt. Er is tegen de bestaande dijk een nieuwe duin van 300 m aangelegd met c.a. 1,5 miljoen m³ grond en 0,4 miljoen m³ Noordzeezand. Dit wordt een klimaatduin genoemd, omdat het dermate groot en sterk is dat het bescherming moet bieden voor 200 jaar. De grond is afkomstig van het door de Provincie Zeeland aangelegde natuur- en recreatiegebied Waterdunen waar, via een getijdenduiker, zeewater sinds 2019 gecontroleerd kan in- en uitstromen. Hiervoor is de lokale configuratie van strandhoofden aangepast.

De kustversterking tussen Groede en Nieuwvliet-Bad (2009-2010), raaien 558 – 802. Hier is over een lengte van ongeveer 3 km een nieuwe duin aangelegd tegen de bestaande dijk en is het strand verbreed, waardoor de kustlijn ongeveer 50 m richting zee is opgeschoven. Er was 2,9 miljoen m³ zand beschikbaar en als onderdeel van dit deelproject is een deel van dit zand ingezet voor een innovatief project genaamd 'Erosieberm Kruishoofd' (Lenselink, 2012). De aanname was dat het zand in de erosieberm zich over het traject Nieuwvliet-Groede zou herverdelen om zo deze kustlijn van het benodigde zand te voorzien. Er mocht maximaal 15% van het zand gebruikt worden voor deze erosieberm en het zand mocht niet afkomstig zijn uit het deel dat voor de veiligheid gebruikt moest worden. Dit resulteerde in ca. 180.000 m³ zand dat beschikbaar is gesteld voor de aanleg van de erosieberm. Deze innovatieve erosieberm bood de mogelijkheid tot onderzoek naar de morfologische ontwikkeling en de invloed op de directe omgeving. Daarnaast zou deze maatregel meerwaarde moeten bieden doordat het plaats zou bieden voor bijzondere flora en fauna en het zou publiciteit en toeristen moeten aantrekken. Hierbij werd er van uitgegaan dat de erosieberm een levensduur zou hebben van 4 tot 5 jaar en dat de hoogte van de erosieberm dusdanig was zodat deze vanaf het Kruishoofd betreden kon worden.

De kustversterking bij de Herdijkte Zwarte Polder (2010-2011), raaien 979 – 1032. De kust is verbreed en er is een nieuw duin aangelegd. Hiervoor was zo'n 700.000 m³ zand nodig, waarvan ongeveer 10% uit de geul in de oostelijk gelegen Verdronken Zwarte Polder is gehaald (Folder Herdijkte Zwarte Polder). Ter hoogte van de sprong in de kust is een nieuwe strekdam van bijna driehonderd meter lang aangelegd (raaien 979/985). Deze strekdam moet voorkomen dat het nieuw aangebrachte zand te snel wegstroomt en in de Verdronken Zwarte Polder verdwijnt. Tussen de Verdronken en de Herdijkte Zwarte Polder is de dijk versterkt en overslagbestendig gemaakt.

De kustversterking bij Cadzand-Bad (2013-2016), raaien 1300-1381. De kust is versterkt door aan beide kanten van het gemaal zand aan te brengen voor de bestaande dijk, zodat een nieuw duin (van ca. +10 tot +11 m NAP) is ontstaan. Het deel van het strand dat het nieuwe duin in beslag neemt, is gecompenseerd door extra zand op het strand te spuiten, waardoor het uiteindelijke strandoppervlak gelijk is gebleven. Hierdoor is het strand aan de oostzijde 60 m verbreed en aan de westzijde 25 m (Toelichting bestemmingsplan Kustversterking en jachthaven Cadzand-Bad). De strekdammen aan weerszijden van het uitwateringsgemaal zijn langer, hoger en breder gemaakt, en de westelijk is verplaatst zodat een jachthaven kon worden aangelegd.

4 Grootschalige morfologische ontwikkeling

4.1 Voordelta

De Voordelta is de relatief ondiepe kuststrook van Hoek van Holland in het noorden tot de haven van Zeebrugge in het zuiden. Het wordt gevormd door de in elkaar overlopende buitendelta's van de (voormalige) estuaria Brielse Maas, Haringvliet, Grevelingen, Oosterschelde en Westerschelde.

De historische ontwikkeling van de Voordelta staat beschreven in Elias et al. (2016). Een belangrijke ontwikkeling is het geleidelijk sedimenteren en afdammen van zijtakken die de verschillende estuaria verbonden. Tegen het einde van de 19^e eeuw is de verbinding Sloe-Kreekhaven geblokkeerd. Sindsdien zijn de Ooster- en Westerschelde volledig gescheiden zeearmen.

De interactie tussen de buitendelta's van de Ooster- en Westerschelde lijkt beperkt te zijn. Het (gedeeltelijk) afdammen van deze zeearmen, met uitzondering van de Westerschelde, in het kader van de Deltawerken (1950-1986) heeft geleid tot grootschalige morfologische veranderingen die tot op vandaag nog gaande zijn. Daarentegen is het grootschalige patroon van geulen en platen in de Westerschelde niet wezenlijk veranderd gedurende deze periode.

Elias et al. (2016) schatten dat er in de periode 1965-2010 netto 0,8 miljoen m³/jaar sediment van de buitendelta van de Westerschelde naar die van de Oosterschelde stroomde. Voor de meer recente jaren is het juist de buitendelta van de Oosterschelde die sediment levert aan de Westerschelde. Deze getallen zijn van dezelfde grootte als de volumeveranderingen in de mondingsgebieden, en erg onzeker door onzekerheden in de bodemdata en aannames over sedimentuitwisseling over de randen van de controlegebieden, zoals b.v. de uitwisseling met België.

4.2 Schelde-monding

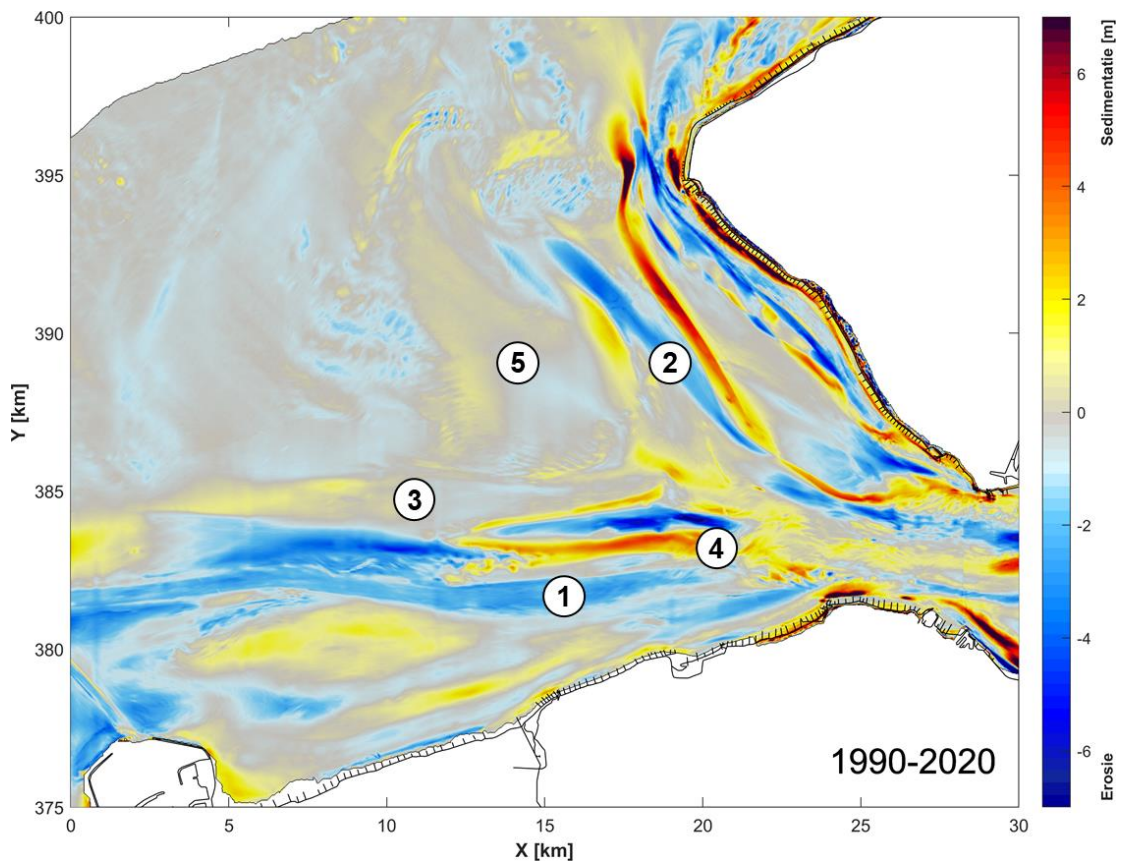
4.2.1 Morfologische ontwikkeling

De morfologische ontwikkeling van de Schelde-monding staat uitgebreid beschreven in Elias et al (2016) , Van der Werf et al. (2020, 2021) en Beyaard (2022). Appendix A.2 bevat alle bodemkaarten van de periode 1964-2020.

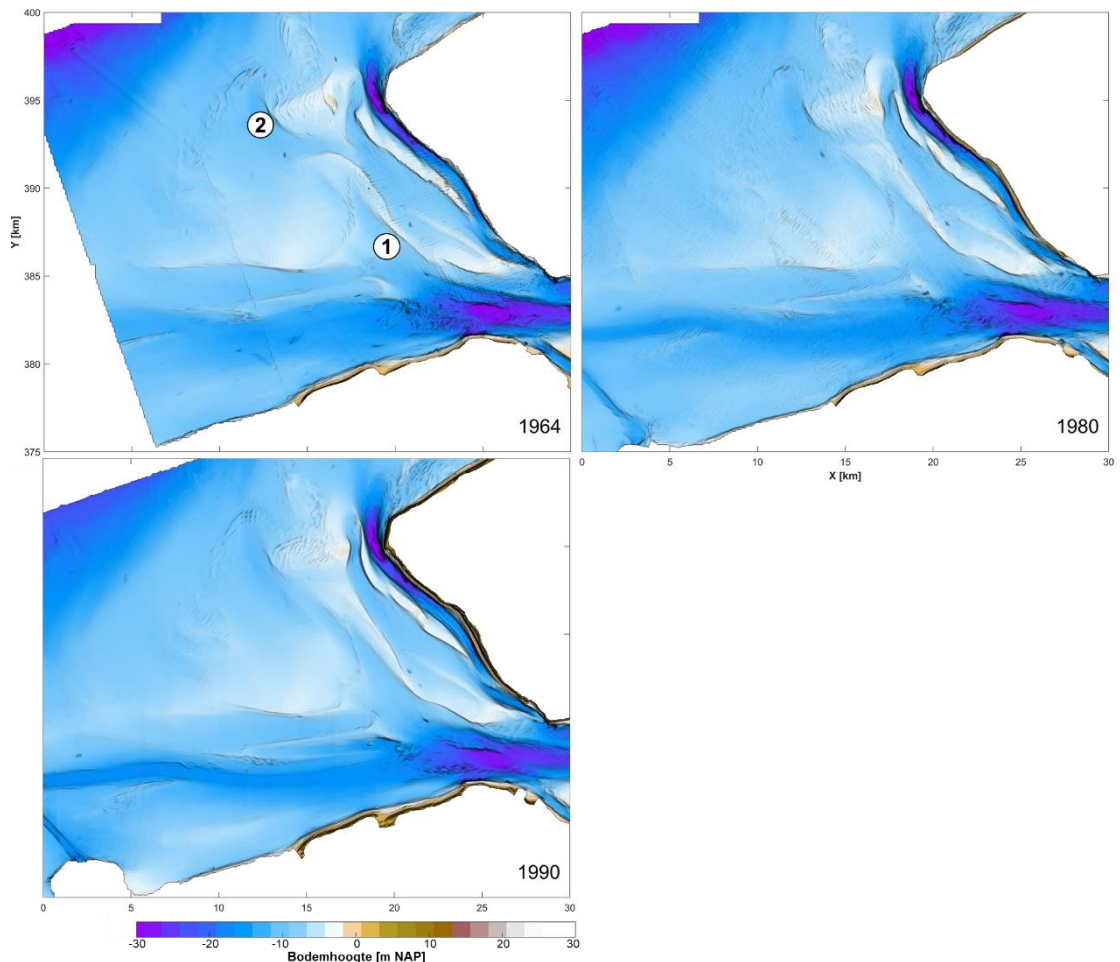
De belangrijkste ontwikkelingen zijn:

- De verandering van een drie-geulen systeem naar een twee-geulen systeem. Halverwege de 19^e eeuw waren Wielingen, Deurloo en Oostgat de belangrijkste geulen. Deurloo is geleidelijk kleiner geworden en is door het platencomplex Elleboog in tweeën gesplitst. Tegelijkertijd zijn de Wielingen en Oostgat in grootte toegenomen, zodat deze nu de dominante hoofdgeulen vormen.
- De Appenzak is oorspronkelijk een vloedgeul langs de Vlaamse kust. In de 19^e eeuw breidt deze zich uit noordoostelijke richting, bijna tot Nieuwvliet-Bad. Hierna ontwikkelt de Appenzak zich tot een bredere, ondiepere ebgeul. Dit is waarschijnlijk gerelateerd aan de toegenomen dominantie van de noordelijk gelegen Wielingen en het verdwijnen van de tussenliggende, langgerekte zandbank. Ook de aanleg (1907) en uitbreiding (1975-1985) van de haven Zeebrugge dragen eraan bij dat de Appenzak verandert van vloed- naar ebgeul.

- Sinds de jaren '60 (waarbij in de periode 1970-1973 een grote verdieping plaatsvond) wordt de verruiming van de Wielingen versterkt door verdiepingen en onderhoudsbaggerwerkzaamheden. (#1 in Figuur 4-1)
- Vanuit de Wielingen ontstaat rond 1900 een geul door de bank Walvischstaart naar het noorden: de Geul van de Walvischstaart. Deze neemt in diepte en omvang toe en maakt rond 1990 contact met Deurloo(-West) (Figuur 4-2). De sedimentatie-erosie kaart (Figuur 4-1) laat vervolgens een duidelijke verdieping van de Geul van de Walvischstaart zien in de periode 1990-2020. (#2 in Figuur 4-1)
- In samenhang hiermee ontstaat de "restgeul" die nu Spleet genoemd wordt; een restant van een centraal gelegen ebgeul waar aan weerszijden drempelgebieden zijn ontwikkeld.
- Terwijl de bodemligging van de Spleet sinds 1964 (eerste Vaklodings-data) erg stabiel is (#3 in Figuur 4-1), ontstaan er in deze periode een ebschaar tussen Spleet en Wielingen en "ruggen" die de drie geulen van elkaar scheiden. (#4 in Figuur 4-1)
- In vergelijking met de omliggende geul-plaat-complexen is de bodemligging van de Vlakte van de Raan vrij stabiel. (#5 in Figuur 4-1)



Figuur 4-1. Sedimentatie en erosie patronen in de periode 1990-2020 op basis van Vaklodingen.

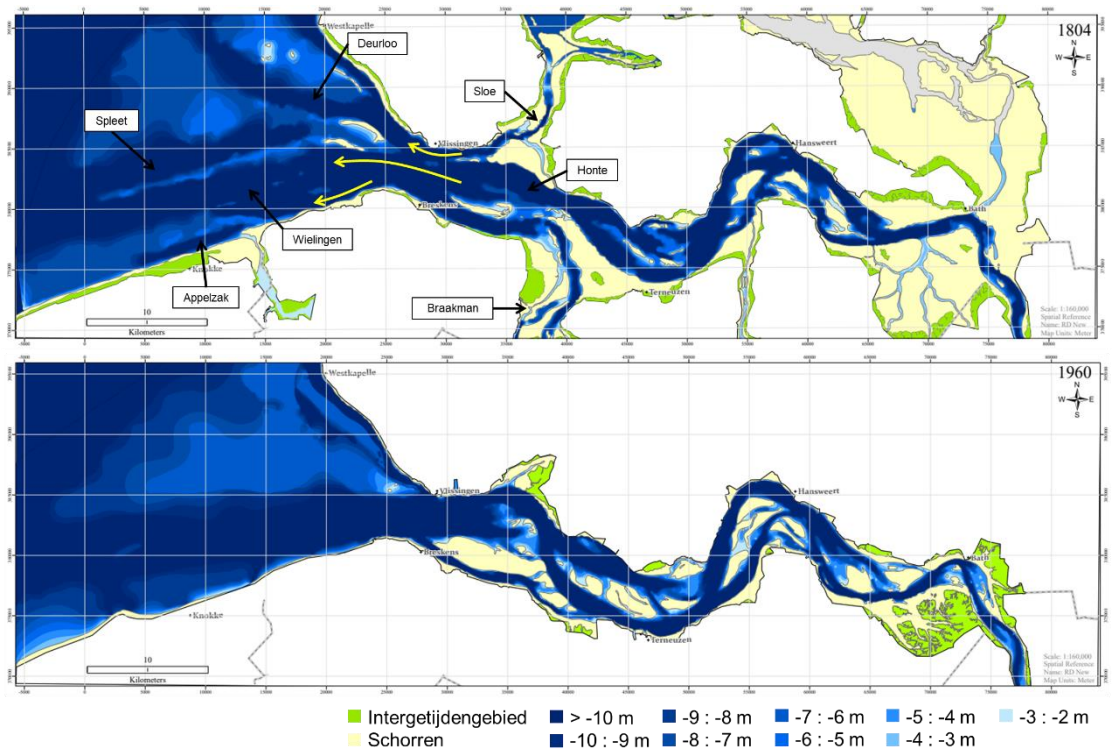


Figuur 4-2. Vaklodingen 1964, 1980 en 1990. De Geul van de Walvischstaart (1) maakt rond 1990 verbinding met de Deurloo-West (2).

4.2.2 Samenhang monding en Westerschelde

De belangrijkste langetermijntoename in de Westerschelde vanaf de 17^e eeuw is de verlanding van zijtakken als Sloe en Braakman, als gevolg van natuurlijke processen en versterkt door menselijke ingrepen. Het effect hiervan op de waterbeweging en morfodynamiek van het estuarium en de monding is eerder onderzocht (zie Van der Spek, 1997; Brand et al., 2016; Nnafie et al., 2018, 2019; Beyaard, 2022).

Een van de gevolgen lijkt de noordelijke uitbocht van de Honte tussen 1804 en 1960 waardoor de ebstroming meer zuidelijk gericht is geworden (Figuur 4-3). Dit lijkt de oorzaak te zijn van het ontstaan en ontwikkelen van de centrale ebgeul in het oostelijk deel van de monding die de heroriëntatie van geulen en banken in gang zet. Doordat het belang van deze centrale ebgeul (nu: Wielingen) toeneemt, worden de zeewaartse gelegen banken en ondieptes opgeruimd. Doordat vervolgens de drempel tussen Scheur en Wielingen wordt weggebaggerd ergens tussen 1960-1970, ontstaat één brede vaargeul naar de Westerschelde. Tegelijkertijd krijgt de Wielingen een meer west-oost-oriëntatie waardoor deze dichter langs Zeeuws-Vlaamse kust loopt.



Figuur 4-3. Morfologie van de Westerschelde en zijn mondingsgebied in 1804 en 1960. (Bron: Beyaard, 2022).

De morfologische ontwikkeling van de Westerschelde wordt sinds ~1970 in belangrijke mate gestuurd door de vaargeulverruiming (1975, 1995, 2010), vaargeulonderhoud (7-10 miljoen m³/jaar) en zandwinning (~2 miljoen m³/jaar; gestopt in 2014). De belangrijkste gevolgen zijn een verdieping van de hoofdgeulen en een toename van de getij-indringing en de getijslag. Deze treden vooral op in het oostelijk deel van de Westerschelde, en in de Beneden-Zeeschelde op meer dan 50 km van het mondingsgebied.

Een manifestatie van de interactie tussen de monding en de Westerschelde is de netto uitwisseling van sediment. Deze is lastig direct te meten, en wordt daarom geschat op basis van sedimentbalansen gebaseerd op gemeten bodemveranderingen en numerieke modelberekeningen. Beide zijn erg onzeker. Schatting lopen uiteen van een sediment (**zand + slib**) import van 1 – 3 miljoen m³/jaar voor de periode 1955-2020 (Elias et al.; in voorbereiding) tot een **zand**export over de lijn Vlissingen-Breskens van 0 – 1 miljoen m³/jaar over de periode 2020-2100 afhankelijk van zeespiegelstijging, baggeren/storten en kustsuppleties in het mondingsgebied (berekend met een Delft3D model; Dujardin et al., in voorbereiding).

4.2.3 Samenhang met Vlaamse kust

De recente morfologische ontwikkeling van de naburige Vlaamse kust is sterk beïnvloed door de zeewaartse uitbreiding van de haven van Zeebrugge, die is afgerond in 1985. Dit heeft vooral geleid tot de uitschuring direct ten noorden van de havendammen en sedimentatie in de “oksels” van de haven, en mogelijk sedimentatie van de Paardenmarkt – tevens een stortplaats van baggerspecie uit de haven van Zeebrugge en omgeving – versterkt. Deze en andere belangrijke stortplaatsen (S1 en S2) lijken te ver weg te liggen om een grote invloed uit te oefenen op de Zeeuws-Vlaamse kust.

De getijgeul Appelzak is klein en ondiep (8-10 m) in vergelijking met de Wielingen. De Appelzak migreert langzaam in landwaartse richting (~2 m/jaar in de periode 1985-2000) en zorgt mede hierdoor voor de erosie van de stranden van Knokke-Heist (De Maerschalcck et al., 2017). De landwaartse geulwand is met 1:25 relatief steil, waardoor het landwaartse zandtransport onder rustige condities beperkt is. Tijdens stormen wordt het zand van het strand zeewaarts getransporteerd, waarna het kustlangs door de getijstrooming kan worden meegenomen. (Trouw et al., 2015). De kust wordt hier middels strandhoofden en suppleties, voornamelijk op het strand, op haar plek gehouden.

Trouw et al. (2015) hebben een sedimentbalans gemaakt op basis van bodempeilingen tot 1500 m uit de kust (Tabel 4.1). Dit correspondeert met de actieve zone tot een waterdiepte van c.a. 10 m, en bevat de Appelzak. De waarden zijn gecorrigeerd voor suppleties (en sedimentonttrekkingen).

Tabel 4.1 Lineaire sedimentatie (+) en erosie (-) trends in [$\times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$] voor verschillende kustvakken ten oosten van de haven van Zeebrugge (Trouw et al., 2015). Hierbij is gecorrigeerde van suppleties en sedimentonttrekkingen.

Periode	Heist – Albertstrand [0-3,9 km]	Zoute – Lekkerbek [3,9 – 8,4 km]	Zwin [8,4 – 10 km]	Totaal
1986-1997	+200	-250	-30	-80
1997-2010	+195	-60	+40	+175

Het gebied direct ten oosten van de oostelijke strekdam van Zeebrugge sedimenteert structureel met ongeveer $200 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$. Dit sediment is waarschijnlijk grotendeels afkomstig van de uitschuring ten noorden van de haven van Zeebrugge. Het kustvak Zoute – Lekkerbek, bij Knokke, erodeert waarbij de erosie een stuk kleiner is in de tweede analyseperiode. Dit is mogelijk gerelateerd aan een stabilisatie van de ontwikkeling van de Appelzak-geul en toevoert van (fijn) sediment vanaf de Paardenmarkt. Het Vlaamse kustvak direct ten westen van het Zwin erodeert en sedimenteert afwisselend, mogelijk onder invloed van zeewaartse sedimentaanvoer en de uitwisseling met het Zwin zelf. Trouw et al. (2015) schatten dat er jaarlijks $0 - 50 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ sediment het Zwin instroomt. Deze analyse maakt duidelijk dat er een significante sedimentuitwisseling over de randen van de kustvakken nodig is om de sedimentbalans sluitend te krijgen, met name voor de periode 1997-2010.

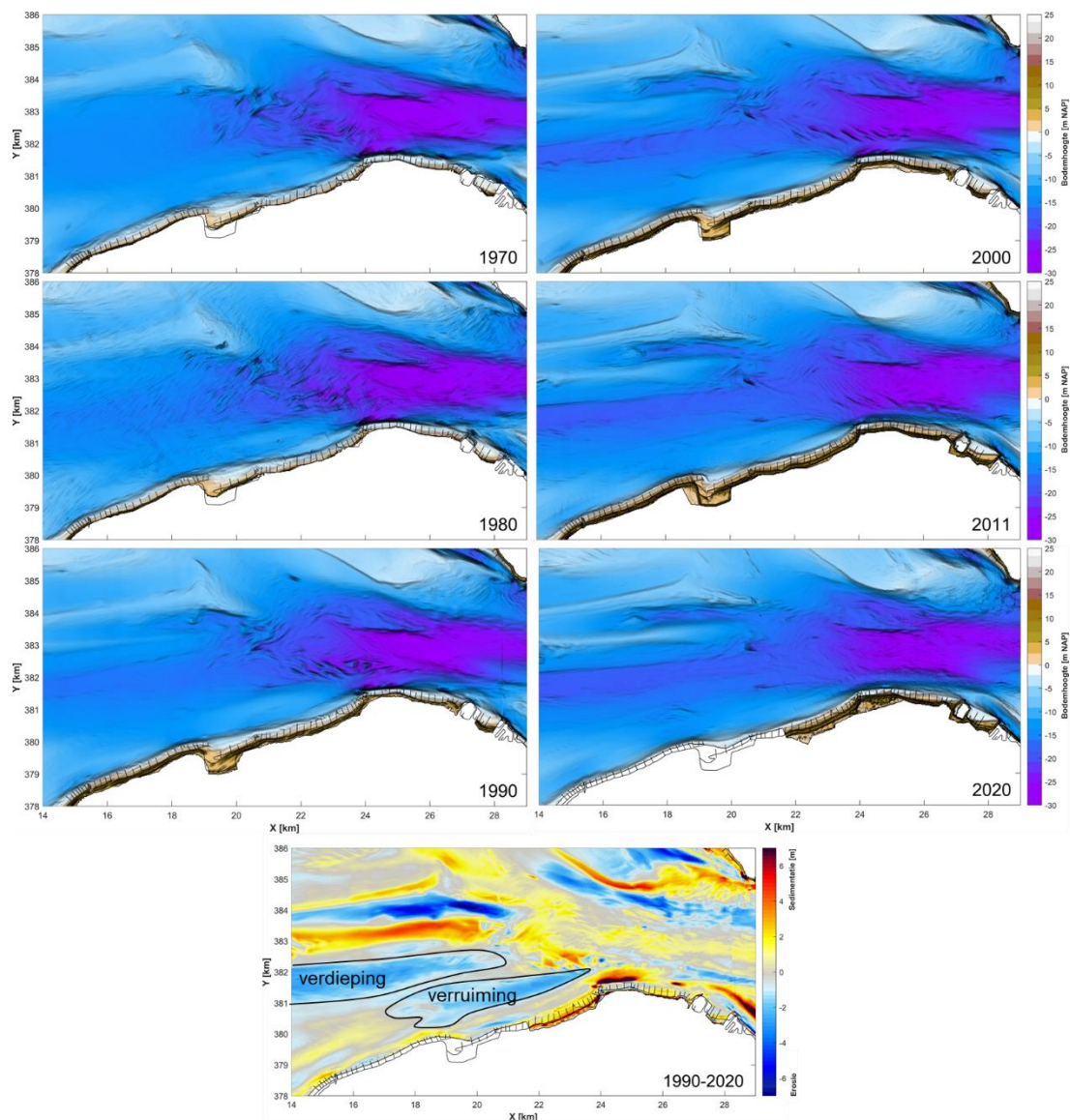
Volgens verschillende modelstudies (zie De Maerschalcck et al., 2017; Grasmeijer et al., 2020) loopt het netto langstransport op van $0 \text{ m}^3/\text{jaar}$ bij de havendam van Zeebrugge tot ca. $200-300 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{jaar}$ bij Cadzand. Dit oplopend transport is waarschijnlijk mede debet aan de erosie van de stranden bij Knokke.

Volgens de verhouding tussen het getijdeprisma (~400.000 m^3 voor de uitbreiding in 2018) en het langstransport (100.000 – 200.000 m^3/jaar) zou de toegangseul naar het Zwin niet stabiel moeten zijn (Trouw et al., 2015; De Maerschalcck et al., 2017). Menselijk ingrijpen om een verzande monding te heropenen is echter niet nodig geweest. Dit suggereert dat een (groot) gedeelte van het langstransport de toegangseul passeert, in lijn met de relatief ondiepe ligging ervan (~NAP -1 m).

4.3 Ontwikkeling Zeeuws-Vlaamse kust

4.3.1 Morfologische ontwikkeling

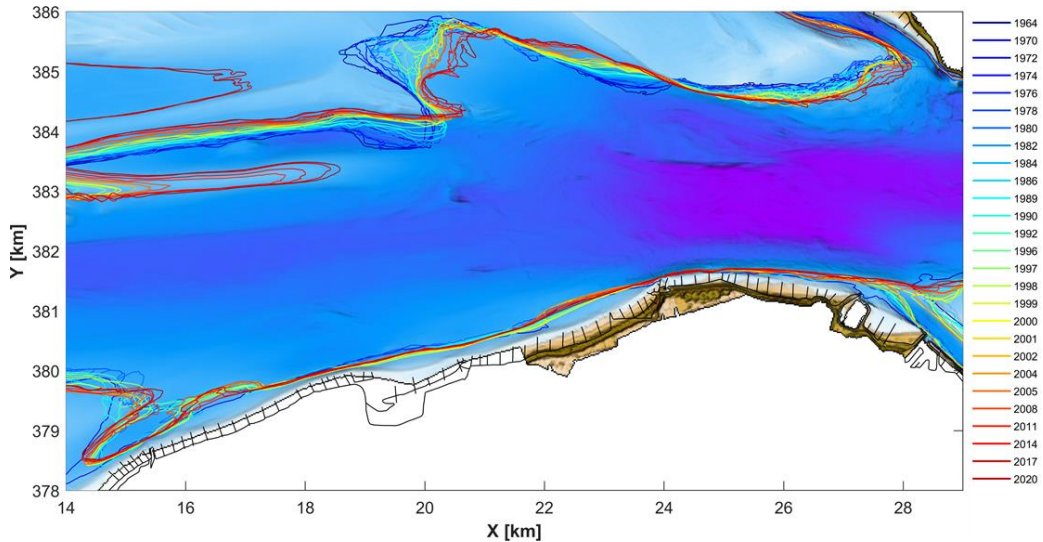
Het bankengebied ten noorden van de Wielingen is zeer dynamisch, zoals in H4.2.1 is beschreven. Het gebied ten zuiden van de Wielingen, bij de Zeeuws-Vlaamse kust is daarentegen niet veel veranderd in de afgelopen 50 jaar (Figuur 4-4).



Figuur 4-4. Bodemdata van de Zeeuws-Vlaamse kust voor 1970-2020 met een interval van ca. 10 jaar en een overzicht van de grootschalige morfologische veranderingen voor de kust van Zeeuws-Vlaanderen over de periode 1990-2020.

De meest duidelijke verandering is de verruiming van de Wielingen, die sinds de jaren '60 versterkt wordt door verdiepingen en onderhoudsbaggerwerkzaamheden. Door 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. Het ondiepe deel van de kust laat vooral een toename van de bodemhoogte zien. Deze toename is gerelateerd aan de uitgevoerde zandsuppleties en Zwakke Schakel versterkingen. De in 2016 aangelegde golfbrekers aan weerszijden van de uitwateringssluis bij Cadzand-Bad hebben waarschijnlijk een grotere barrière voor het kustlangs zandtransport gevormd aangezien hier zeer lokaal erosie heeft opgetreden. Ook vindt er in net ten oosten van de Verdrongen Zwarte Polder, langs het traject Nieuwvliet-Groede, in het ondiepe deel van de kust juist een verdieping plaats. Volgens De Maerschack et al. (2017) is deze sterke afname in diepte bij het Kruishoofd een reactie op de Zwakke Schakel versterking aangezien Kuijper et al. (2015) een soortgelijke respons na suppleties hebben waargenomen ten oosten van Cadzand-Bad. Zij vonden dat het gesuppleerde zand na 1-2 jaar van het strand is weggevoerd.

Hierbij was ten minste een deel op de ondiepe vooroever (tussen 0 m en -5 m NAP) terecht gekomen. Op de verdieping bij Nieuwvliet-Groede wordt in Hoofdstuk 5.2 dieper ingegaan. Ter hoogte van Cadzand, rondom de Tienhonderd polder, ligt het diepe deel van de Wielingen enkele kilometers uit de kust. De kust steekt hier iets naar voren, mogelijk door de aanwezigheid van kleilagen (dinoloket.nl). Meer naar het westen ligt het diepe deel van de Wielingen dichterbij de kust. De voet van de vooroever ligt langs de Zeeuws-Vlaamse kust op een diepte van ca. -10 m NAP. Figuur 4-5 geeft een overzicht van deze -10 m dieptecontour over de periode 1964-2020.



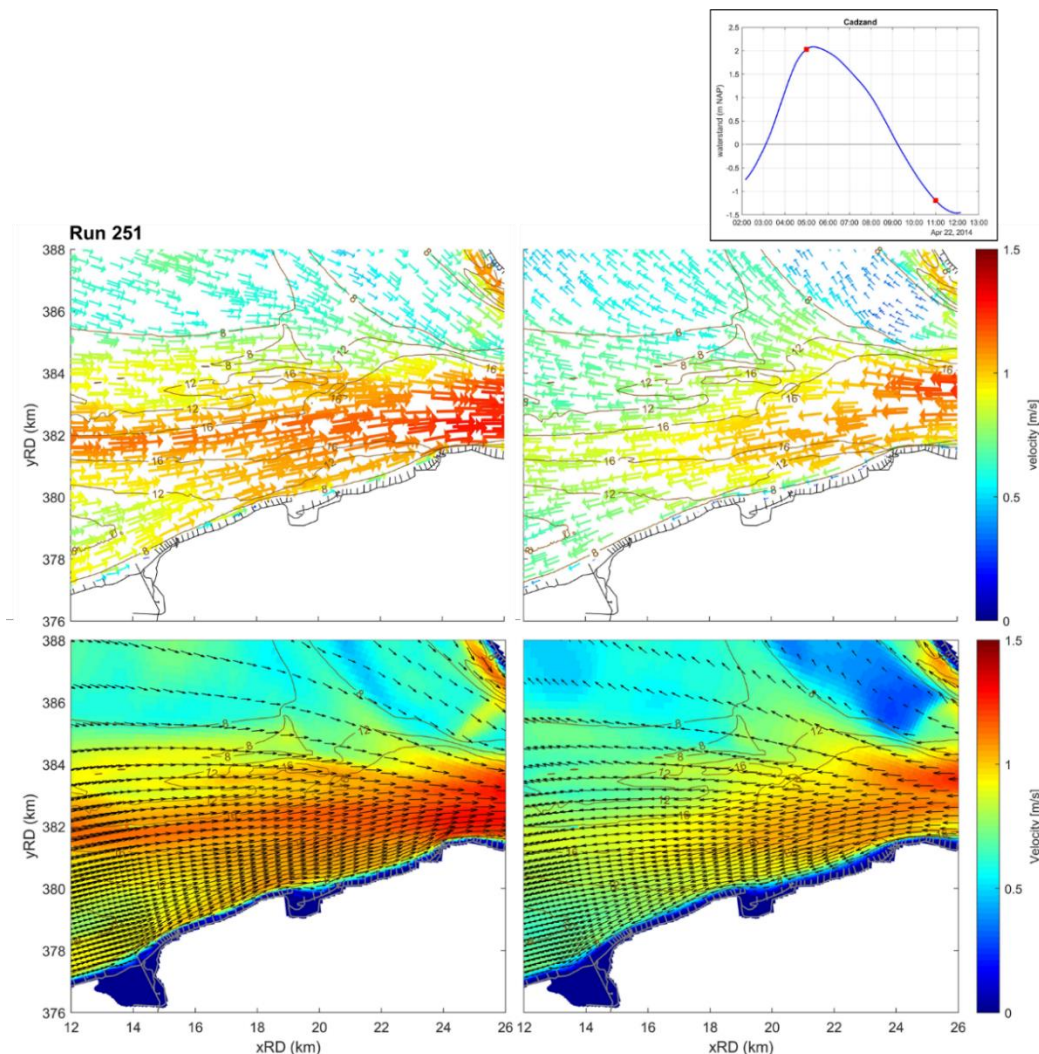
Figuur 4-5. Overzicht van de -10m contour op basis van Vaklodingen data 1964-2020 weergegeven op de 2020-bodemkaart.

4.3.2 Waterbeweging en netto zandtransporten

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 de Westerschelde. Daarentegen zijn de getijstromingen langs de Zeeuws-Vlaamse kust relatief eenvoudig (Figuur 4-6).

Het betreft morfodynamische berekeningen met het zogeheten VlaBa model (Röbke et al., 2018). Dit diepte-gemiddelde Delft3D model is met name ontwikkeld voor de Vlaamse kust ten oosten van Zeebrugge. Het model neemt de invloed van getij, wind en golven mee. Het heeft een relatief hoge resolutie bij de kust: 30 m (kustdwars) x 90 m. Het model is gekalibreerd en gevalideerd met behulp van gemeten waterstanden, stroomsnelheden, golfparameters en de morfologische ontwikkeling tussen 1986 en 2011. Het model is geforceerd met een tijdseries van 14 maart tot 13 mei 2014 die morfologisch representatief is voor het gehele jaar 2014. We maken gebruik van de bestaande runs Run198 en Run251 die de beste resultaten gaven voor de periodes 1986-1996 en 2001-2011, respectievelijk.

Het is, in algemene zin, lastig om kustdwars zandtransport goed te modelleren, omdat het een subtiele balans is tussen landwaarts transport tijdens rustige golfcondities (met name door zogeheten *velocity-skewness*, met relatief hogere landwaartse orbitaalsnelheden) en zeewaarts transport tijdens brekende golven (gekoppeld aan de zeewaartse retourstroming). Het is extra lastig om dit met een diepte-gemiddelde model (als VlaBa) te doen, omdat deze geen rekening houdt met de verticale structuur van golfgemiddelde stroomsnelheden met een zeewaartse component bij de bodem.



Figuur 4-6. Piek vloed- (linker panelen) en ebsnelheden (rechter panelen) berekend met het VlaBa Delft3D model. In de bovenste figuren geeft zowel de kleur als de lengte van de pijlen de grootte van de stroomsnelheden weer. In de onderste figuren geeft de lengte van de pijlen en de onderliggende kleurenschaal de grootte van de stroomsnelheden weer. In beide gevallen is het berekende stromingsveld uitgedund om de leesbaarheid te bevorderen.

Het getij propageert kustlangs door de geul Wielingen. Er ontstaan dan hoge stromingen langs de gehele kustlijn tijdens eb en vloed. Er is bijna overal sprake van vloeddominantie, i.e. de piek vloodsnelheden zijn groter dan de piek ebsnelheden. Dit blijkt ook duidelijk uit de waterstand met een kortere vloedperiode (stijgende waterstand) in vergelijking met de ebperiode (dalende waterstand). Aangezien gedurende deze kortere periode (ongeveer) dezelfde hoeveelheid water getransporteerd wordt, betekent dit grotere vloeddebiëten wat (meestal) leidt tot grotere stroomsnelheden. Vanwege de hogere waterstand stroomt het water dichter bij de kust bij vloed dan bij eb, wat de kustnabije vloeddominantie versterkt.

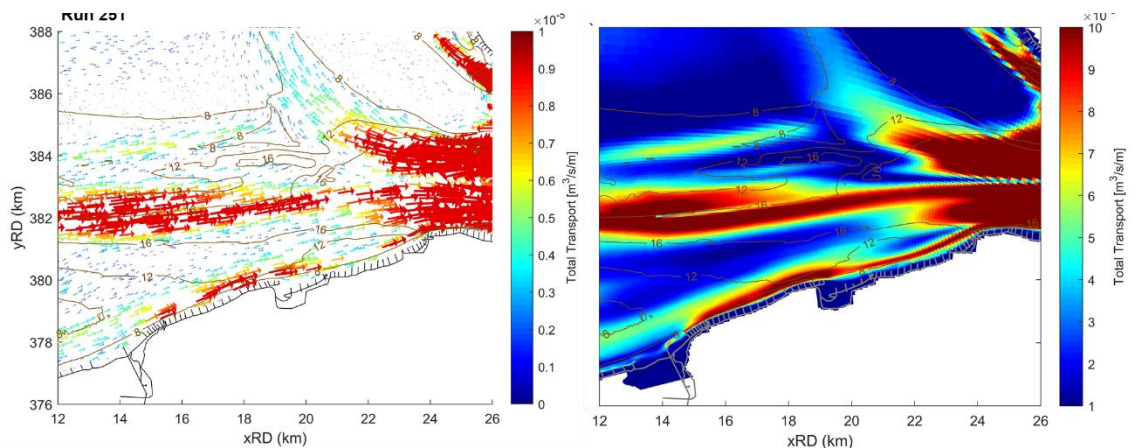
De strandhoofden houden de stroming uit de kust. Tijdens vloed is een contractie van stroomlijnen zichtbaar bij Cadzand (xRD = 14-16 km), net westwaarts van de Verdrongen Zwarte Polder (xRD ~18 km) en Nieuwesluis (xRD = 23-24 km). Bij de Verdrongen Zwarte Polder zelf (xRD ~19 km) is juist een verwijding zichtbaar.

Figuur 4-7 betreft resultaten van morfologische berekeningen voor de periode 2001-2011. Het stroombeeld is niet wezenlijk anders voor de periode 1986-1996 (niet getoond). Het berekende netto zandtransport (som van twee fracties: 0,10 en 0,25 mm) heeft een oostwaartse richting, in lijn met de vloeddominantie (Figuur 4-7). De grootste transporten vinden plaats in de Wielingen. Er zijn ook relatief grote zandtransporten langs de Zeeuws-Vlaamse kust, met name bij waterdieptes tussen de 4 en 12 m. Deze relatief grote dieptes suggereren dat het netto zandtransport voornamelijk getij-gedreven is.

De getijgeul ligt vanaf de Verdrongen Zwart Polder ($x_{RD} = 18$ km) relatief dicht bij de kust. Geërodeerd strandzand kan hierdoor relatief makkelijker lateraal getransporteerd worden door de sterke kustlangse getij-stroming.

Er zijn langs-gradiënten in het zandtransport zichtbaar bij Cadzand, westwaarts van de Verdrongen Zwarte Polder en Nieuwesluis gekoppeld aan de eerder genoemde stromingscontractie. Hierdoor kan er erosie optreden. Bij Verdrongen Zwarte polder zelf c.q. net oostwaarts ervan is juist sprake van sedimentatie-potentieel als gevolg van verwijding van de stroming.

In lijn met het stroombeeld zijn de netto zandtransporten niet wezenlijk anders voor de periode 1986-1996 (niet getoond), al zijn deze in algemene zin wel lager dan in de periode 2001-2011 die getoond worden in Figuur 4-7. Beide betreft het periodes voor de Zwakke Schakel versterkingen.



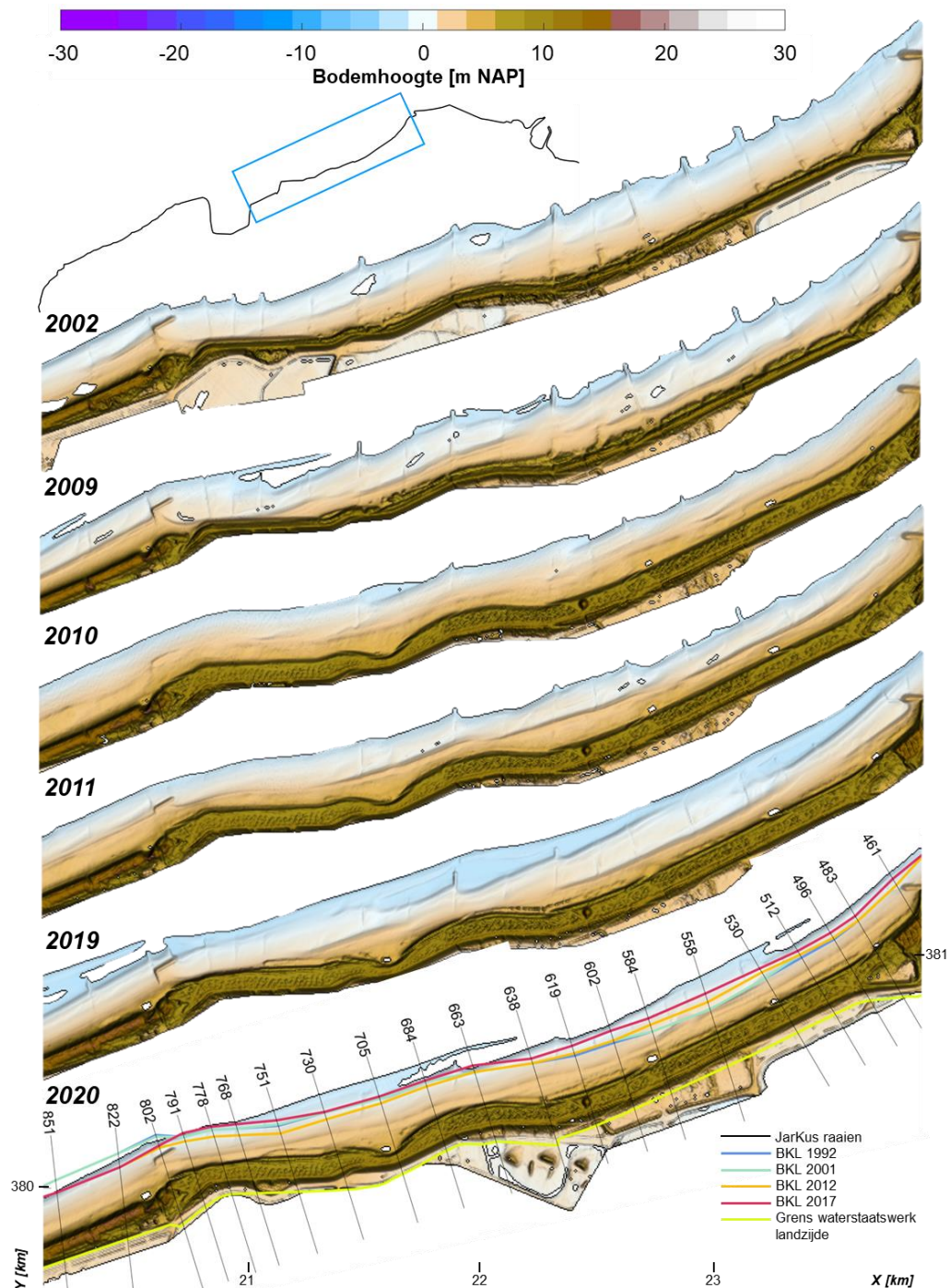
Figuur 4-7. Netto zandtransporten berekend met het VlaBa Delft3D model. In het linker figuur geeft zowel de kleur als de lengte van de pijlen de grootte van de zandtransporten. Het berekende vectorveld is uitgedund om de leesbaarheid te bevorderen.

4.4 Samenvatting grootschalige morfologische ontwikkeling

Op grote schaal heeft de Wielingen invloed op de kust van Zeeuws-Vlaanderen. Vanaf de 17e eeuw is de Wielingen de dominante geul geworden, in gang gezet door veranderingen van de oriëntatie van de Honte getij-geul in de Westerschelde. De Deltawerken (1950-1986) hebben geleid tot grootschalige morfologische veranderingen van de Voordelta, maar de invloed op de Schelde-monding is beperkt. Het grootschalige patroon van geulen en platen in de monding is niet wezenlijk veranderd doordat de Westerschelde, anders dan de andere getijdebekkens, volledig open is gebleven. De enige duidelijke verandering is de verruiming van de Wielingen door verdiepingen en onderhoudsbaggerwerkzaamheden vanaf de jaren 1960. Hierdoor ligt de Wielingen relatief dicht voor de kust van Nieuwvliet-Groede. Modelsonnen laten zien dat het getij door de Wielingen langs de kust propageert. Het netto zandtransport is voornamelijk getij-gedreven. Aangezien de Wielingen vloeddominant is, zijn de (berekende) netto zandtransporten oostwaarts gericht.

5 Kleinschalige morfologische ontwikkeling

Figuur 5-1 geeft enkele LiDAR opnamen van de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede tussen 2002 en 2020 weer, Appendix A.3 bevat al de LiDAR opnamen tussen 1997 en 2020. De figuur laat duidelijk de strand-duin suppletie zien die hier in 2009 is uitgevoerd als onderdeel van het Zwakke Schakel project. Dit hoofdstuk behandelt de morfologische ontwikkeling van dit stuk kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede.

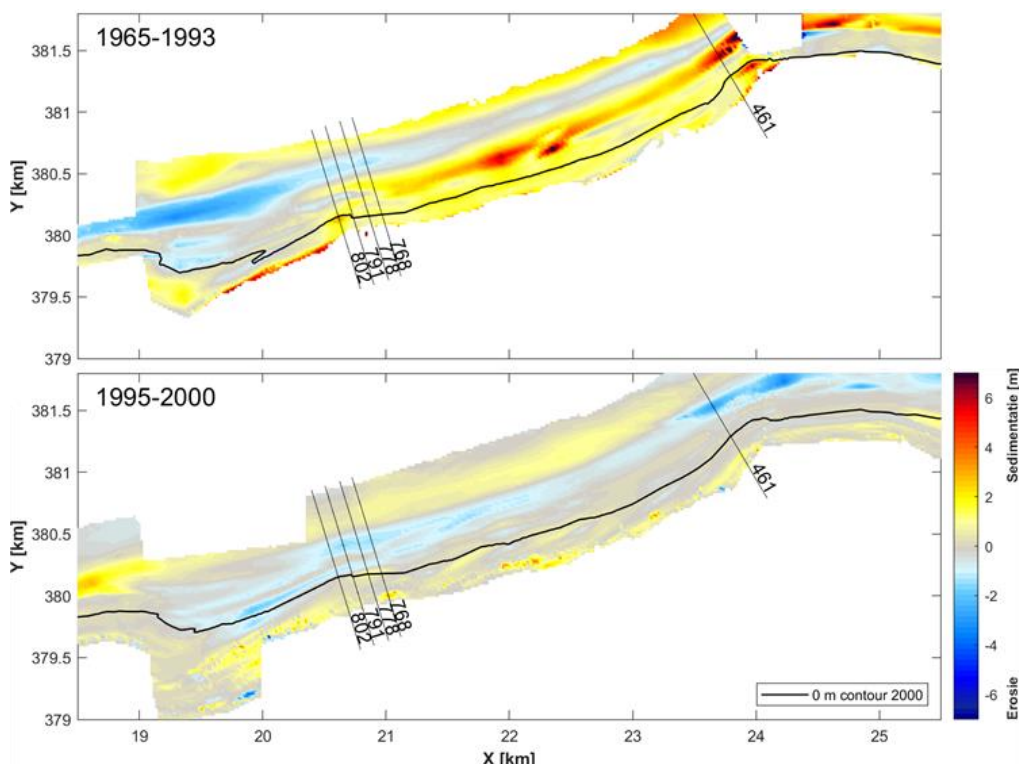


Figuur 5-1. LiDAR opnamen van 2002, 2009-2011, 2019-2020 (Appendix A.3 bevat alle opnamen). De 2020-opname geeft de landwaartse grens van het waterstaatswerk weer, evenals de verschillende BKL posities.

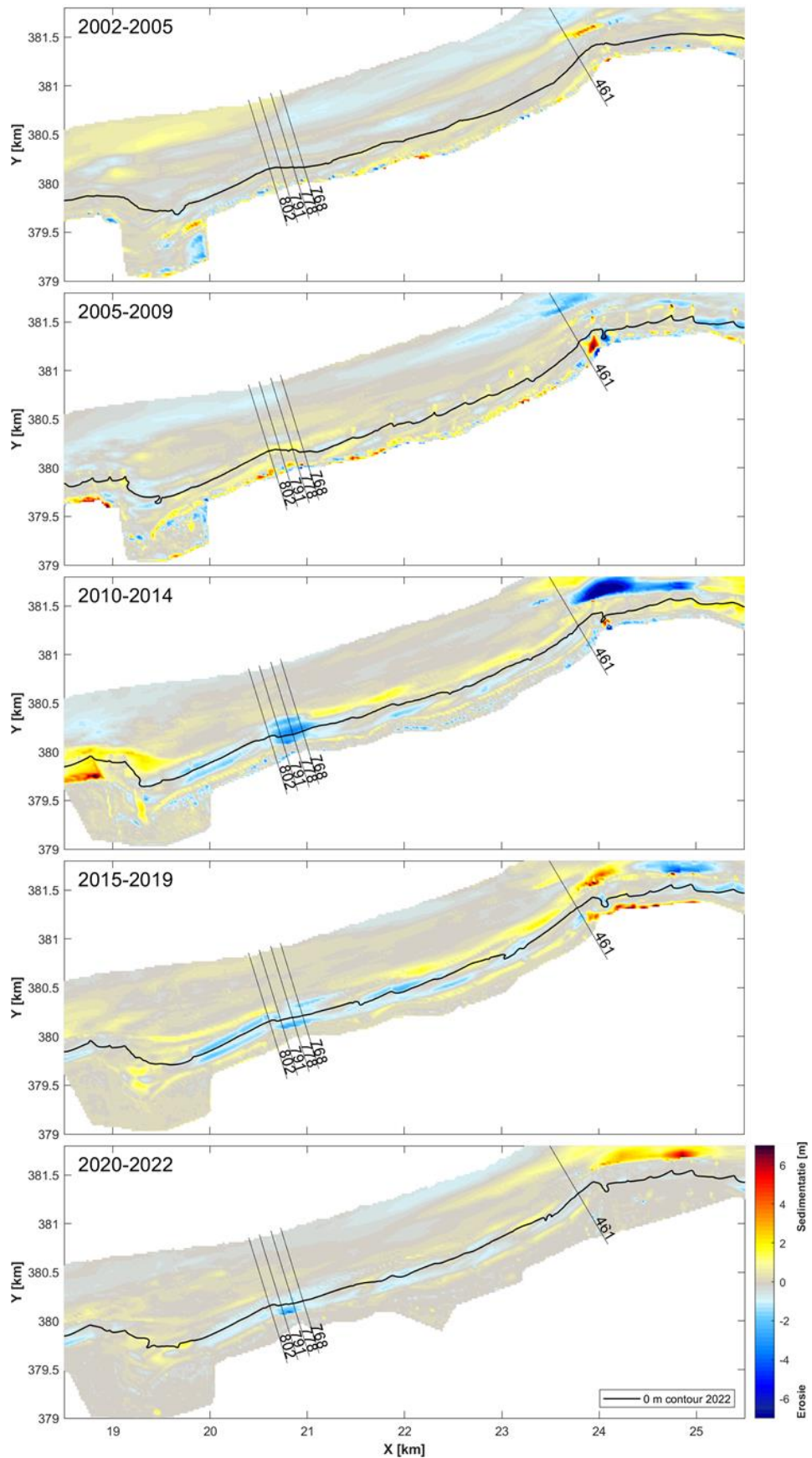
5.1 Morfologische ontwikkelingen

Figuur 5-2 en Figuur 5-3 laten de verschillen in bodemhoogte zien in de zone tussen de duinen en de diepe vooroever in periodes tussen zandsuppleties. Ondanks de beschermende werking van de strandhoofden, treedt lokaal alsnog aanzienlijke erosie op. De periodieke zandsuppleties zijn bedoeld om verdere kustachteruitgang te voorkomen. In de periode gelijk na een suppletie zal de werking van de strandhoofden gereduceerd zijn, omdat deze vrijwel geheel onder het zand wordt bedolven. Aangezien de stranden heel smal zijn, noopt dit in uitbouw van de vooroever, wat weer leidt tot extra verlies van zand door de getijstroom. Dit is zichtbaar in Figuur 5-2 en Figuur 5-3: als er een zandsuppletie heeft plaatsgevonden, vindt in de daaropvolgende periode op die locatie vaak erosie plaats van dat gesuppleerde zand. Zo heeft er eind 1994 een strandsuppletie plaatsgevonden tussen raai 806 en 918, en in de verschilopname van 1995-2000 is in het westen inderdaad een afname in bodemhoogte van het strand te zien. Dit is ook duidelijk zichtbaar in de periode na de strandsuppletie als onderdeel van de Zwakke Schakel versterking (2010-2014), de periode na de suppletie van 2014 (2015-2019) en de periode na de suppletie van 2019 (2020-2022).

Tussen 1965 en 1993 vindt langs een groot deel van het kustprofiel (tot ca. -10 m NAP) verondieping plaats. De blauwe zone representeert de voet van de vooroever die daarentegen juist landwaarts verschuift. Op enkele locaties vindt sterke ophoging plaats, hier bevond zich in 1965 een verdieping in het profiel die in 1993 is opgevuld. In de periode 1995-2000 vindt er een verdere verdieping plaats op de vooroever en verder zeewaarts vindt juist sedimentatie plaats. Mogelijk dat het geërodeerde zand van de vooroever hier belandt. In Figuur 5-3 is de erosie bij het Kruishoofd (raai 768-791) gelijk na de Zwakke Schakel versterking, maar ook in de perioden daarna, goed zichtbaar. De erosie vindt met name plaats rond de 0 m dieptecontour. Iets verder naar het oosten van deze locatie vindt juist sedimentatie plaats. Mogelijk dat het gesuppleerde zand geërodeerd is en in de richting van het vloeddominante getij is verplaatst, wat deze sedimentatie verklaart.



Figuur 5-2. Het verschil in bodemhoogte (JarKus grids) tussen 1965 en 1993 en 1995 en 2000. De periodes zijn zo gekozen dat ze min of meer ongestoord zijn door zandsuppleties, de periodes vallen precies tussen suppleties in.



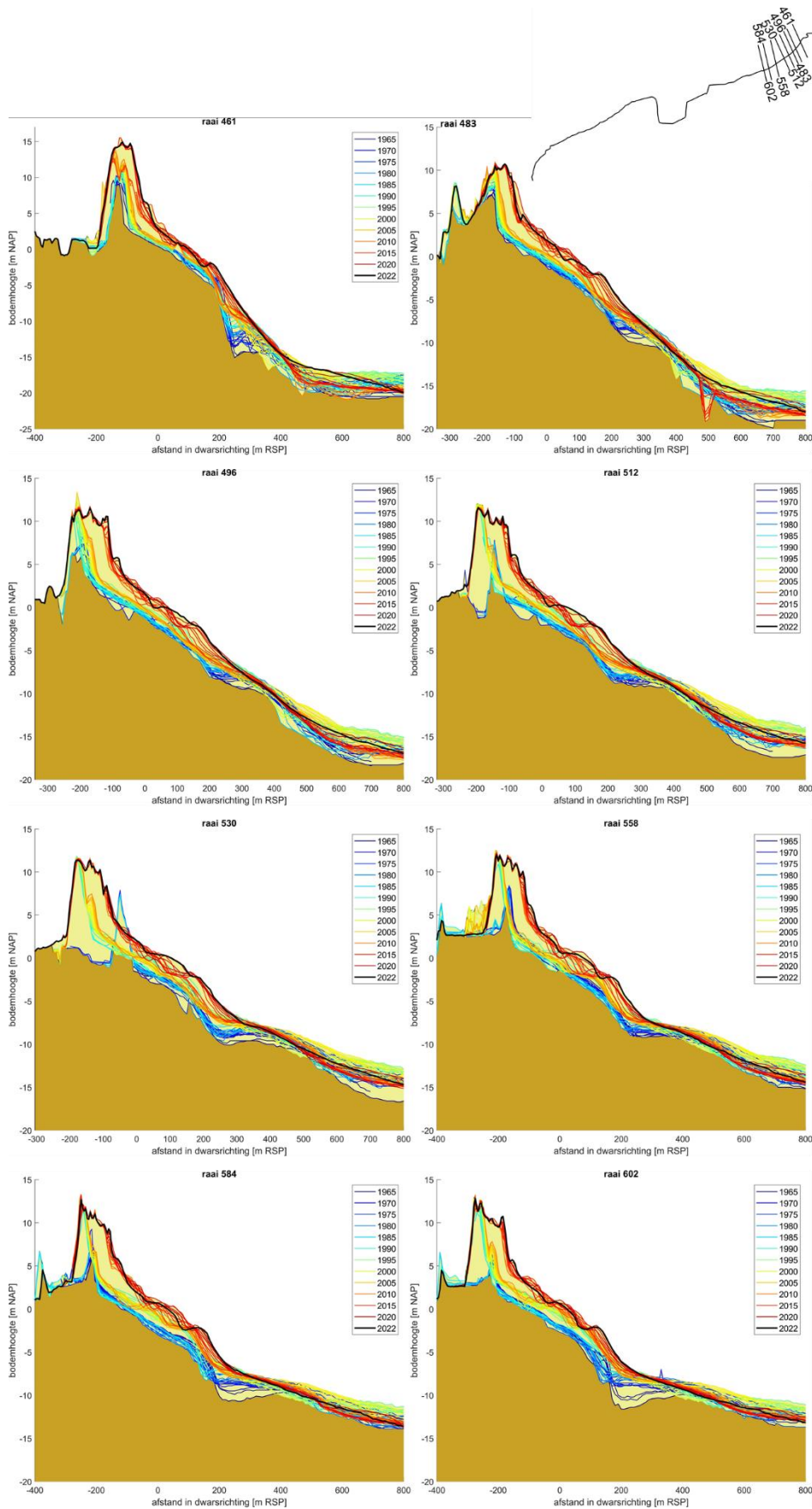
Figuur 5-3. Het verschil in bodemhoogte (JarKus grids) tussen 2002 en 2005, 2005 en 2009, 2010 en 2014, 2015 en 2019, 2020 en 2022. De periodes zijn zo gekozen dat ze min of meer ongestoord zijn door zandsuppleties, de periodes vallen precies tussen suppleties in.

Figuur 5-5, Figuur 5-6 en Figuur 5-7 laten de JarKus profielen zien in het kusttraject Nieuwvliet-Groede waar tussen 2009 en 2010 een Zwakke Schakel versterking heeft plaatsgevonden (461-802) en een paar raaien ten westen daarvan. Er zijn geen extra raaien ten oosten geanalyseerd, omdat hier een nieuw deelgebied begint met een andere kustoriëntatie. Het maximale profiel is geel opgevuld en het minimale profiel is bruin opgevuld. De Zwakke Schakel versterking (2009-2010) is duidelijk in de figuren terug te zien als een sterke stijging in bodemhoogte. Het is van belang te vermelden dat er in 1989, 2001, 2005, 2014 en 2019 (kleinere) strandsuppleties hebben plaatsgevonden langs (delen van) de kust van Nieuwvliet-Groede.

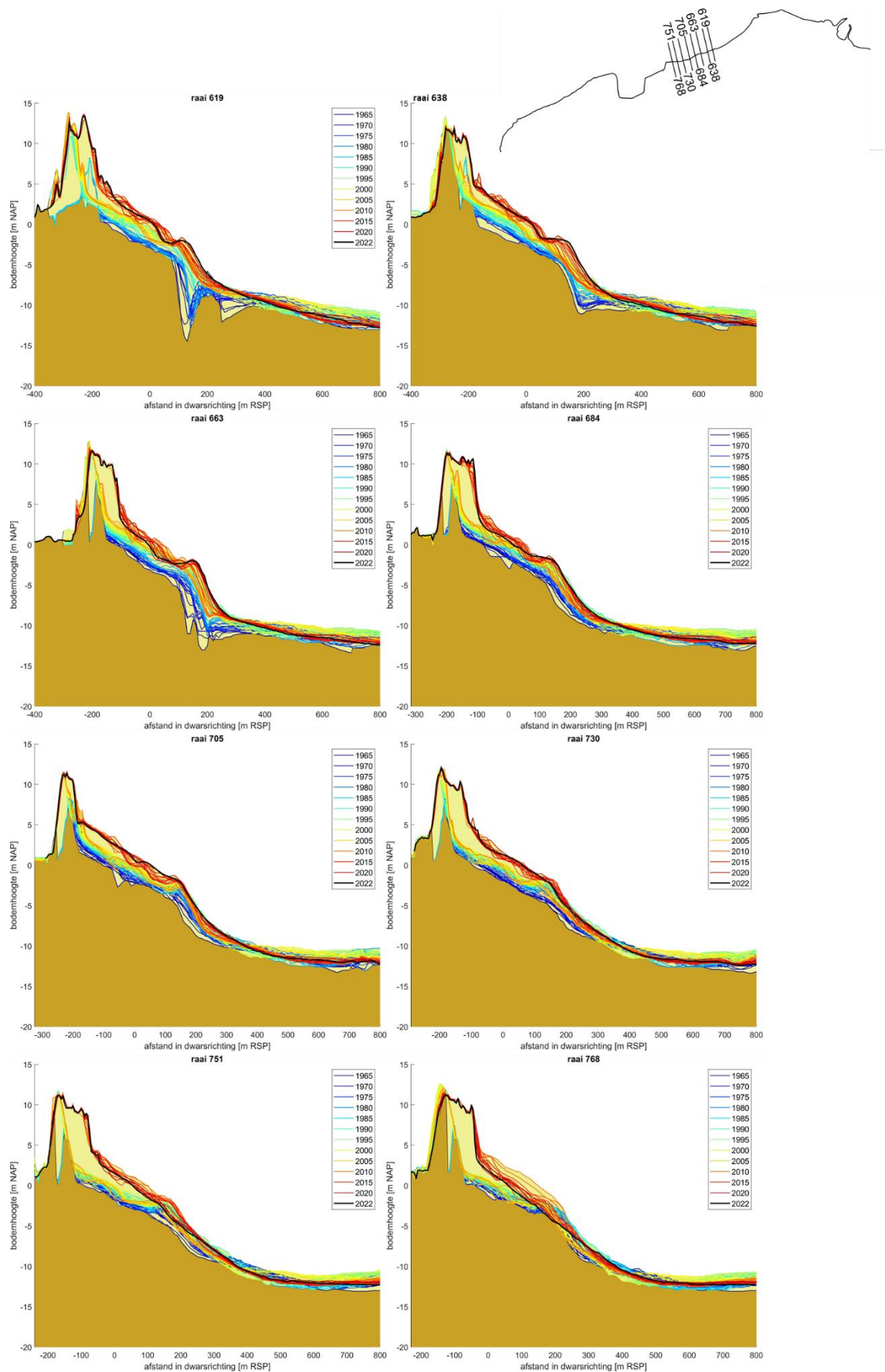
De figuren laten zien dat het profiel tussen +3 en -3 m NAP heel dynamisch is. Na de Zwakke Schakel versterking vond in vrijwel alle raaien gelijk weer erosie plaats. Om deze reden hebben hier naast de Zwakke Schakel versterking ook nog twee strandsuppleties plaatsgevonden tussen raai 461 en 877: één in 2014 en één in 2019. Deze erosie is met name sterk tussen raai 768, 778 en 791, waar de erosieberm in 2009 is aangelegd. Opvallend in raai 778 is dat tussen 2021 en 2022 flinke duinerosie heeft plaatsgevonden. Deze duinerosie is het gevolg geweest van de stormen Corrie, Dudley, Eunice en Franklin. Door deze duinerosie is in februari 2022 een fietspad enkele meters naar beneden gestort (Figuur 5-4).



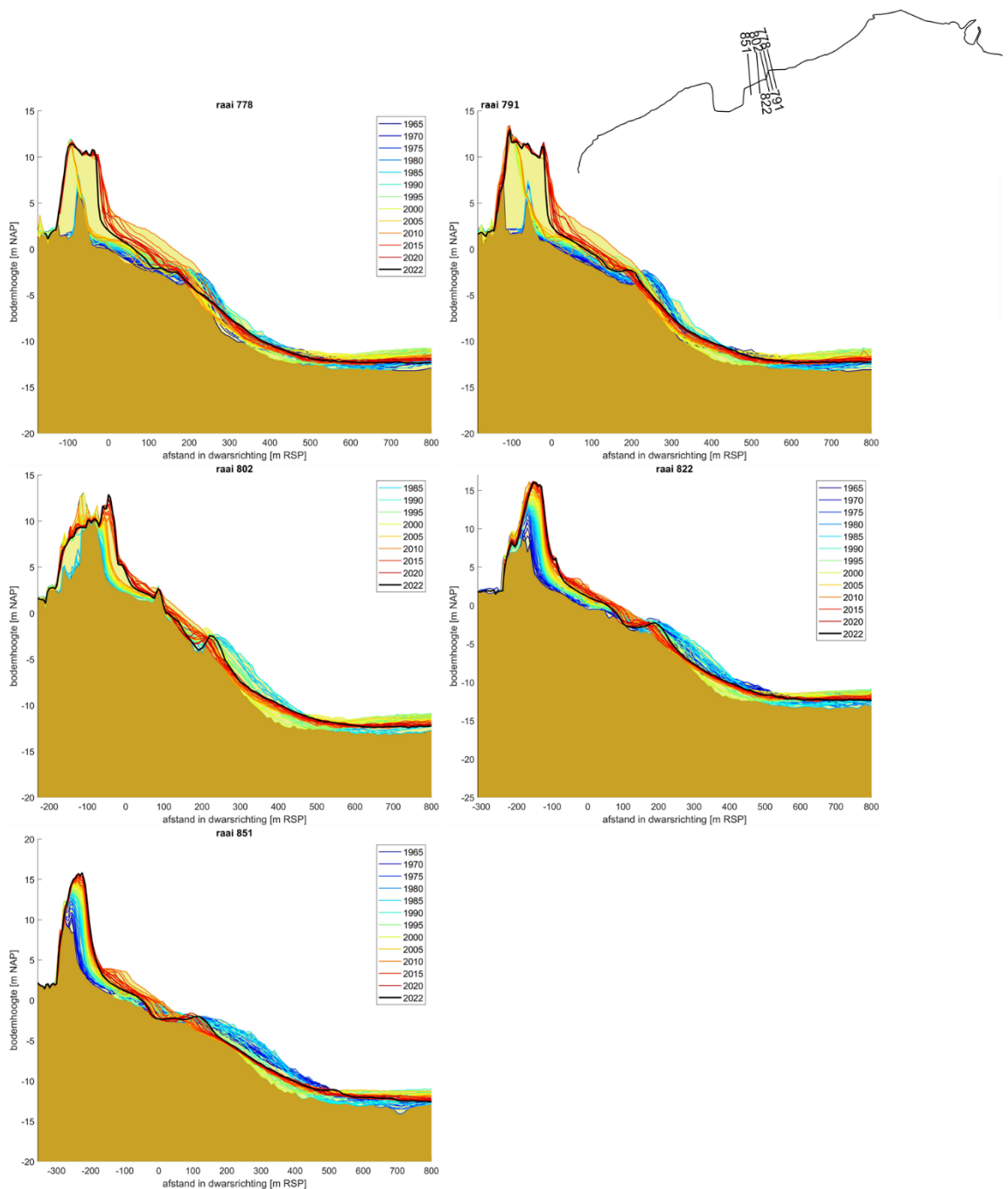
Figuur 5-4. Fietspad ingestort door duinafslag bij raai 778. Foto: Scheldestromen, voorjaar 2022.



Figur 5-5. JarKus profielen voor raaien 461-602 voor de periode 1965-2022. Naast de ZS versterking (2009-2010), hebben in 2001 (raai 512), 2014 en 2019 strandsuppleties plaatsgevonden.



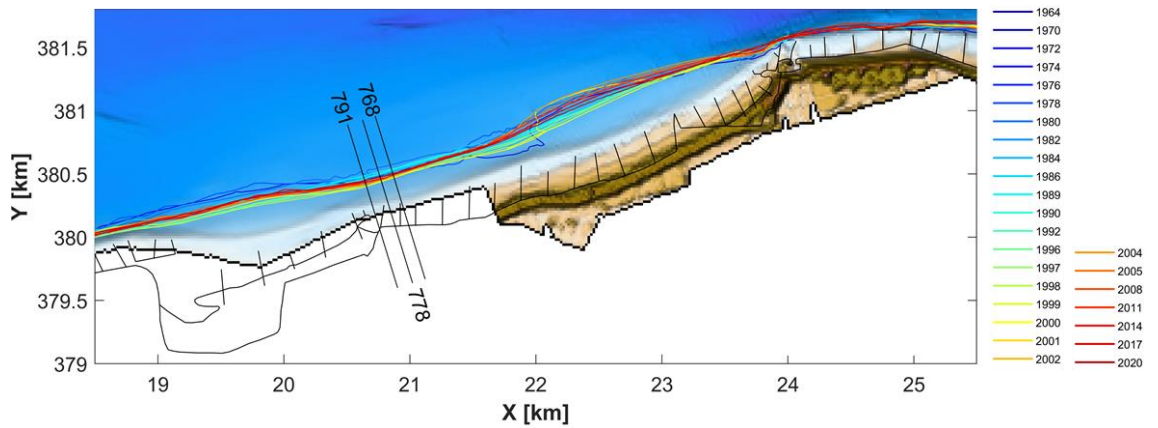
Figuur 5-6. JarKus profielen voor raaien 619-768 voor de periode 1965-2022. Naast de ZS versterking (2009-2010), hebben in 2001 (raai 512), 2014 en 2019 strandsuppleties plaatsgevonden.



Figuur 5-7. JarKus profielen voor raaien 778-851 voor de periode 1965-2022. Naast de ZS versterking (2009-2010), hebben in 2001 (raai 512), 2005 (778-851), 2014 en 2019 strandsuppleties plaatsgevonden.

Zowel bij het Kruishoofd, als de raaien ten westen daarvan (802-851) is erosie van de helling van de vooroever (-4 m NAP tot -10 m NAP) zichtbaar. Dit suggereert dat de Wielingen mogelijk hier wat naar het zuiden, richting de Zeeuws-Vlaamse kust, is opgeschoven.

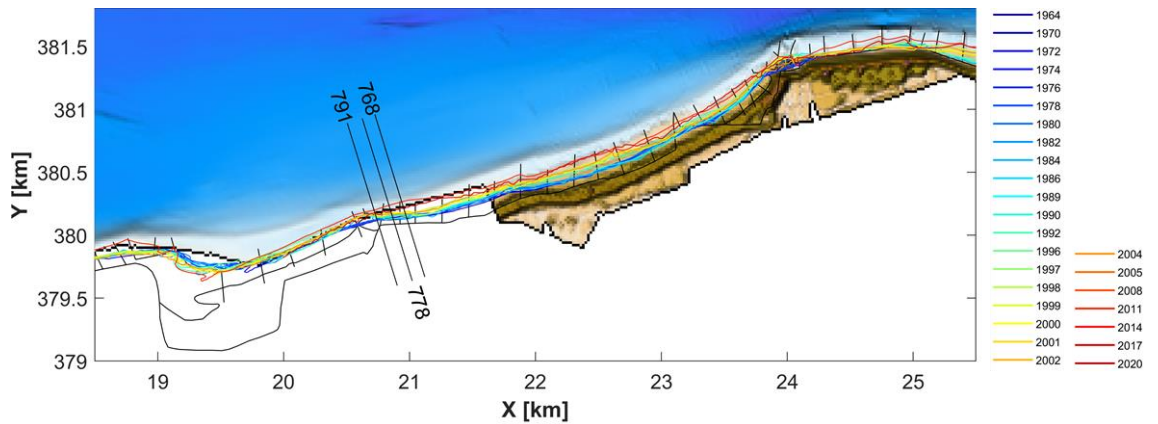
Figuur 5-8 laat de -10 m contour zien. Deze contour representeert min of meer de voet van de vooroever. Deze contour ligt rond het Kruishoofd dichter bij de kust dan in de zone ten oosten daarvan. Wat opvalt is dat de -10 m contour vanaf JarKus raai 768 en de zone ten westen daarvan eerst landwaarts beweegt, tot ca. 2000 en daarna is deze weer zeewaarts verschoven.



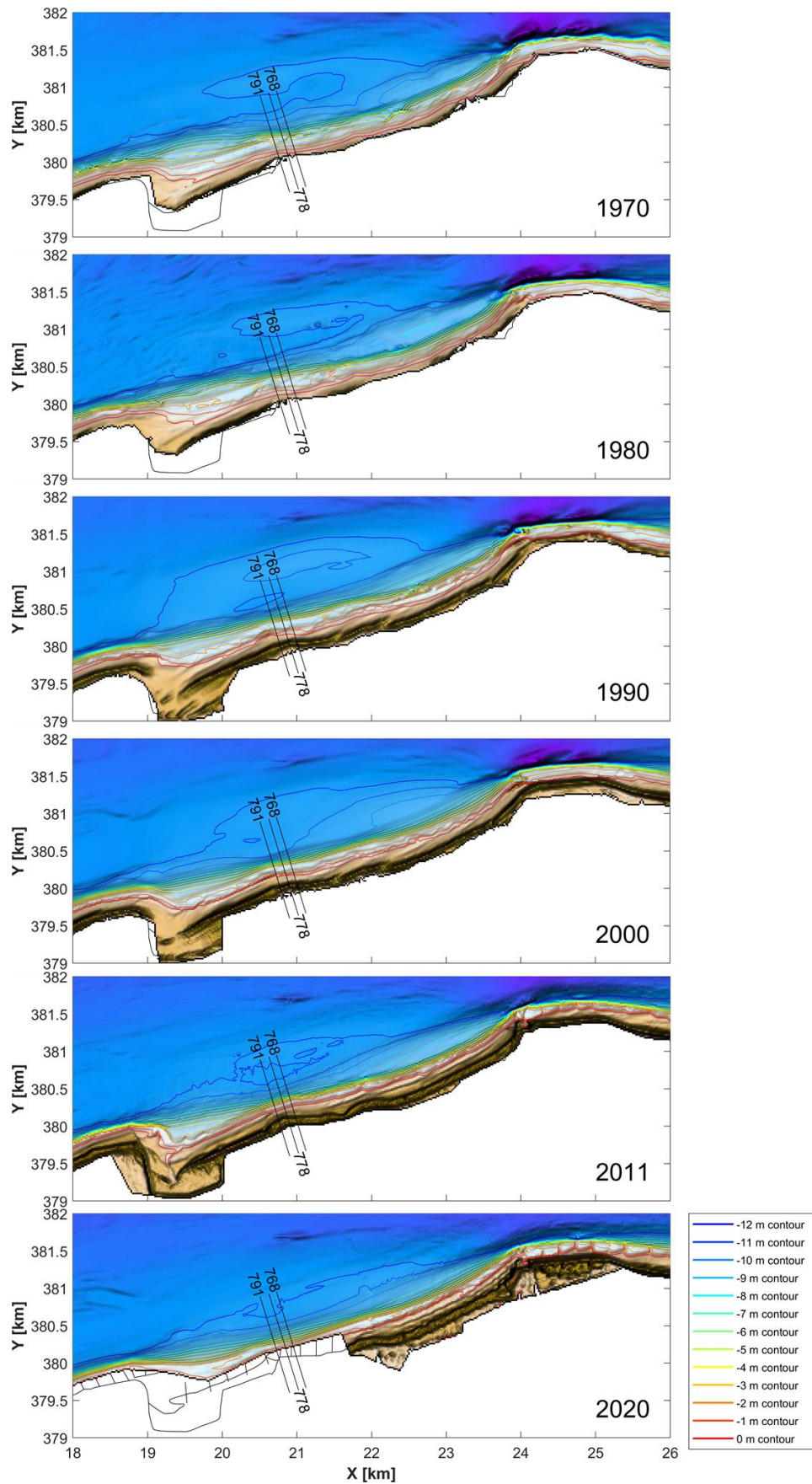
Figuur 5-8. Overzicht van de -10m contour op basis van Vaklodingen data 1964-2020 weergegeven op de 2020-bodemkaart voor het traject Nieuwvliet-Groede.

De Jarkus profielen laten ook zien dat de helling van het zeewaartse profiel bij het Kruishoofd steiler is geworden. Dit is nog duidelijke te zien in Figuur 5-10 waar de -12 m tot de 0 m diepte contouren op basis van Vaklodingen zijn geplot. In 1970 liggen de contourlijnen verder uit elkaar dan in 2020.

Figuur 5-9 laat de positie van de 0 m contourlijn zien voor de periode 1964-2020. Bij het Kruishoofd is een sterke zeewaartse verplaatsing zichtbaar in 2011. In 2017 ligt de 0 m contour vervolgens weer verder landwaarts. Op basis van de Jarkus profielen is de gemiddelde ligging van de 0 m dieptecontour bepaald. In 2009 lag de 0 m contour gemiddeld voor raai 768-791 op 63 m t.o.v. RSP. Gelijk na de suppletie, in 2010, lag de 0 m contour op 157 m t.o.v. RSP. Het jaar daarop (2011) lag de 0 m contour voor de drie raaien gemiddeld op 127 m. Al met al laten de contourlijnen zien dat het profiel bij het Kruishoofd door de Zwakke Schakel versterking steiler is geworden en de kustlijn sterk zeewaarts is verplaatst. In de jaren na de versterking is de kustlijn vervolgens weer een beetje landwaarts teruggetrokken.



Figuur 5-9. Overzicht van de 0m contour op basis van Vaklodingen data 1964-2020 weergegeven op de 2020-bodemkaart voor het traject Nieuwvliet-Groede.



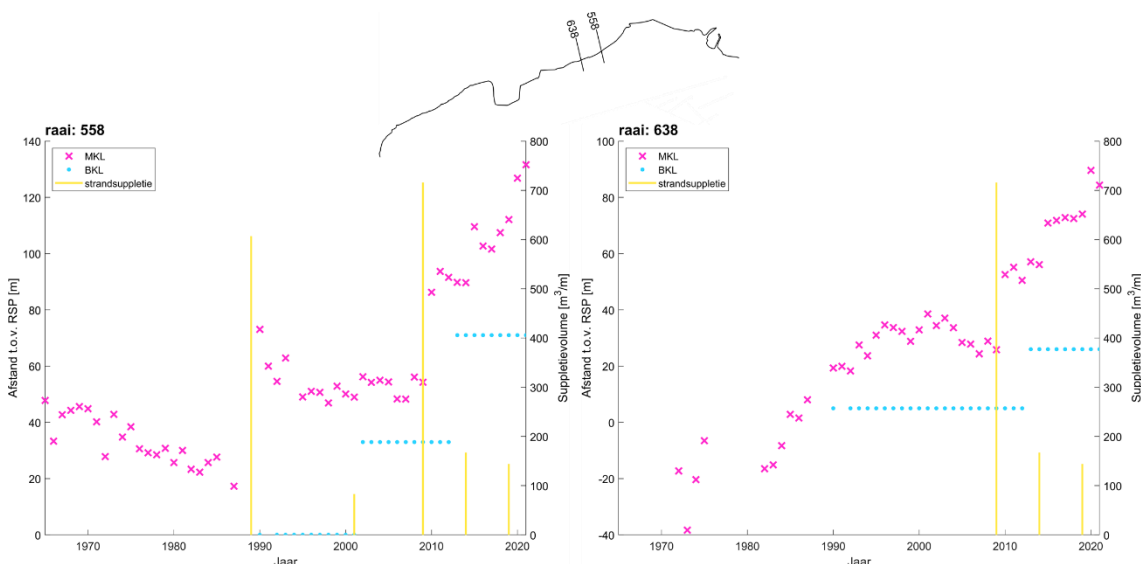
Figuur 5-10. Verschillende contourlijnen op basis van Vaklodgingen voor verschillende periodes langs de kust bij Nieuwvliet-Groede.

5.2 Lokale ontwikkeling van de kustlijn

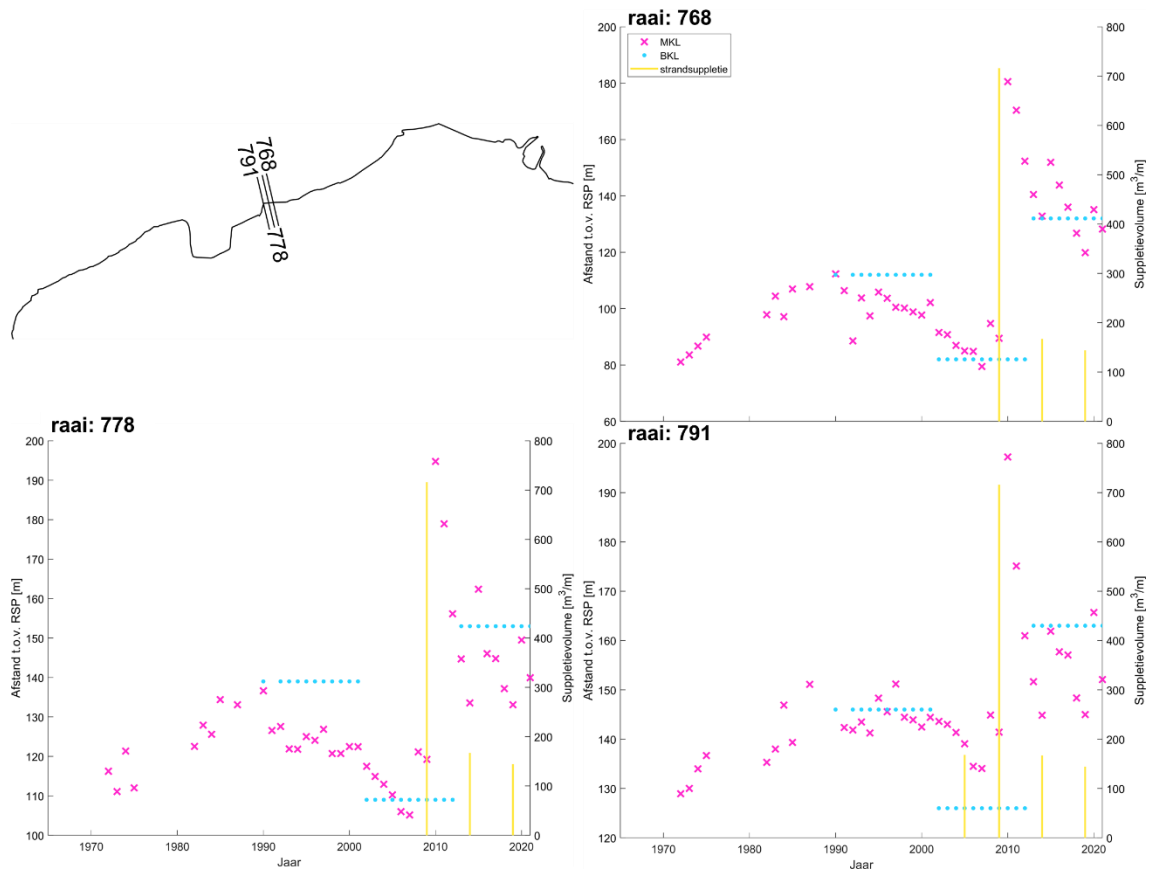
Tussen 1990 en 2009 bevond de MKL zich in de meeste raaien langs het traject Nieuwvliet-Groede al zeewaarts van de BKL, zonder dat hiervoor veel suppleties nodig waren. Alleen in 2001 (raai 558 en 802) en 2006 (raai 791 en 802) hebben twee kleine suppleties plaatsgevonden. Figuur 5-11 laat de afstand tussen de MKL en BKL zien voor raai 558 en 638.

Na de strandsuppletie van 1989 is de MKL bij raai 558 20 m landwaarts verschoven, waarna de MKL positie meer dan 10 jaar stabiel bleef. In 2003 is de BKL zeewaarts verlegd om de stabiliteit van de strandhoofden te waarborgen. Na de Zwakke Schakel versterking is de BKL in 2012 zeewaarts verlegd. Vervolgens is de kustlijn na de suppleties van 2014 en 2019 verder zeewaarts geschoven. Voor de meeste raaien ligt de MKL hierdoor nu ruim zeewaarts van de BKL, zie bijvoorbeeld weer raai 558 en 638 in Figuur 5-11.

Uitzondering hierop zijn raai 768-791 bij het Kruishoofd (Figuur 5-12). Bij deze raaien is de MKL vrijwel gelijk na de Zwakke Schakel versterking sterk landwaarts verplaatst (gemiddeld -14 m/jaar). De suppletie van 2014 heeft tot een tijdelijke zeewaartse verschuiving van de MKL geleid, waarna deze wederom sterk landwaarts verschoof (gemiddeld -6 m/jaar). De suppletie van 2019 heeft er in raai 778 niet eens voor gezorgd dat de MKL zeewaarts van de BKL kwam te liggen. Bij raai 768 en 791 was de zeewaartse ligging van de MKL ten opzichte van de BKL maar van hele korte duur. De morfologische ontwikkelingen (H5.1) laten zien dat de kust hier door de versterking heel steil is geworden. De duinenrij gaat vrijwel gelijk over in de vooroever. Hierdoor is er vrijwel geen bufferruimte aanwezig voor de MKL. Zodra er dus sediment hoger in het profiel (ca. +3 tot -1 m NAP) zeewaarts verdwijnt, verplaatst de MKL landwaarts.



Figuur 5-11. De afstand van de MKL en BKL t.o.v. RSP en de suppletievolumes voor raai 558 en 638. Appendix A.4 bevat de MKL-BKL trends voor raai 461-851.



Figuur 5-12. De afstand van de MKL en BKL t.o.v. RSP en de suppletievolumes voor raai 768, 778 en 791. Appendix A.4 bevat de MKL-BKL trends voor raai 461-851.

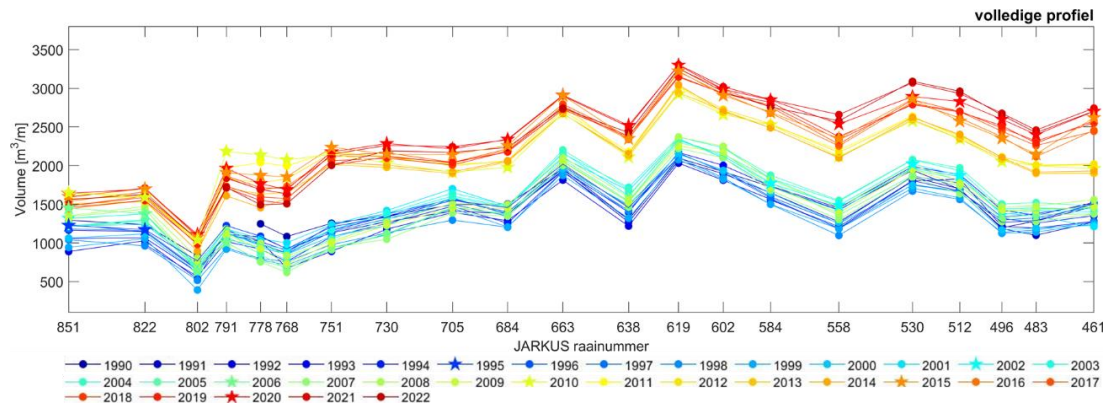
5.3 Kwantificering van volumes

5.3.1 Volume(veranderingen) onder het gehele JarKus profiel

Figuur 5-13 laat het volume onder het hele JarKus profiel (duin, strand en (ondiepe) vooroever) per raai zien voor de periode 1990-2022. Twee raaien ten westen van het traject Nieuwvliet-Groede, raai 822 en 851, zijn weergegeven om eventuele sedimentuitwisseling met het westen ook mee te nemen in de analyse. Er zijn geen raaien ten oosten van raai 461 meegenomen, omdat hier duidelijk een ander deelgebied begint met een andere oriëntatie van de kust. De volumes zijn berekend ten opzichte van het minimum profiel (het bruine vlak in Figuur 2-2). Dit verklaart waarom het volume bij raai 802 relatief laag is, aangezien het volume tussen het maximum en minimum profiel op deze locatie vrij klein is (zie ook Figuur 5-7) omdat het Kruishoofd zich hier bevindt. De figuur bevat ook de volumetoenames door de strandsuppleties in 2001 (raai 507-570), 2005 (raai 786-936), 2014 en 2019 (raai 461-877). Appendix A.5 laat de volumes in de periodes tussen deze suppleties in losse figuren zien.

De Zwakke Schakel versterking is duidelijk terug te zien in de figuur als een plotselinge stijging in het volume in 2010. In de periode vóór deze versterking (1990-2009) fluctueerde het volume over het algemeen op alle kustlangse posities. Deze fluctuaties werden sterk beïnvloed door suppleties. Vervolgens nam het volume tussen 2009 en 2010 enorm toe door de versterking. Met name tussen raai 730 en 791 was de volumetoename erg groot. In deze zone is de erosieberm aangelegd. In de jaren na de versterking nam het volume tussen raai 461 en 751 nog steeds toe. Voor raaien 768-791 nam het volume gelijk na de versterking af. Mogelijk betekent dit dat het sediment van de erosieberm kustlangs naar het oosten is verspreid.

In de periode voorafgaand aan de Zwakke Schakel versterking vond ten westen van het traject Nieuwvliet-Groede (raai 851 en 822) een volumetoename plaats. Dit hangt samen met strandsuppleties die hier in 1994, 2001 en 2005 hebben plaatsgevonden. Vervolgens heeft ook hier in 2009 een strandsuppletie plaatsgevonden. Tussen 2009 en 2018 vond hier erosie plaats. In 2019 heeft ook hier een strandsuppletie plaatsgevonden.

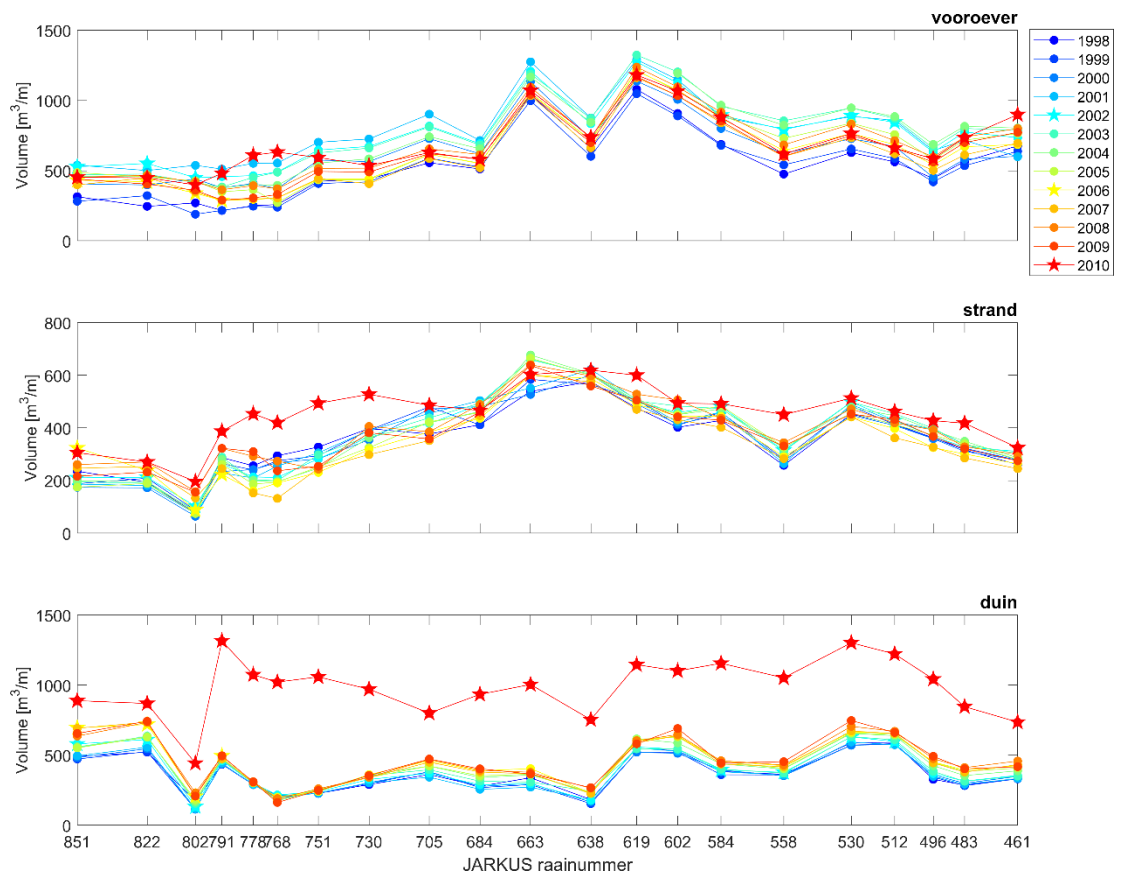


Figuur 5-13. Volume onder het JarKus profiel (zie bijv. Figuur 2-2) per raai in de voor de periode 1990-2022 langs de kust bij Nieuwvliet-Groede. De figuur bevat ook de volumetoenames door de strandsuppleties in 1994 (raai 806-918), 2001 (raai 507-570), 2005 (raai 786-936), 2014 en 2019 (raai 461-877). De jaren na deze suppleties zijn weergegeven met een ☆. Appendix A.5 laat de volumes in de periodes tussen deze suppleties in losse figuren zien.

5.3.2 Volumeveranderingen per zone onder het JarKus profiel

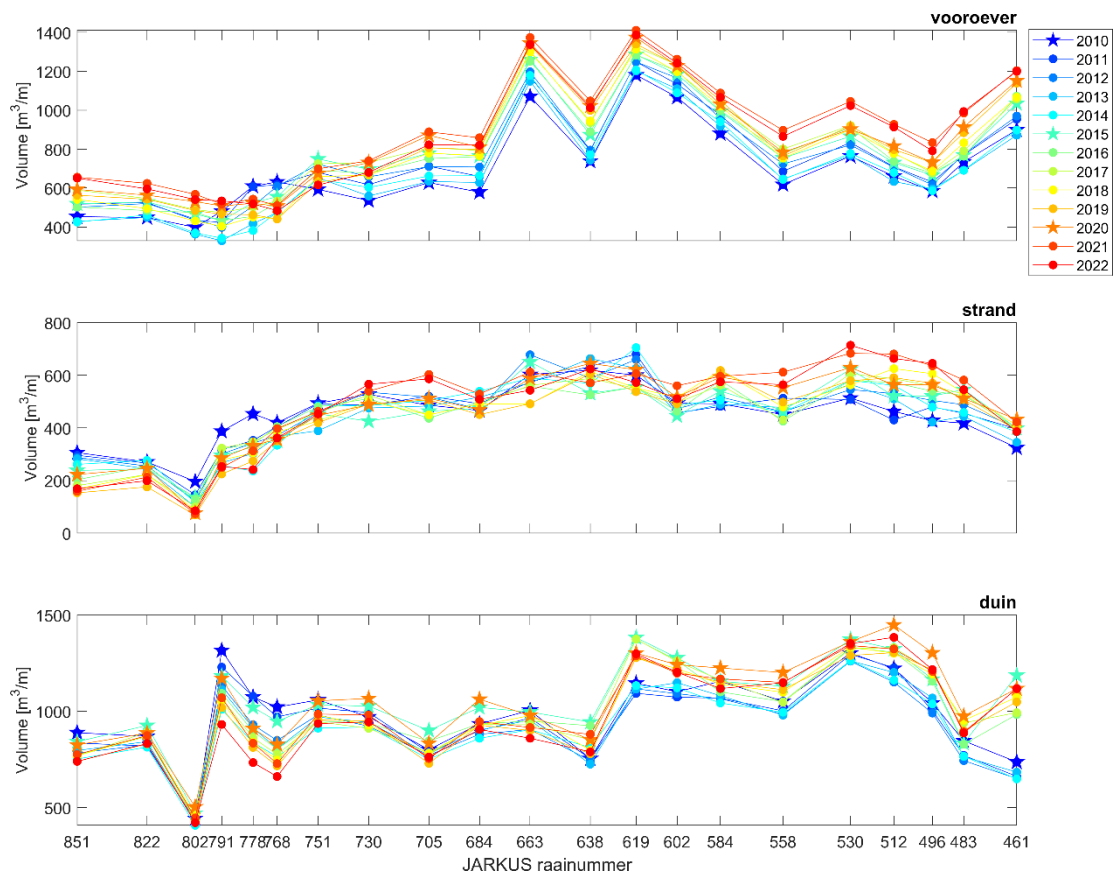
In Figuur 5-14 en Figuur 5-15 is dit volledige volume opgesplitst per zone: duin, strand en (ondiepe) vooroever voor de periode vóór en na de versterking. Figuur 5-14 laat de volumes in de 13 jaar vóór de Zwakke Schakel versterking zien en Figuur 5-15 laat de volumes in de 13 jaar ná de versterking zien.

De figuur vóór de versterking laat zien dat het volume van de vooroever op vrijwel alle locaties langs het traject Nieuwvliet-Groede in 1998 het kleinst was. Vervolgens nam het volume een aantal jaar toe om vervolgens weer af te nemen. De Zwakke Schakel versterking heeft weinig effect op het volume van de vooroever gehad, behalve bij JarKus raai 730-802 waar de erosie berm is aangelegd. Verder is het volume ten westen van raai 684 kleiner dan het volume ten oosten van raai 684. Het volume in het strand varieert in zowel de tijd als de ruimte. Tussen raai 730 en 802 is de volumetoename van het strand door de versterking het grootst. Dit hangt samen met de plaatsing van de erosie berm. Het volume in het duin nam, met uitzondering van raai 768 op alle plekken licht toe in de jaren voor de versterking. De versterking heeft voor een duidelijke toename in het duinvolume gezorgd.



Figuur 5-14. Volume per zone (zie voor de zones Figuur 2-2) in het JarKus profiel per raai in de jaren vóór de Zwakke Schakel versterking bij Nieuwvliet-Groede. De figuur bevat ook de volumetoenames door de strandsuppleties in 2001 (raai 507-570) en 2005 (raai 786-936). De jaren na deze suppleties zijn weergegeven met een ☆.

In de jaren na de versterking is het volume op de vooroever over het algemeen toegenomen. Uitzondering hierop zijn raai 768 en 778, waar het volume van de vooroever juist is afgenomen. Bij raai 768-802 is het volume van het strand direct na de suppletie afgenomen, dit was ook al te zien in de JarKus raaien. Op de andere locaties langs de kust hebben periodes van erosie en sedimentatie elkaar afgewisseld. Al met al neemt het volume van de vooroever en het strand rondom het Kruishoofd (raai 768-791) af. Ten oosten van deze locatie neemt het volume van de vooroever en het strand globaal juist toe. Mogelijk dat een deel van het zand dat bij het Kruishoofd verdwijnt naar het oosten verplaatst. Suppleties beïnvloeden het duinvolume sterk. In het centrale deel van het studiegebied is het volume over het algemeen toegenomen sinds de versterking. Bij raai 768-791 is het duinvolume sinds de versterking afgenomen. De suppletie van 2019 heeft het volume even vergroot, maar in 2022 was het duinvolume hier het kleinst sinds de versterking.

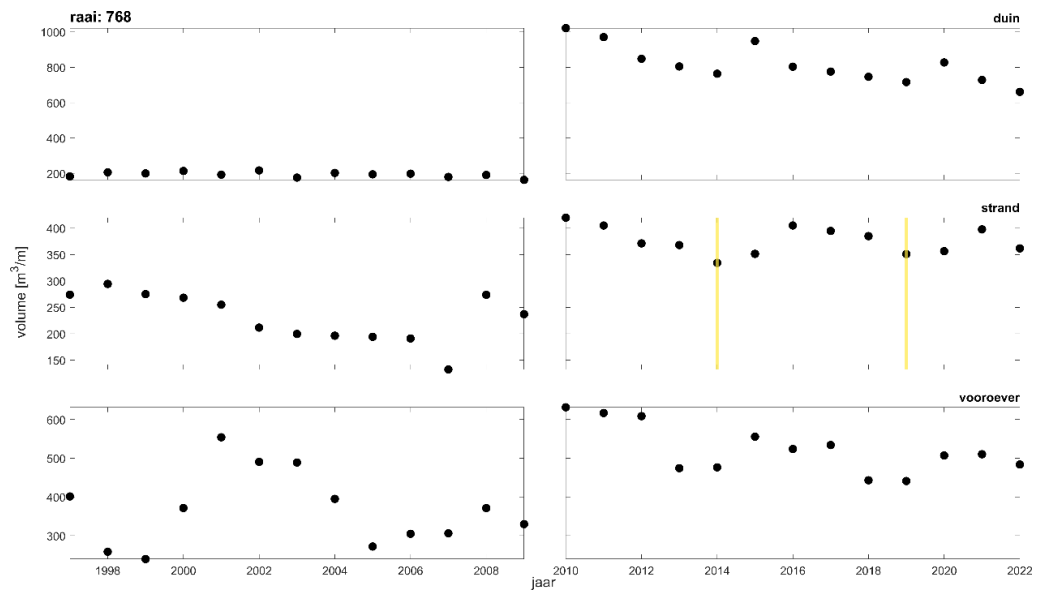


Figuur 5-15. Volume per zone in het Jarkus profiel per raai in de jaren ná de Zwakke Schakel versterking bij Nieuwvliet-Groede. De figuur bevat ook de volumetoenames door de strandsuppleties in 2014 en 2019 (raai 461-877). De jaren na deze suppleties zijn weergegeven met een ☆.

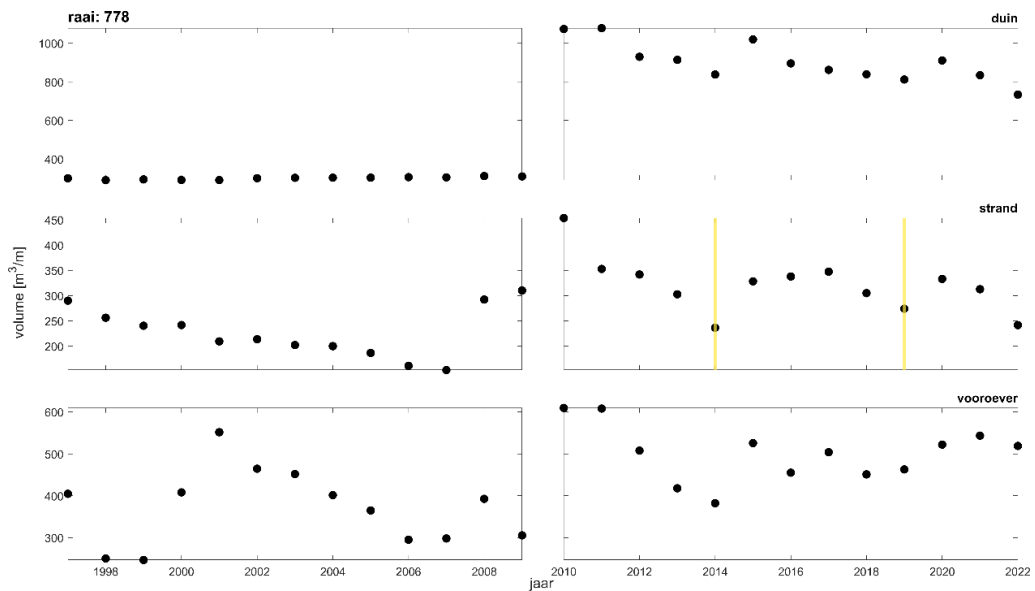
5.3.3 Volumeveranderingen bij het Kruishoofd

Figuur 5-16, Figuur 5-17 en Figuur 5-18 laten de volumeverandering per jaar in de verschillende zones zien voor raai 768, 778 en 791. Op deze locaties is het gesuppleerde zand vrijwel direct na plaatsing weer geërodeerd. De figuren laten voor alle drie de locaties zien hoe het duinvolume vóór de versterking heel constant was. Door de versterking was er een plotselinge toename in het volume (859 m³/m, 765 m³/m en 819 m³/m voor raai 768, 778 en 791), waarna er in de periodes tussen suppleties telkens een afnemende trend is waar te nemen. Tussen 2010 en 2022 is het volume van het duin afgenomen met 361, 340 en 384 m³/m voor raai 768, 778 en 791. Het strandvolume nam gelijk na de ZS versterking af tot de strandsuppletie in 2014. Tussen 2014 en 2016 nam het volume even toe, waarna het een jaar gelijk bleef en weer afnam tot de suppletie in 2019. Door de suppletie in 2019 nam het strandvolume toe, maar gelijk daarna nam het volume weer af. Het volume van het strand is tussen 2010 en 2022 afgenomen met 58, 212 en 134 m³/m voor raai 768, 778 en 791. Opvallend is dat het gemiddelde volume van het strand bij raai 791 na de Zwakke Schakel versterking (290 m³/m) weer min of meer gelijk is aan het gemiddelde volume voor de versterking (273 m³/m). Voor raai 768 was het gemiddelde volume voor de versterking 231 m³/m en na de versterking 377 m³/m. Voor raai 778 was het gemiddelde volume voor de versterking 227 m³/m en na de versterking 321 m³/m. Mogelijk komen deze verschillen door de volumetoename van het strand door de versterking. Bij raai 768 en 778 was de volumetoename van het strand respectievelijk 183 m³/m en 143 m³/m, terwijl de volumetoename bij raai 791 slechts 65 m³/m was.

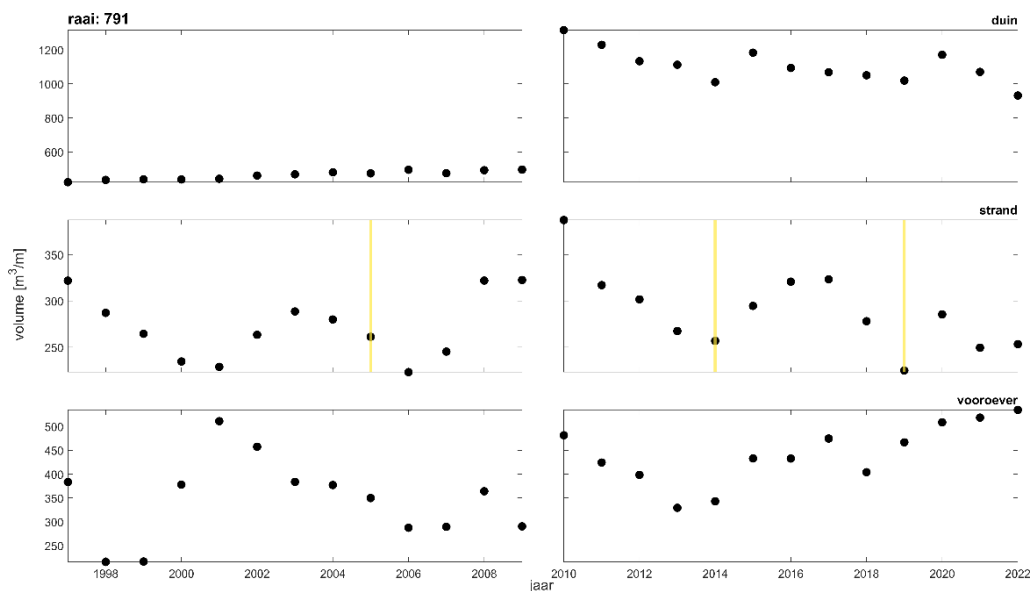
Het lijkt er dus op dat bij raai 768-791, sinds de Zwakke Schakel versterking, structureel erosie van het duin en strand plaatsvindt. Op de vooroever van raai 768 en 778 zijn minder sterke trends waar te nemen, maar is het volume wel met respectievelijk 148 en 91 m³/m afgenomen tussen 2010 en 2022. De vooroever van raai 791, daarentegen, nam tussen 2010 en 2014 in volume af, maar sinds de suppletie van 2014 neemt de vooroever in volume toe. Al met al is de vooroever hier tussen 2010 en 2022 met 53 m³/m in volume toegenomen. De volumeafnames van het duin en strand leiden niet een op een tot volumetoenames van de vooroever. Het is dus waarschijnlijk dat het zand van het duin en strand uit het profiel verdwijnt. Dit gebeurt waarschijnlijk tijdens hoge golfcondities. De zeewaartse retourstroming zal het zand dan van het strand (en duin) naar diepe water transporteren, waar het tijdens rustige condities moeilijk terug naar het land kan komen. Het zal daar, waarschijnlijk, kustlangs met de dominante getijstrooming naar het westen en vooral het oosten worden getransporteerd. Dit is lastig meetbaar omdat de volumes worden uitgesmeerd over een groot bodemoppervlak waardoor de bodemveranderingen klein zijn.



Figuur 5-16. Volumes opgedeeld per zone per jaar voor raai 768. De linker kolom geeft de 13 jaar vóór de Zwakke Schakel versterking weer en de rechterkolom de 13 jaar na de versterking. De verticale gele lijn representeert een strandsuppletie.



Figuur 5-17. Volumes opgedeeld per zone per jaar voor raai 778. De linker kolom geeft de 13 jaar vóór de Zwakke Schakel versterking weer en de rechterkolom de 13 jaar na de versterking. De verticale gele lijn representeert een strandsuppletie.

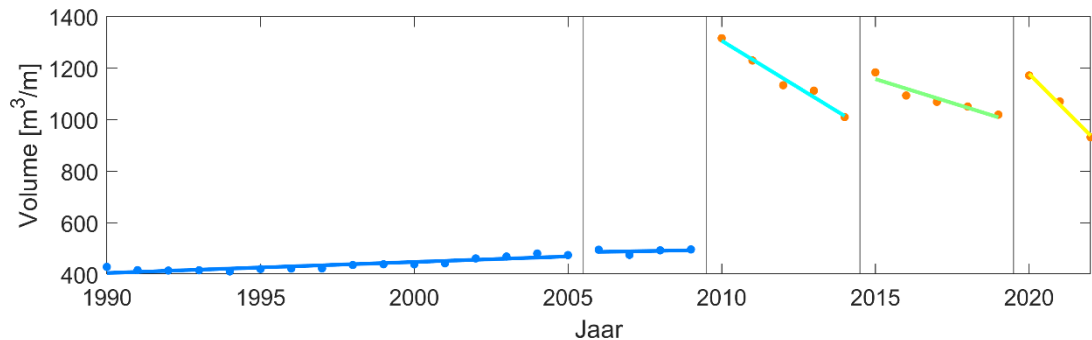


Figuur 5-18. Volumes opgedeeld per zone per jaar voor raai 791. De linker kolom geeft de 13 jaar vóór de Zwakke Schakel versterking weer en de rechterkolom de 13 jaar na de versterking. De verticale gele lijn representeert een strandsuppletie.

5.3.4 Trends in volumeverandering

De gemiddelde trends in volumeverandering tussen suppletieperioden vóór (1990-2009) en ná de Zwakke Schakel versterking (2009-2022) per raai per zone zijn geplot in Figuur 5-20. Figuur 5-19 geeft voor raai 791 een voorbeeld van hoe deze gemiddelde trends (voor het duin) tot strand zijn gekomen. Hiertoe zijn eerst trendlijnen getrokken door de volumes in de periodes tussen suppleties. Vervolgens is het gemiddelde genomen van de trends vóór de Zwakke Schakel versterking (1990-2009) en het gemiddelde van de trends ná de Zwakke Schakel versterking (2010-2022). Voor de periode 1990-2009 verschillen de individuele trendperiodes. Voor raai 461-496 en 584-778 is één trend bepaald tussen 1990 en 2009. Voor raai 512-558 zijn twee trends bepaald (1990-2001 en 2002-2009) omdat hier in 2001 een strandsuppletie heeft plaatsgevonden. Voor raai 791 zijn ook twee trends bepaald (1990-

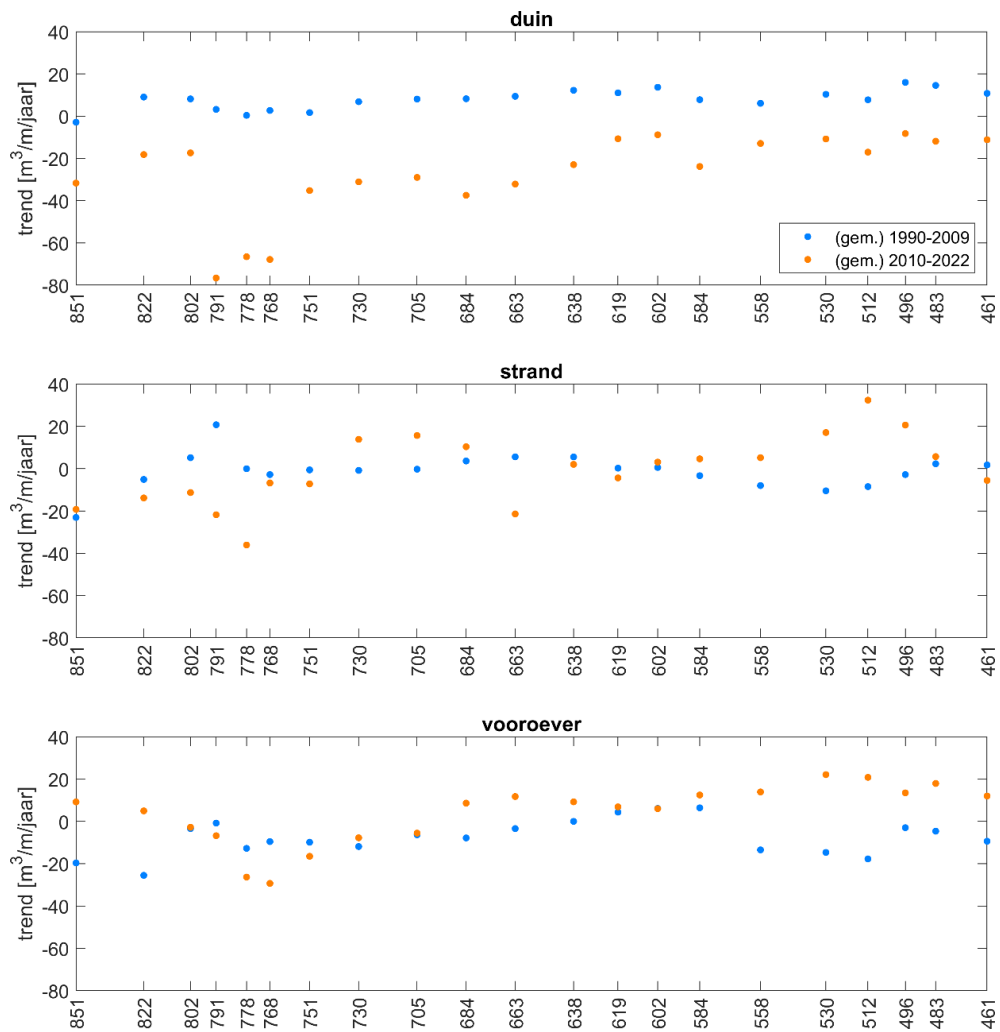
2005 en 2006-2009) omdat hier in 2005 een strandsuppletie heeft plaatsgevonden. Voor raai 802 zijn drie trends bepaald (1990-2001, 2002-2005 en 2005-2006) omdat hier in 2001 en 2005 strandsuppleties hebben plaatsgevonden. Voor raai 822 en 851 zijn vier trends bepaald (1990-1994, 1995-2001, 2002-2005 en 2006-2009) omdat hier in 1994, 2001 en 2005 strandsuppleties hebben plaatsgevonden. Na de Zwakke Schakel versterking hebben bij alle raaien in 2014 en 2019 strandsuppleties plaatsgevonden. De trends zijn bepaald voor de periodes 2010-2014, 2015-2019 en 2020-2022. Appendix A.6 laat deze trends zien. Figuur 5-20 geeft vervolgens per raai de gemiddelde trend in de periode 1990-2009 en de gemiddelde trend in de periode 2010-2022 weer. Figuur 5-21 geeft het gemiddelde van deze gemiddelde trends tussen raai 461 en 851 weer.



Figuur 5-19. Overzicht van trendlijnen tussen de suppletieperiodes voor de duinvolumes van raai 791.

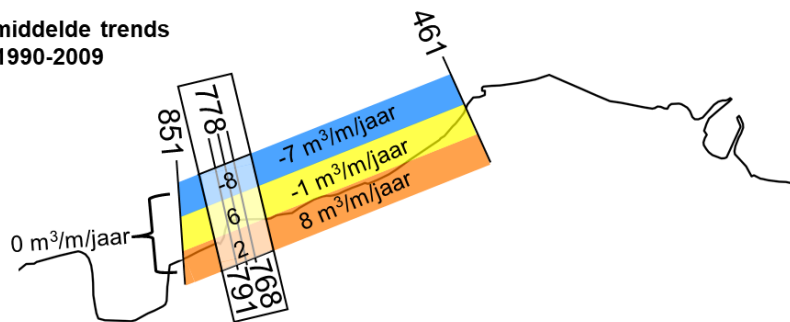
Voor de versterking (1990-2009) was er noch een toename, noch een afname in het volume onder het gehele profiel. Binnen een profiel waren er echter grote verschillen, waarbij het duin gemiddeld in volume toenam en de vooroever in volume afnam. Voor de versterking was er nauwelijks een volumeverandering van het duin waar te nemen (gemiddelde, aanzandende, trend van +8 m³/m/jaar). Na de Zwakke Schakel versterking was er overal langs de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede een afname in duinvolume van gemiddeld -28 m³/m/jaar, met de sterkste afname (-70 m³/m/jaar) bij het Kruishoofd (raaien 768-791). De verandering van de trend in strandvolumes voor en na de versterking wisselt per kustlangse positie. Gemiddeld was er zowel voor als na de versterking een erosieve trend (-1 m³/m/jaar). Bij het Kruishoofd was de trend na de versterking voor alle drie de raaien sterk erosief (gemiddeld -22 m³/m/jaar) vergeleken met de aanzandende trend voor de versterking (gemiddeld +6 m³/m/jaar). De trend in vooroever zandvolumes bij het Kruishoofd was en bleef negatief, ongeacht de uitgevoerde versterking. Na de versterking was de trend wel sterker negatief (gemiddeld -21 m³/m/jaar) dan voor de versterking (gemiddeld -8 m³/m/jaar).

Opvallend is dat de trend in zandvolumes van het strand en de vooroever ten oosten van het Kruishoofd (vanaf raai 730) na de Zwakke Schakel versterking minder erosief of zelfs aanzandend is, terwijl de trend bij het Kruishoofd na de versterking juist sterk erosief is. Mogelijk dat er ten oosten van het Kruishoofd dus aanvoer is vanuit het westen, zoals ook gesuggereerd door Lenselink (2012). Een andere verklaring kan zijn dat er in het oosten minder zand uit het gebied verdwijnt.

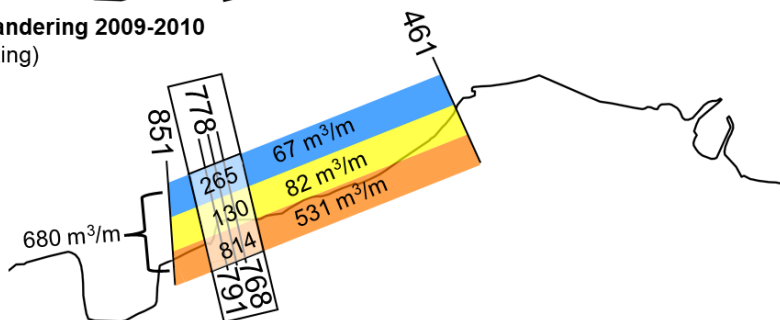


Figuur 5-20. Gemiddelde trend in volumeverandering tussen suppletieperioden vóór en ná de Zwakke Schakel versterking in 2009 voor de zones duin, strand en voeroever. Een negatieve trend betekent een zandverlies.

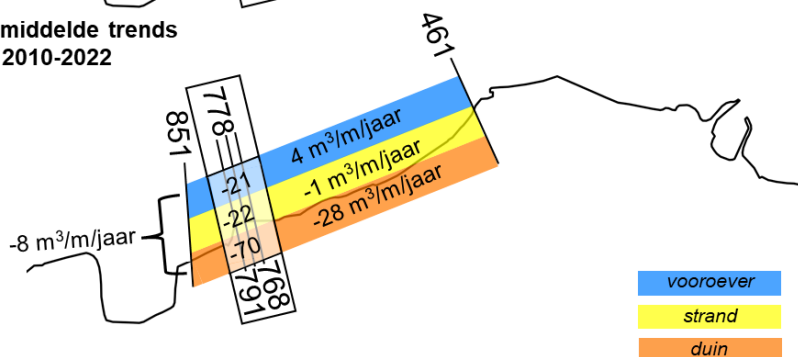
Gemiddelde van de gemiddelde trends in volumeverandering 1990-2009



Gemiddelde volumeverandering 2009-2010 (Zwakke Schakel versterking)



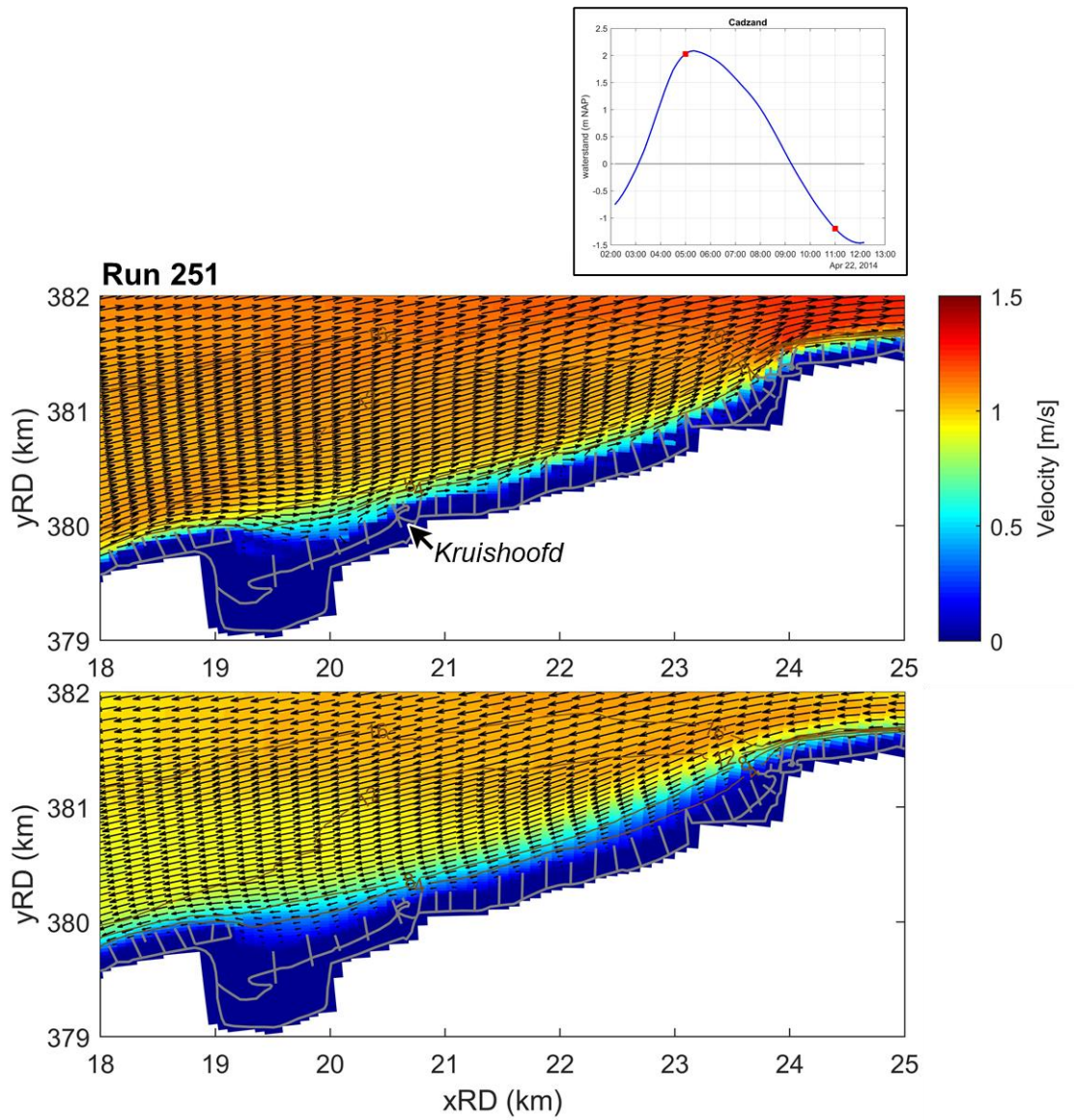
Gemiddelde van de gemiddelde trends in volumeverandering 2010-2022



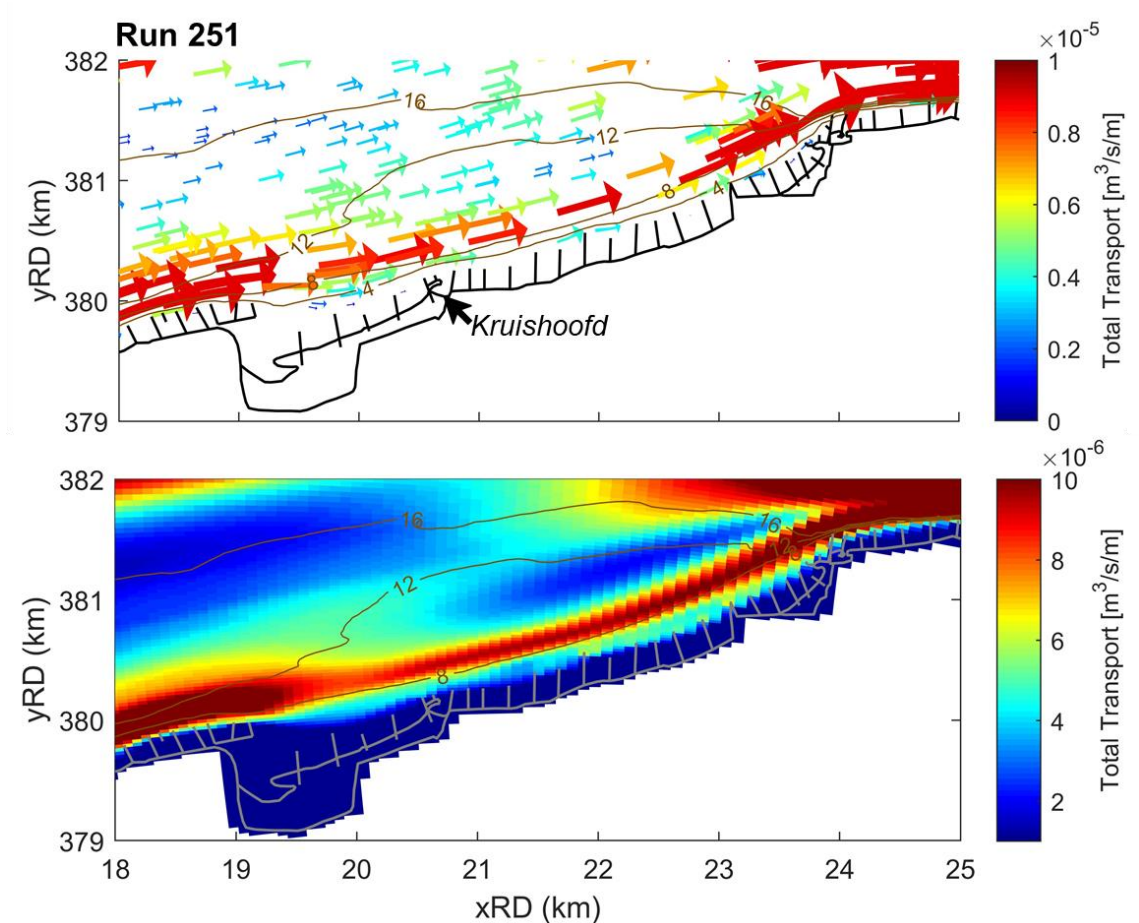
Figuur 5-21. Overzicht van het gemiddelde van de representatieve trends in volumeverandering tussen suppletieperioden van de vooroever, het strand en het duin vóór de Zwakke Schakel versterking (boven) en na de Zwakke Schakel versterking (onder) en de gemiddelde volumeverandering per zone door de versterking (midden). De gemiddelde waarden voor de raaien rondom het Kruishoofd (768-791) zijn ook weergegeven. Figuur 5-20 laat de trends per raai zien.

5.4 Waterbeweging en netto zandtransporten

Bestaande berekeningen met het Delft3D VlaBa model zijn gebruikt om de waterbeweging en het zandtransport in de Westerscheldemonding en bij de kust van Zeeuws-Vlaanderen te bestuderen (zie ook paragraaf 4.3.2). In Figuur 5-22 zijn de resultaten van de berekeningen te zien voor piek-vloed snelheden en piek-eb snelheden. Het berekende lokale stroombeeld laat geen (sterke) contractie van de stroming zien bij Kruishoofd (xRD ~ 21 km). De modelresolutie is met 30 m (kustdwars) x 90 m nabij de kust mogelijk onvoldoende hiervoor. De stromingen voor de periode 1986-1996 (niet getoond) zijn vergelijkbaar. De kustnabije stroming is wel wat toegenomen in de tijd door het opschuiven de diepte-contouren (met name zichtbaar voor 8 m contour). Dit zorgt ook voor grotere zandtransporten bij de kust. Na de verwijding en relatief lage zandtransporten bij de Verdrongen Zwarte Polder nemen de transporten toe in oostelijke richting (Figuur 5-23).



Figuur 5-22. Piek vloed- (bovenste panelen) en ebsnelheden (onderste panelen) berekend met het VlaBa Delft3D model. De stromingsvectoren worden elke twee rekenpunten getoond om de leesbaarheid te bevorderen. De witte cirkel geeft de locatie van het Kruishoofd weer.



Figuur 5-23. Netto zandtransporten berekend met het VlaBa Delft3D model. In het bovenste figuur geeft zowel de kleur als de lengte van de pijlen de grootte van de zandtransporten weer en wordt een gedeelte van het berekende vectorveld geplot om de leesbaarheid te bevorderen.

5.5 Samenvatting kleinschalige morfologische ontwikkeling

De belangrijkste kleinschalige morfologische ontwikkeling van de kust bij Nieuwvliet-Groede is de zeewaartse uitbouw door de Zwakke Schakel versterking die er, in combinatie met de nabijheid van de Wielingen, voor heeft gezorgd dat het profiel steiler is geworden. Deze ontwikkeling heeft ervoor gezorgd dat de kustzone smaller is geworden: De duinenrij gaat vrijwel gelijk over in de vooroever. Modelberekeningen laten zien dat het sedimenttransport bij de Verdrongen Zwarte Polder relatief laag is door verwijding van de stroomlijnen, maar bij het Kruishoofd zijn de transporten weer toegenomen. Daarbij is de kustnabije stroming ook in de tijd toegenomen door het opschuiven van de dieptecontouren. Dit heeft ervoor gezorgd dat er bij het Kruishoofd aanzienlijke erosie heeft plaatsgevonden. Doordat het profiel zo smal is, resulteert erosie vrijwel direct in een landwaartse verplaatsing van de MKL. Herhaaldelijk suppleren heeft de erosieve trend (nog) niet laten stoppen.

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

Hieronder worden de conclusies van deze studie gepresenteerd, aan de hand van de verschillende onderzoeksvragen.

Welke ingrepen hebben aan de kust plaatsgevonden (i.h.b. de Zwakke Schakel versterkingen)?

De Zeeuws-Vlaamse kust is mede gevormd door menselijk ingrijpen, waaronder bijvoorbeeld de inpolderingen vanaf de 11e eeuw. In de tweede helft van de 19e eeuw werden langs de gehele kust palenrijen aangelegd om de kusterosie te remmen. Ondanks deze intensieve kustverdediging, treedt lokaal aanzienlijke erosie op. Sinds 1990 wordt er periodiek gesuppleerd om verdere kustachteruitgang te voorkomen in het kader van het kustbeleid van dynamisch handhaven.

Ondanks deze zandsuppleties bleek uit de toetsing in 2005 dat vijf locaties langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen niet meer aan de veiligheidsnorm voldeden en dus versterkt moesten worden, de zogenoemde Zwakke Schakels: De versterking bij Breskens betrof het versterken van de dijk en het verplaatsen van een strand. Bij Nieuwesluis is een nieuw duin aangelegd, waarvan grond is gebruikt dat afkomstig is van het aangelegd natuur- en recreatiegebied Waterdunen. Tussen Nieuwvliet-Bad en Groede is een strand-duin suppletie uitgevoerd waardoor de kustlijn ongeveer 50 m zeewaarts is opgeschoven. Daarnaast is hier een erosie berm van ca. ca. 180.000 m³ zand bij wijze van een pilot aangelegd om de kust op een natuurlijke wijze te voeden. Bij de Herdijkte Zwarte Polder is de kust verbreed en is er een nieuw duin aangelegd met zand uit de Verdronken Zwarte Polder. Om te voorkomen dat dit aangebrachte zand in de Zwarte Polder verdwijnt is er een strekdam aangelegd. Bij Cadzand-Bad is een nieuwe maritieme haven aangelegd, zijn de strekdammen verlengd en versterkt en is aan weerszijde een nieuw duin aangelegd.

Hoe hebben deze ingrepen de morfologische ontwikkeling beïnvloed?

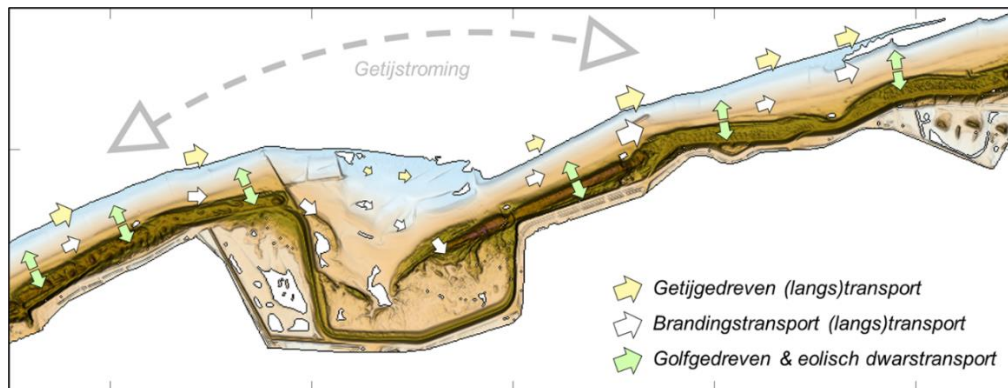
Er is in deze studie gekeken naar de morfologische ontwikkeling van de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede. Hier ligt de geul Wielingen vlak voor de kust. Langetermijntoontwikkelingen laten zien dat de Wielingen sinds de 17^e eeuw dicht bij de kust is gekomen. Sinds de jaren 1960 is de Wielingen verder verdiept en verruimd door menselijke ingrepen. Zo volgt bijvoorbeeld uit de sedimentvolumes onder de JarKus profielen (raai 461-851) dat er tussen 1990 en 2009 gemiddeld een erosieve trend was van de vooroever (zeewaarts van het paalhoofd). In dezelfde periode was de totale zandvolume stabiel. Na de Zwakke Schakel versterking was er een omslag naar een erosieve trend (gemiddeld -8 m³/m/jaar). Deze erosieve trend voor het deelgebied als geheel was het sterkst voor het duin (-28 m³/m/jaar). Bij het Kruishoofd (raai 768-791) vond er na de versterking in alle drie de zones (duin, strand en vooroever) sterke erosie plaats: gemiddeld -70, -22 en -21 m³/m/jaar voor het duin, het strand en de vooroever. Uit de data volgt dat er sinds de versterking bij het Kruishoofd duidelijk sprake is van een andere trend dan elders langs de kuststrook tussen Nieuwvliet-Bad en Groede.

Wat zijn de onderliggende processen (o.a. getij vs golven) en hoe beïnvloeden processen op de grote schaal (Scheldemonding) de processen op kleine schaal (strand Nieuwvliet-Groede) en vice versa?

Figuur 6-1 geeft de dominante zandtransportprocessen op een schematische manier weer. Getijstromingen spelen een dominante rol in de zandverliezen langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen. De golven zijn klein, doordat de Vlakte van de Raan voor een efficiënte

golfafscherming zorgt waardoor de hogere golven vanuit de Noordzee de kust niet bereiken. Hierdoor is getij het dominante mechanisme in termen van energie. Ondanks dat de golven klein zijn, leiden ze (met name tijdens stormen) tot golfbreking en opwoeling van sediment in de brandingszone.

Langs een ongestoorde kustlijn (Hollandse kust) verplaatst dit opgewoelde zand naar het diepere deel van het profiel waar het tijdelijk wordt gebufferd. Tijdens kalme periodes wordt het zand vervolgens vanuit de diepere vooroever terug richting het strand getransporteerd. Hierdoor treden er gemiddeld geen grote verliezen op. Langs de kust van Zeeuws-Vlaanderen kan dit mechanisme niet plaatsvinden. Het zand verplaatst vanaf de smalle strandzone naar de diepere vooroever, maar daar blijft het niet liggen. De getijstroming is hier namelijk sterk door de in- en uitstroming van het Westerschelde estuarium. De getijstroming zorgt ervoor dat het door golven opgewoelde sediment efficiënt kustlangs weggevoerd kan worden. Elias et al. (2020) beschrijft hoe hetzelfde mechanisme ook voor de zuidwestkust van Walcheren voor zandverliezen zorgt.

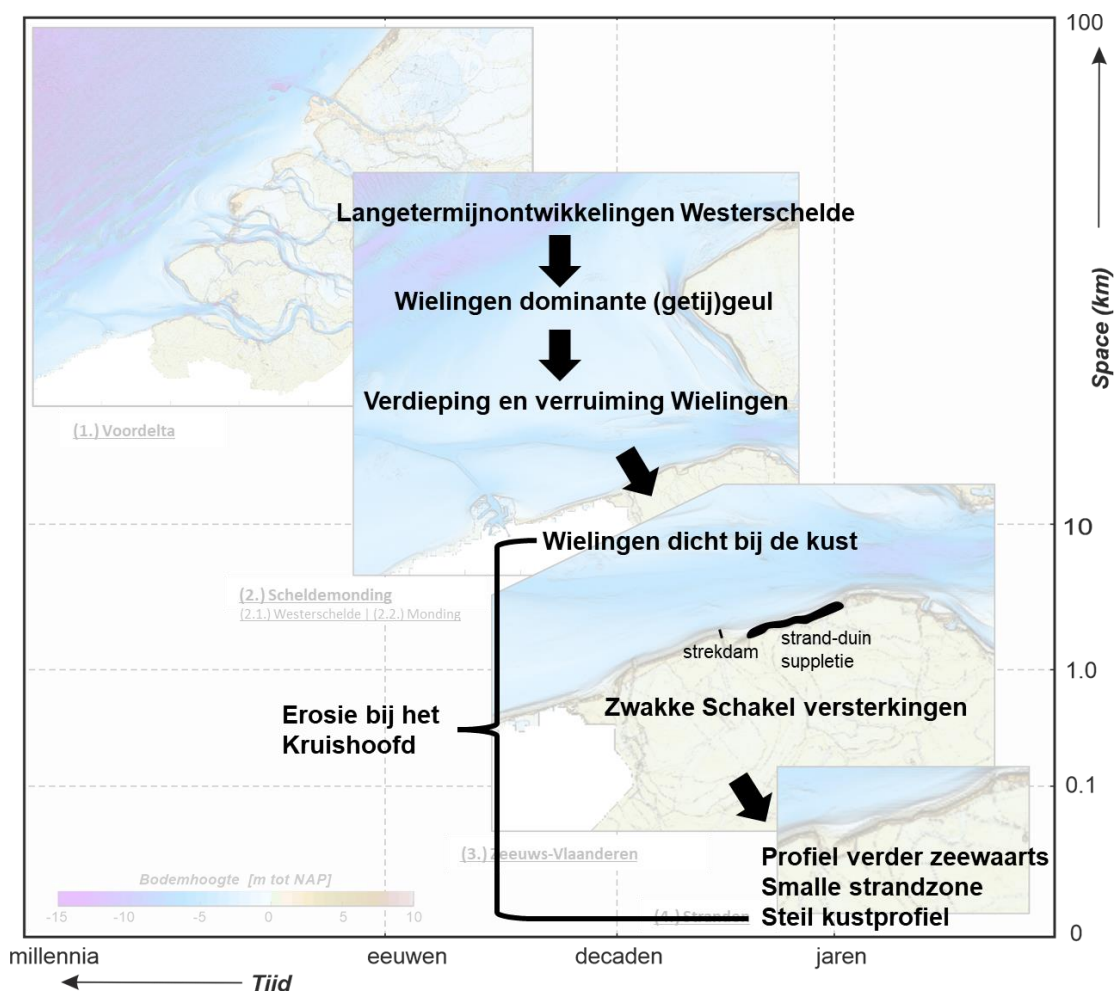


Figuur 6-1. Een conceptuele weergave van de grootschalige processen die spelen. (gebaseerd op: Elias & Quataert, in voorbereiding). Het langstransport is gebaseerd op modelsummen, het dwarstransport op expert judgement.

Figuur 6-2 laat de relevante interacties tussen de verschillende schalen van de schaalcascade zien. De ontwikkelingen op schaal van de Westerschelde (schaal 2.1) hebben ervoor gezorgd dat de vloeddominante getijgeul Wielingen in de monding (schaal 2.2) een dominante geul is geworden. Vanaf de jaren 1960 hebben baggerwerkzaamheden voor verdere verruiming gezorgd. In het westen ligt de Wielingen nog enkele kilometers uit de kust van Zeeuws-Vlaanderen, maar vanaf de Verdronken Zwarte Polder ligt de Wielingen dicht bij de kust. De Wielingen oefent directe invloed uit op de kust van Zeeuws-Vlaanderen (schaal 3). Er zijn relatief grote, getijgedreven zandtransporten langs de Zeeuws-Vlaamse kust, met name bij waterdieptes tussen de 4 en 12 m.

Door de Zwakke Schakel versterking tussen Nieuwvliet-Bad en Groede is de kust zeewaarts uitgebouwd (schaal 4). De zeewering ligt bij het Kruishoofd verder zeewaarts dan elders langs de kust tussen Nieuwvliet-Bad en Groede. Doordat de duinenrij hier vrijwel direct over gaat in de diepe vooroever, is het profiel relatief steil en ligt de Wielingen relatief dichtbij. De contourlijnen op basis van Vaklodingen data en de JarKus profielen laten zien dat de zeewaartse uitbouw van de duinenrij door de Zwakke Schakel versterking dit probleem hier groter heeft gemaakt. De combinatie van de zeewaartse verplaatsing en versteiling van het kustprofiel en de nabije ligging van de Wielingen die een grote transportcapaciteit heeft, heeft er waarschijnlijk voor gezorgd dat gesuppleerd zand dat uit het profiel verdwijnt gemakkelijk door de Wielingen kan worden weggevoerd. Het berekende netto zandtransport voor Zeeuws-Vlaanderen heeft een oostwaartse richting. Dit komt zowel door de getijsymmetrie als de golfgedreven stroming. Daarnaast is er waarschijnlijk een beperkte zandaanvoer vanuit het

westen. Dit komt enerzijds door een verwijding van de stroomlijnen, wat resulteert in relatief lage zandtransporten, waardoor zand wordt ingevangen in de Verdrongen Zwarte Polder. Anderzijds blokkeert de aangelegde strekdam ten westen van de Verdrongen Zwarte Polder mogelijk de zandtoevoer vanuit het westen. Al met al, betekent dit dat er wel sterke (golfgedreven) erosie van het strand optreedt maar dat er geen of weinig herstel is door het gebrek aan bufferruimte en zandtoevoer vanuit het westen. Hierdoor is de MKL hier eigenlijk niet zeewaarts van de BKL te handhaven. Dit zand kan dan alleen door frequent suppleren worden aangevuld. Deze processen vertonen overeenkomsten met de Vlaamse kust ten oosten van Zeebrugge. Hier is ook sprake van een steile vooroever, waardoor het geërodeerde sediment door de nabijgelegen getijgeul (Appelzak) kustlangs kan worden afgevoerd.



Figuur 6-2. Overzicht van de relevante schaalinteracties voor de kust van Nieuwvliet-Groede.

6.2 Aanbevelingen

De hypothesen genoemd in deze studie zouden middels een modelstudie nader moeten worden onderzocht. Hierbij is het van belang een model te gebruiken met een hoge resolutie nabij de kust. Daarnaast dient kustdwars transport goed te worden meegenomen in de berekeningen. Zo kan het effect van de Zwakke Schakel versterkingen ontrafeld worden. Vervolgens kunnen verschillende scenario's worden onderzocht: bijvoorbeeld de specifieke invloed van het restant van de voormalige 17^e-eeuwse zeedijk bij het Kruishoofd. Daarnaast is het waardevol om bij toekomstige suppleties frequenter te monitoren, omdat het gesuppleerde zand snel verdwijnt. Een hogere frequentie aan metingen kan meer inzicht geven in waarom het zand zo snel verdwijnt, en waar het naartoe wordt getransporteerd. Met die kennis kan het kustonderhoud vervolgens efficiënter worden vormgegeven.

7 Referenties

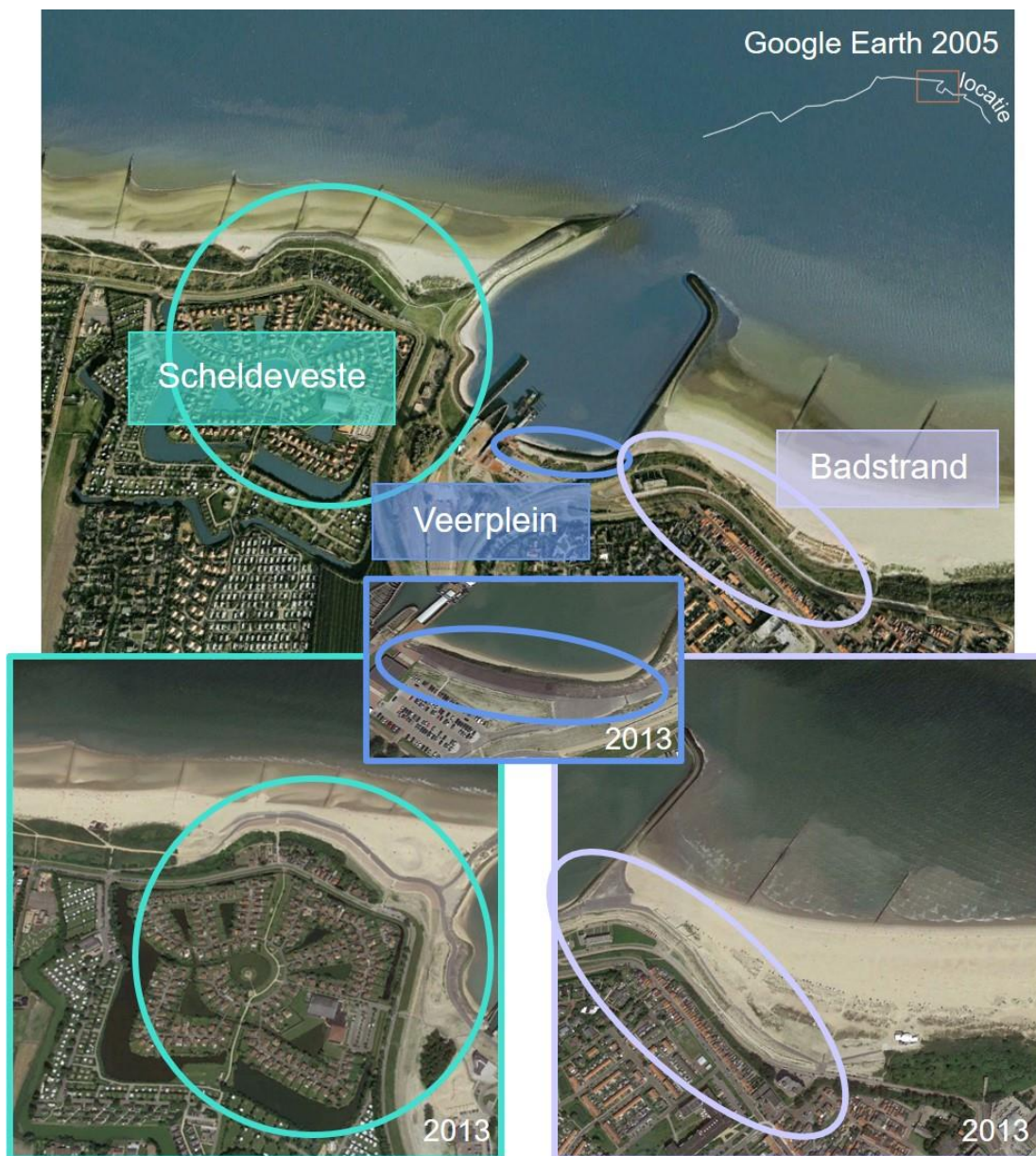
- Beyaard, L. (2022). Effect of basin size reduction on morphodynamic interaction between estuary and mouth. A historical case study of the Western Scheldt. Bachelor's Thesis.
- Brand, E., Van Oyen, T., & Nnafie, A. (2016). The driving mechanisms behind morphological changes in the Western Scheldt mouth area over the past two centuries: a data analysis. Stageverslag Universiteit Utrecht en Flanders Hydraulic Research.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niederoda, A.W., de Vriend, H.J., Swift, D.J.P., Kaminsky, G.M., Capobianco, M. (2003a). The coastal-tract (part 1): a conceptual approach to aggregated modelling of low-order coastal change. *Journal of Coastal Research*, 19(4): 812 – 827.
- Cowell, P.J., Stive, M.J.F., Niederoda, A.W., Swift, D.J.P., de Vriend, H.J., Buijsman, M.C., Nicholls, R.J., Roy, P.S., Kaminsky, G.M., Cleveringa, J., Reed, C.W., de Boer, P.L. (2003b). The coastal-tract (part 2): Applications of aggregated modelling of lower-order coastal change. *Journal of Coastal Research*, 19(4): 828 – 848.
- De Maerschalck, B., van der Werf, J., Kolokythas, G., Quataert, E., Van Oyen, T., Vroom, J., & Vanlede, J. (2017). Modelling Belgische Kustzone en Scheldemonding.
- Dujardin, A. Röbbke, B.R., Van der Werf, J. (2022). Morphological interaction between the nearshore seabed and the coastline of the Flemish coast (MOZES-project): Preliminary results regarding project task 3 "Hypothesis natural nourishment via shoreface connected sand ridges" and project task 4 "Effects of gradual deepening of nearshore channels on nourishment volumes". Versie 0.1. WL Memo's, 20_079_3. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen (in voorbereiding).
- Elias, E. (2021). Morfologie van het Zeegat van het Vlie. Een overzicht van de morfologische ontwikkelingen over de periode 1831-2020. Rapport 11206794-004-ZKS-0003, Deltares.
- Elias, E. & Oost, A. (2021). Morfologische processen van het Friesche Zeegat. Rapport 11205236-003-ZKS-0005, Deltares.
- Elias, E., Pearson, S. & Van Weerdenburg, R. (2020). Evaluatie systeemsuppletie Bankje van Zoutelande. Deltares rapport: 11205236-003-ZKS-0002. 92 pp.
- Elias, E. & Quataert, E. (2022) Verkenning probleemlocaties. Morfologische karakterisering en verwachte suppletie-inspanning komende 50 jaar voor vier probleemlocaties. Deltares rapport 11208035-004-ZKS-0003. in voorbereiding.
- Elias, E., & Van der Spek, A. (2015). Uitwerking sedimentbudget van de Westerscheldemonding. Deltares rapport 1210301-012.
- Elias, E., Van der Spek, A., & Lazar, M. (2016). The 'Voordelta', the contiguous ebb-tidal deltas in the SW Netherlands: large-scale morphological changes and sediment budget 1965-2013; impacts of large-scale engineering. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, 1-27. doi:10.1017/njg.2016.37.

- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology* 415.
- Kuijper, K., Nederhoff, K. Vergouwen, S. (2015). Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen. Deltares rapport 1220040-002.
- Lenselink, R.J. (2012). Memo Evaluatie Erosieberm Kruishoofd, Zeeuwsch-Vlaanderen.
- Mastbergen, D. & Quataert, E. (2020). Beheerbibliotheek Zeeuws-Vlaanderen. Beschrijvingen van het kustvak ter ondersteuning van het beheer en onderhoud van de kust. Rapport 11203683-000-ZKS-0008, Deltares.
- Maljaars, R. (2008). Zandmotor Zeeuwsch-Vlaanderen.
- Nnafie, A., De Swart, H. E., De Maerschalck, B., Van Oyen, T., Van der Vegt, M., & van der Wegen, M. (2019). Closure of secondary basins causes channel deepening in estuaries with moderate to high friction. *Geophysical Research Letters*, 46(22), 13209-13216.
- Nnafie, A., Van Oyen, T., De Maerschalck, B., Van der Vegt, M., & Wegen, M. V. D. (2018). Estuarine channel evolution in response to closure of secondary basins: An observational and morphodynamic modeling study of the Western Scheldt Estuary. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 123(1), 167-186.
- Provincie Zeeland (2020). Cultuur Historische Monumenten. url: <https://intagsp.zeeland.nl/Data/chs/rapporten/GEOOBJ/2814.pdf>
- Van der Spek, A. J. F. (1997). Tidal asymmetry and long-term evolution of Holocene tidal basins in The Netherlands: simulation of palaeo-tides in the Schelde estuary. *Marine geology*, 141(1-4), 71-90.
- Verhagen, H. J. en van Rossum, H. (1990). Strandhoofden en paalrijen: evaluatie van hun werking. Min V&W, Rijkswaterstaat, Dienst Weg- en Waterbouwkunde.
- Waterschap Zeeuws-Vlaanderen (2010). Folder Herdijkte Zwarte Polder (2010). <https://scheldestromen.nl/sites/scheldestromen.nl/files/Folder%20Herdijkte%20Zwarte%20Polder.pdf>
- Waterschap Zeeuws-Vlaanderen (n.d.). Zwakke Schakel West Zeeuws-Vlaanderen. https://discomap.eea.europa.eu/map/Data/Milieu/OURCOAST_123_NL/OURCOAST_123_NL_Doc6_ZeeuwsVlaanderen.pdf

A Appendix

A.1 Satellietbeelden Zwakke Schakel versterkingen

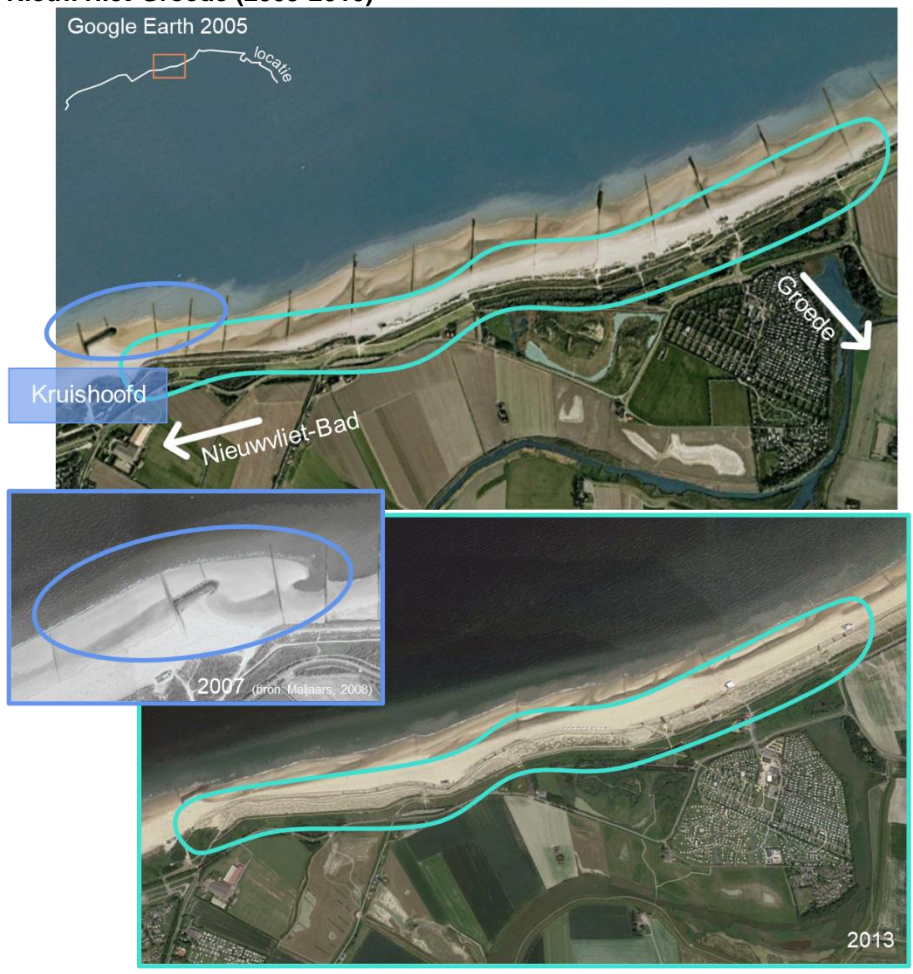
A.1.1 Breskens (2011-2012)



A.1.2 Nieuwesluis (2013-2016)



A.1.3 Nieuwvliet-Groede (2009-2010)



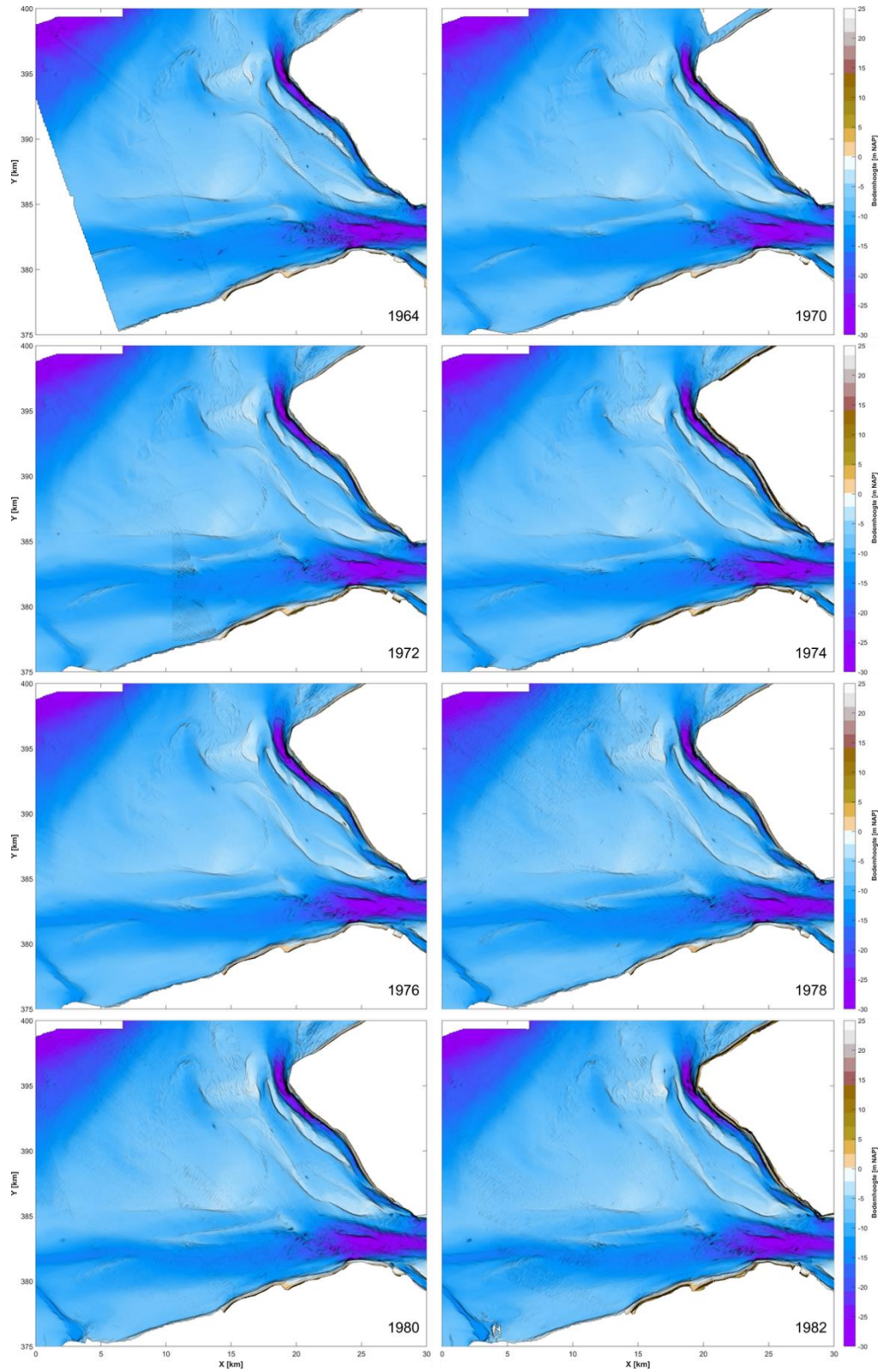
A.1.4 Herdijkte Zwarte Polder (2010-2011)

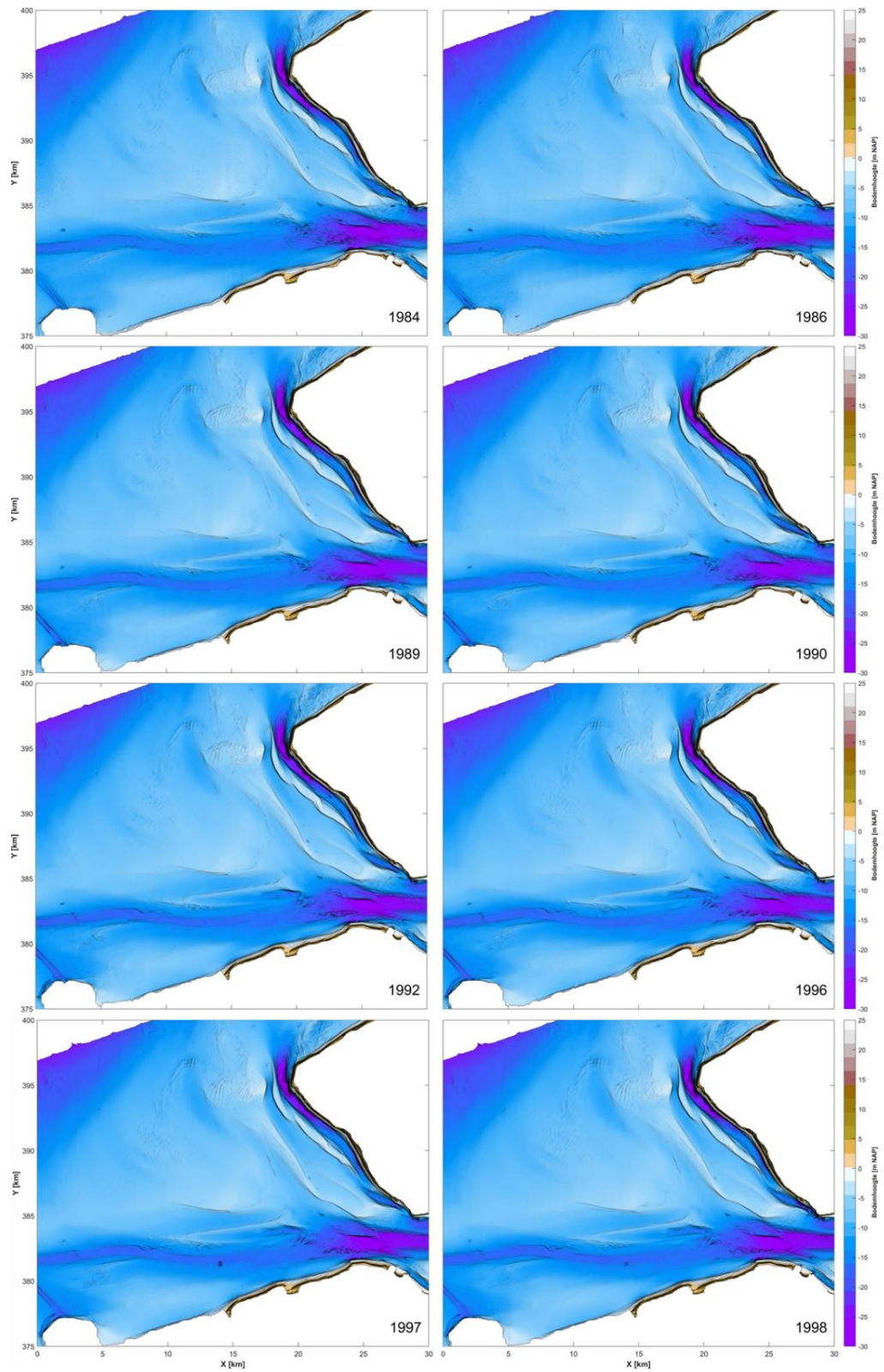


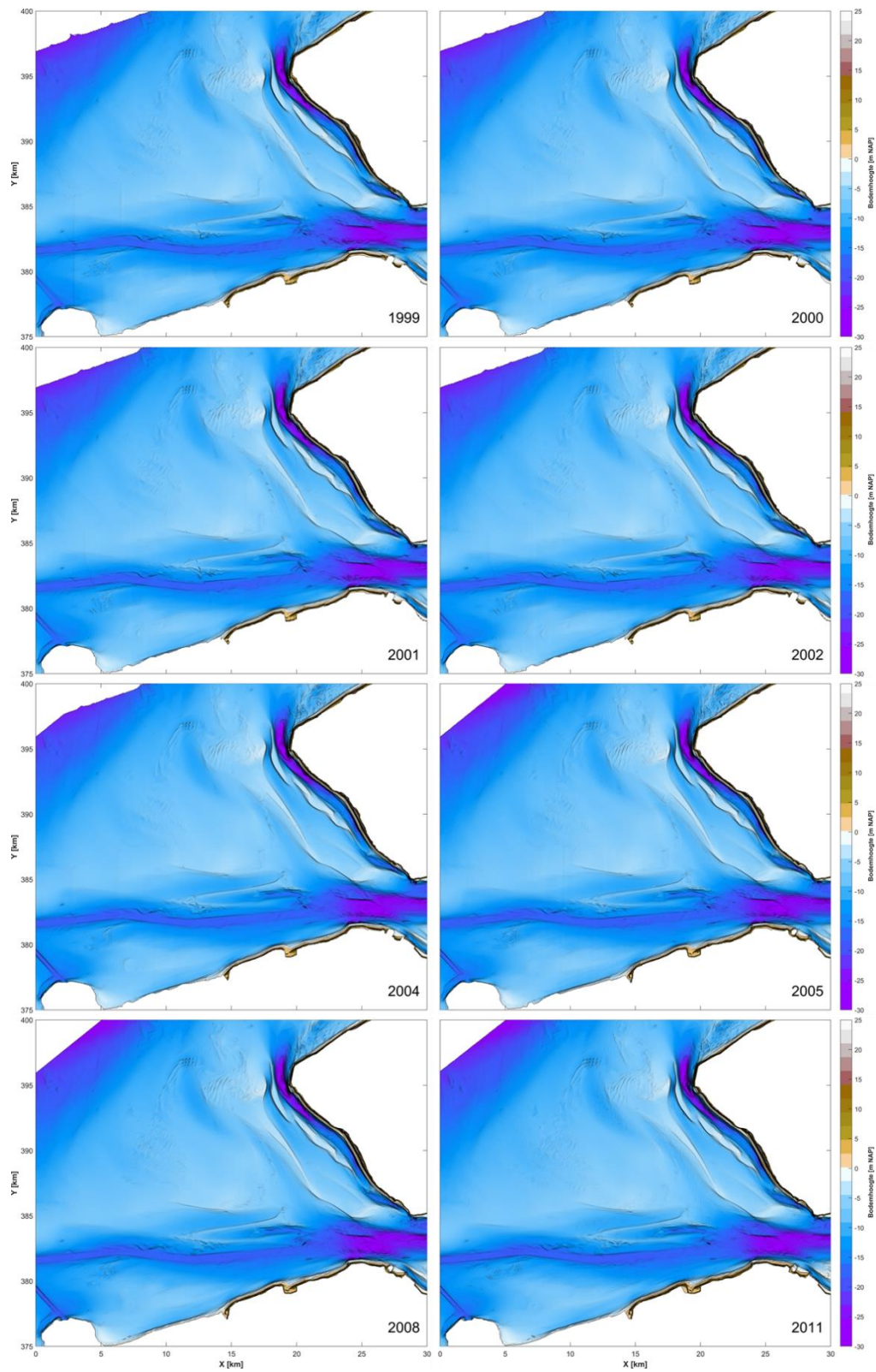
A.1.5 Cadzand-Bad (2013-2016)

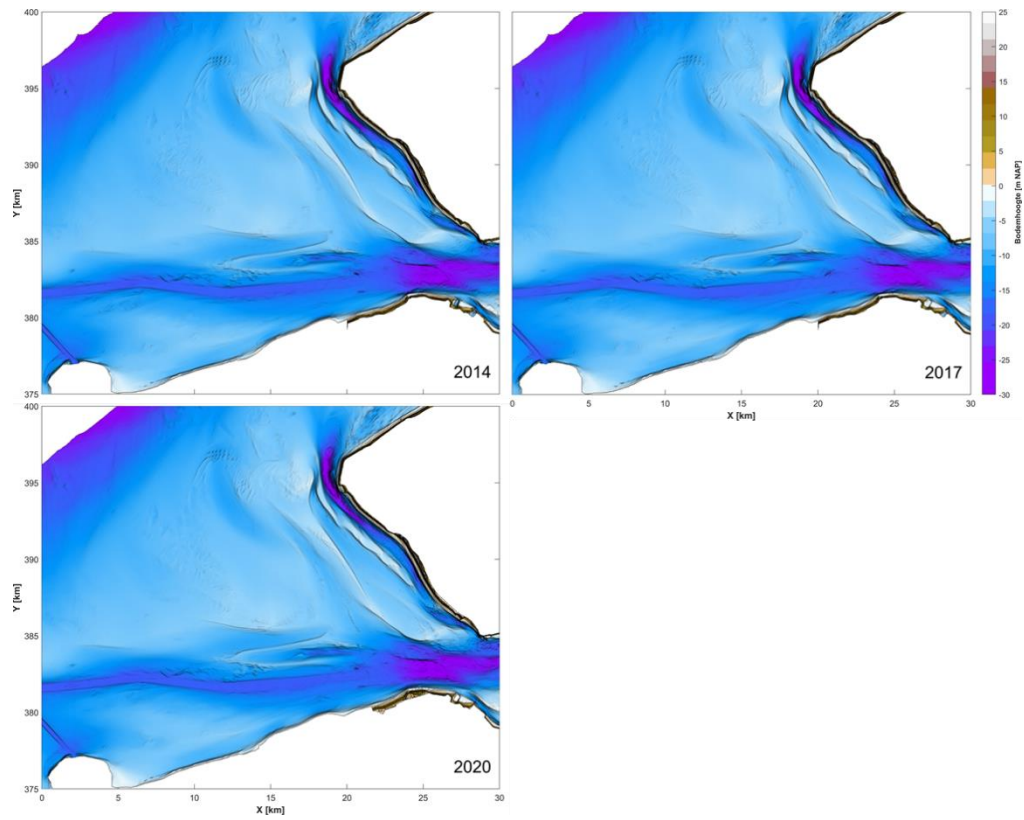


A.2 Bodemkaarten 1964-2020

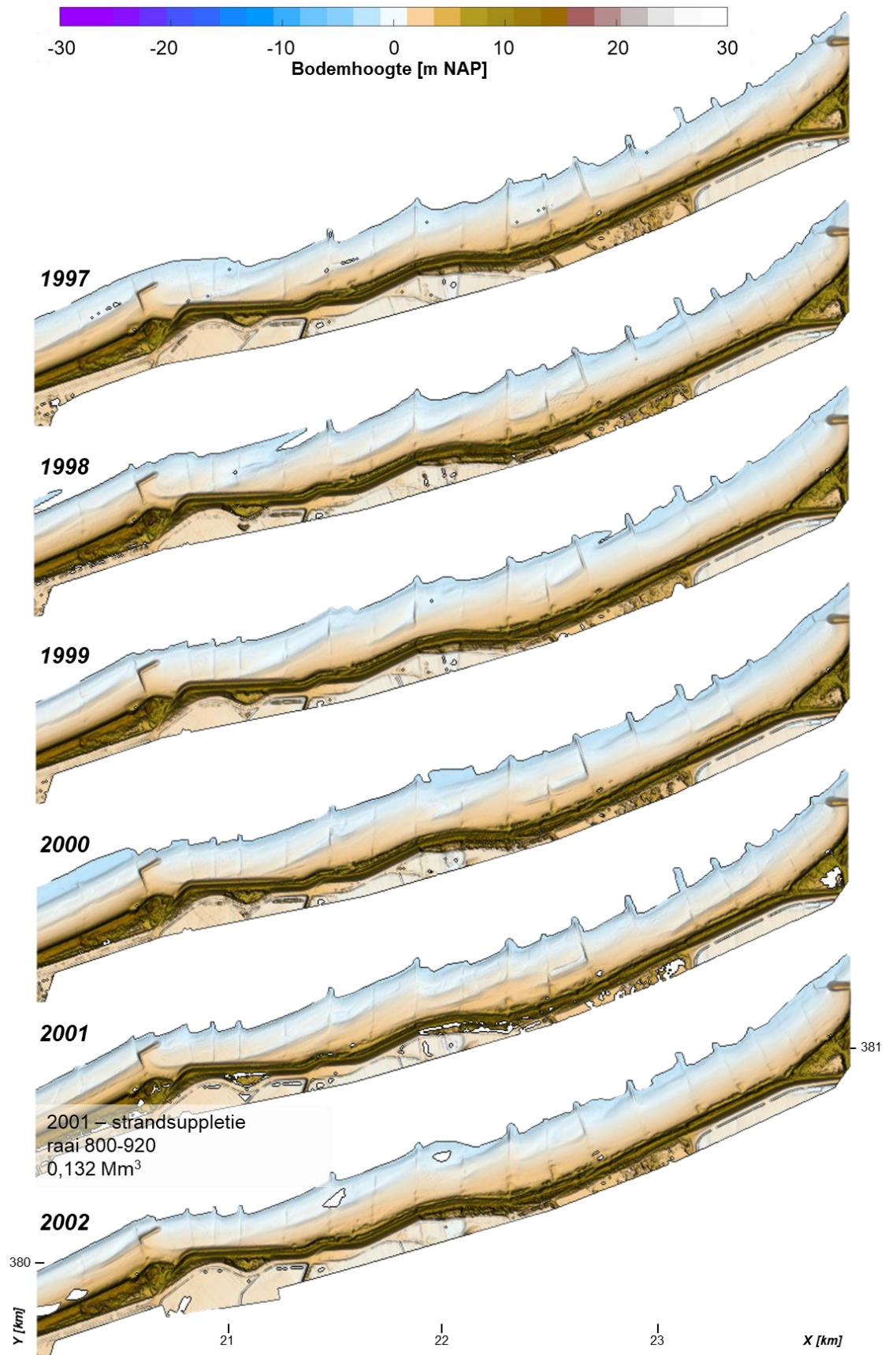


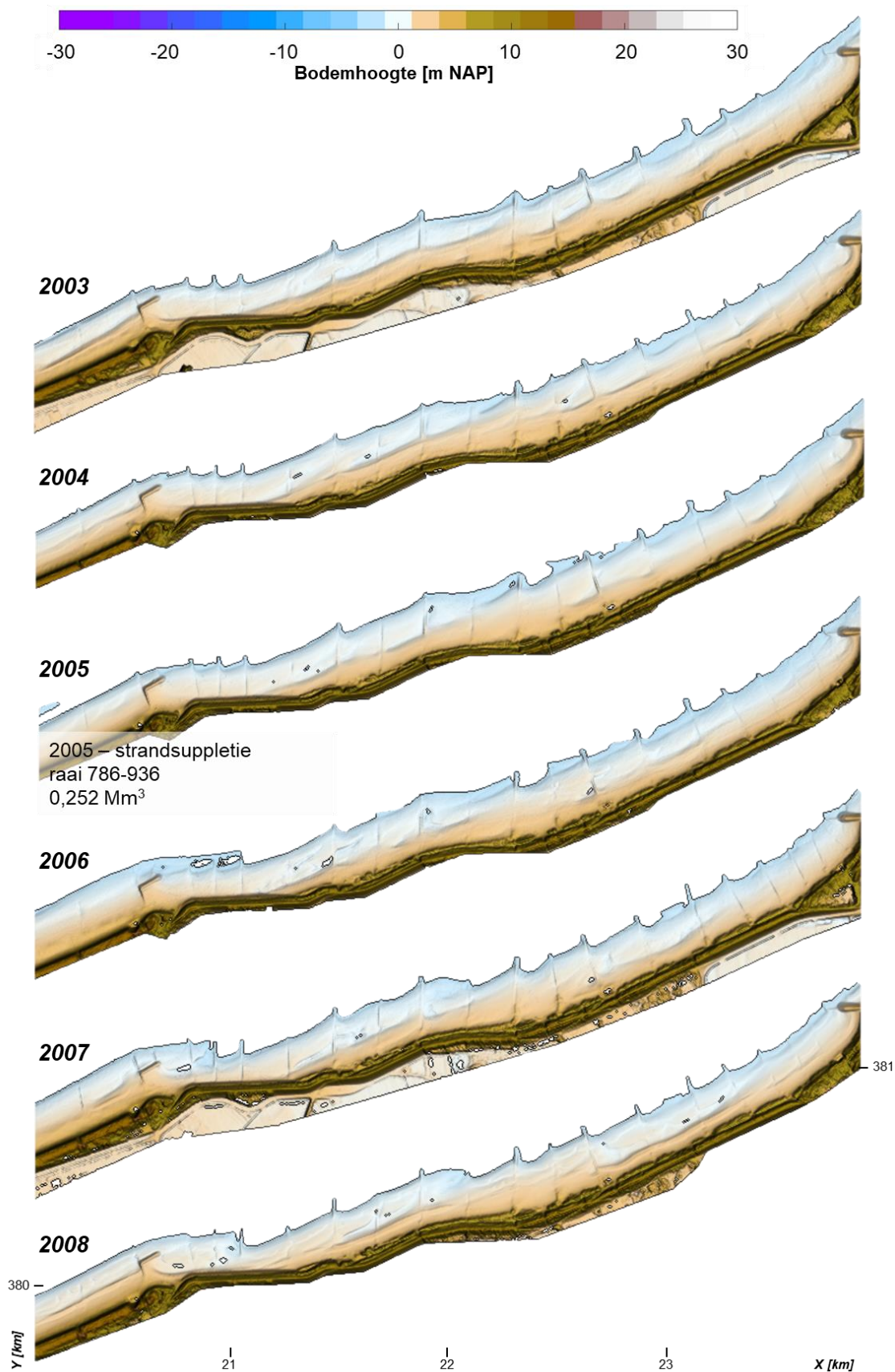


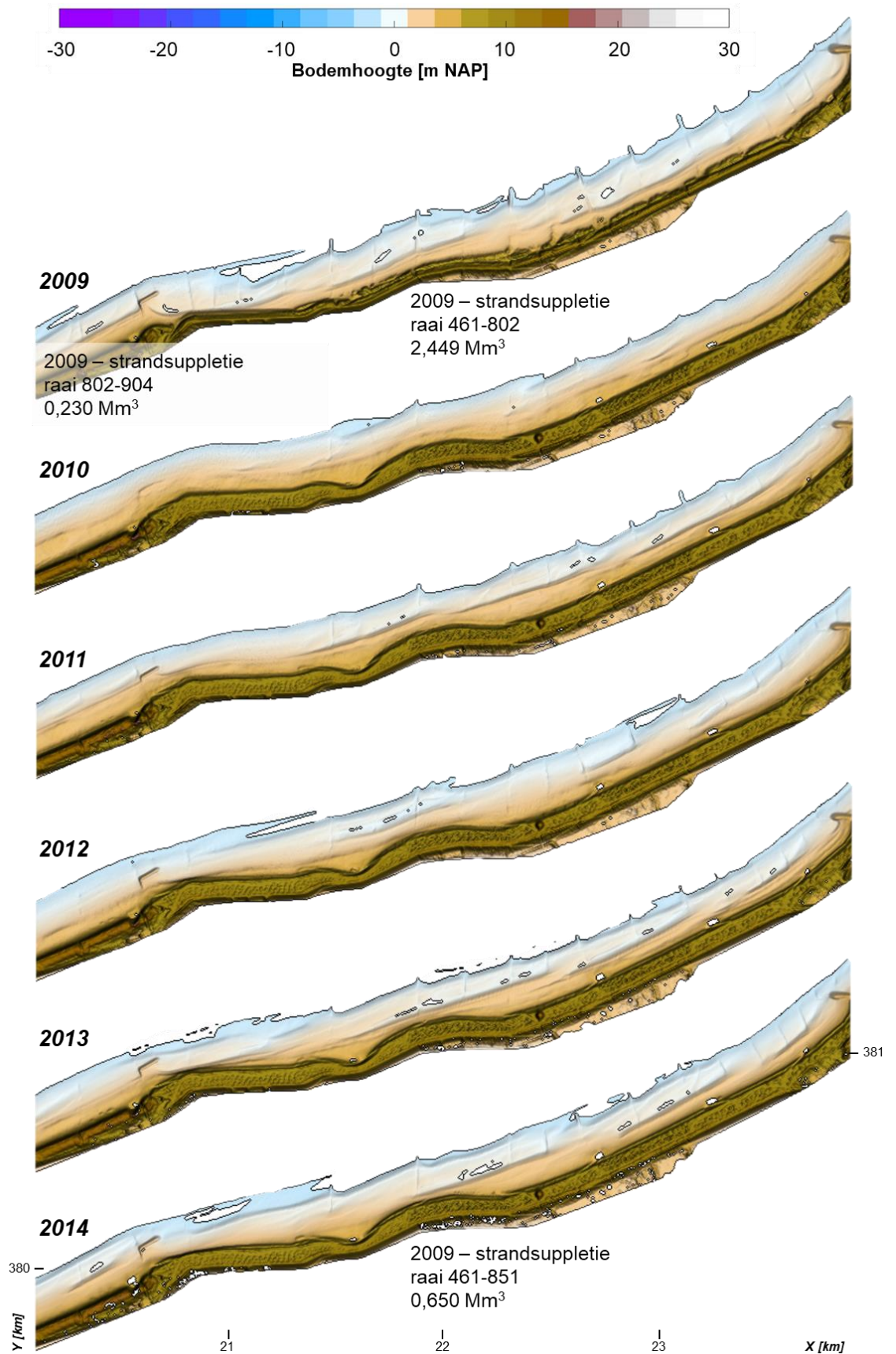


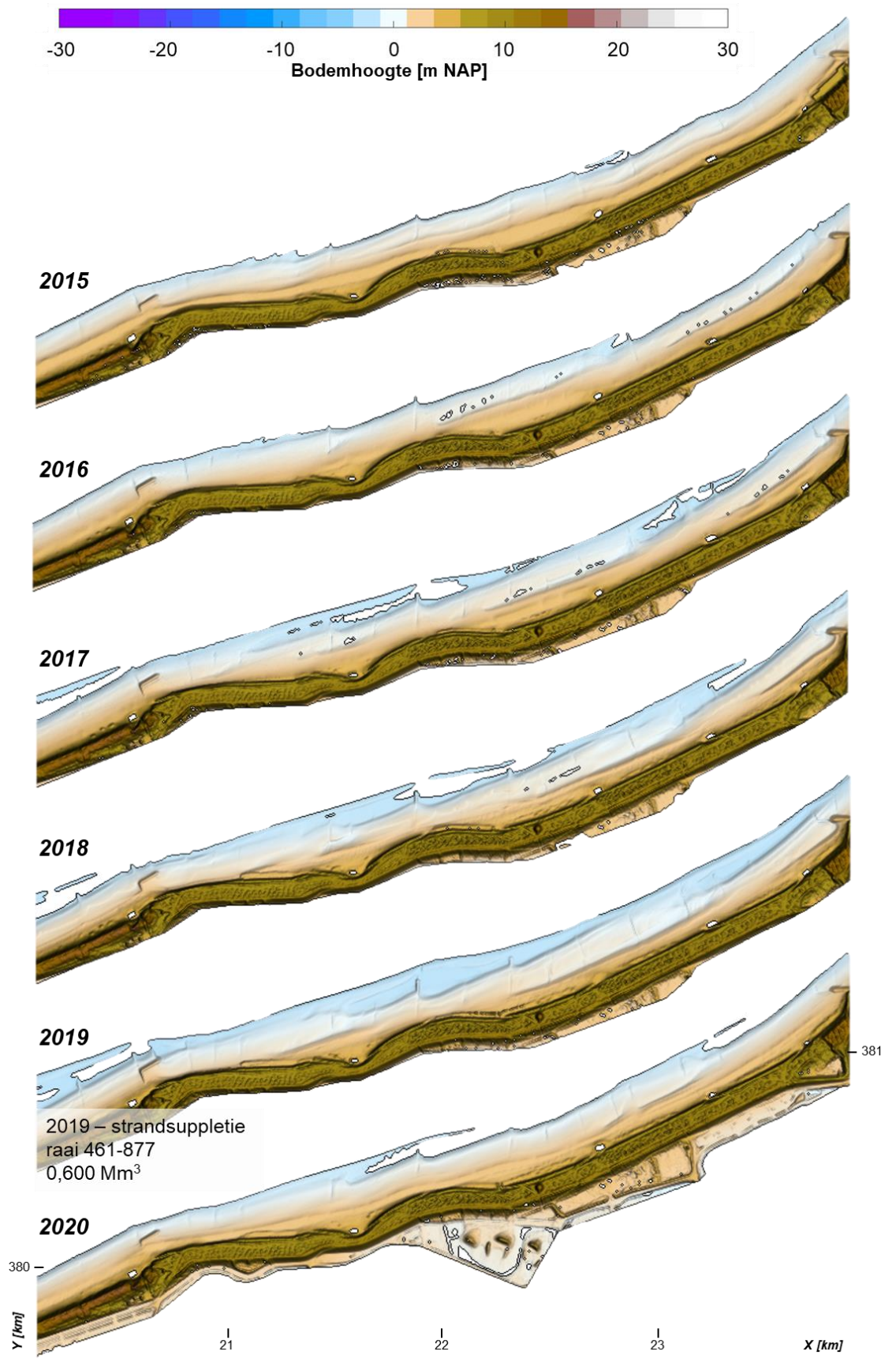


A.3 LiDAR opnamen 1997-2020

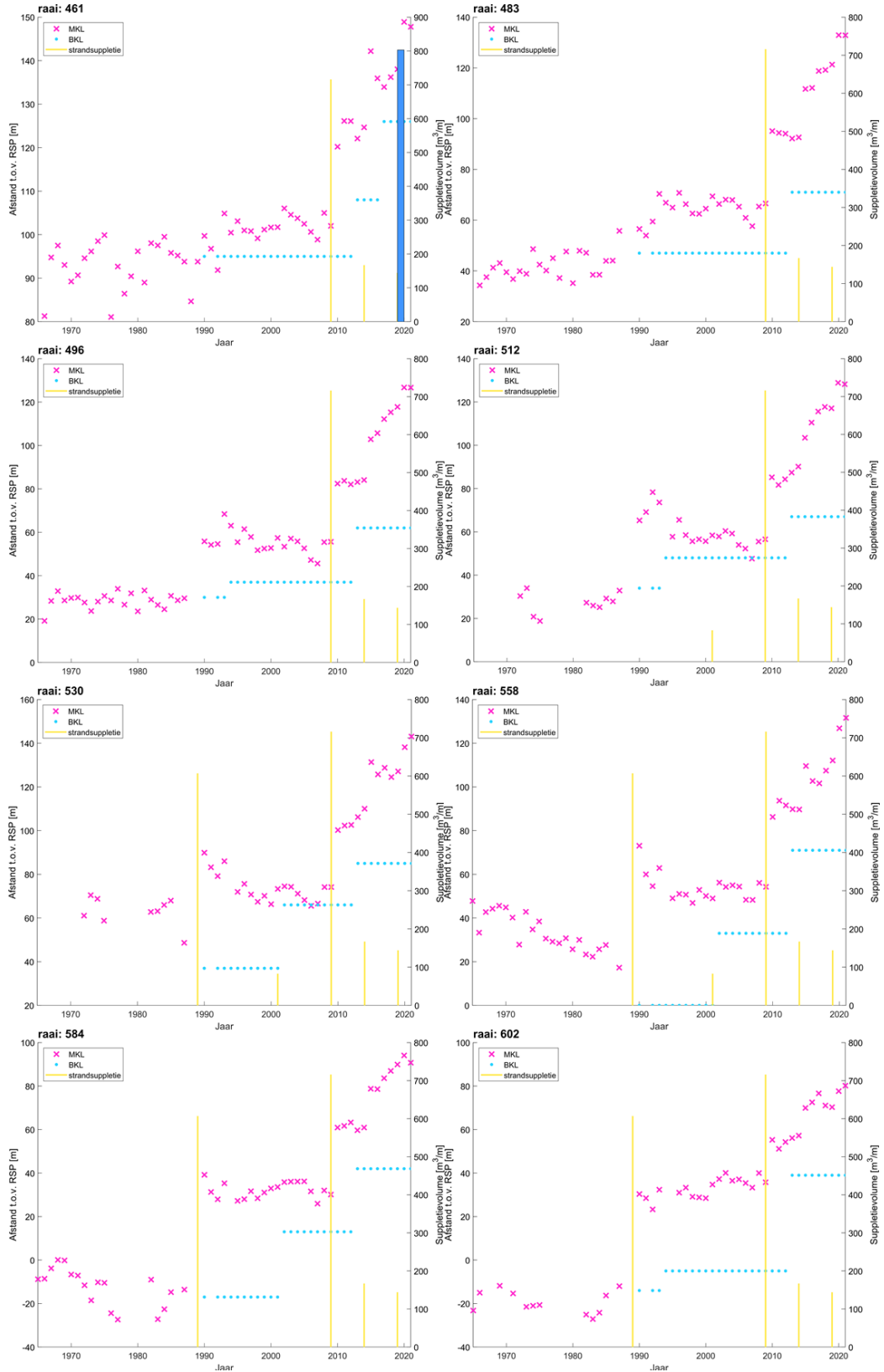


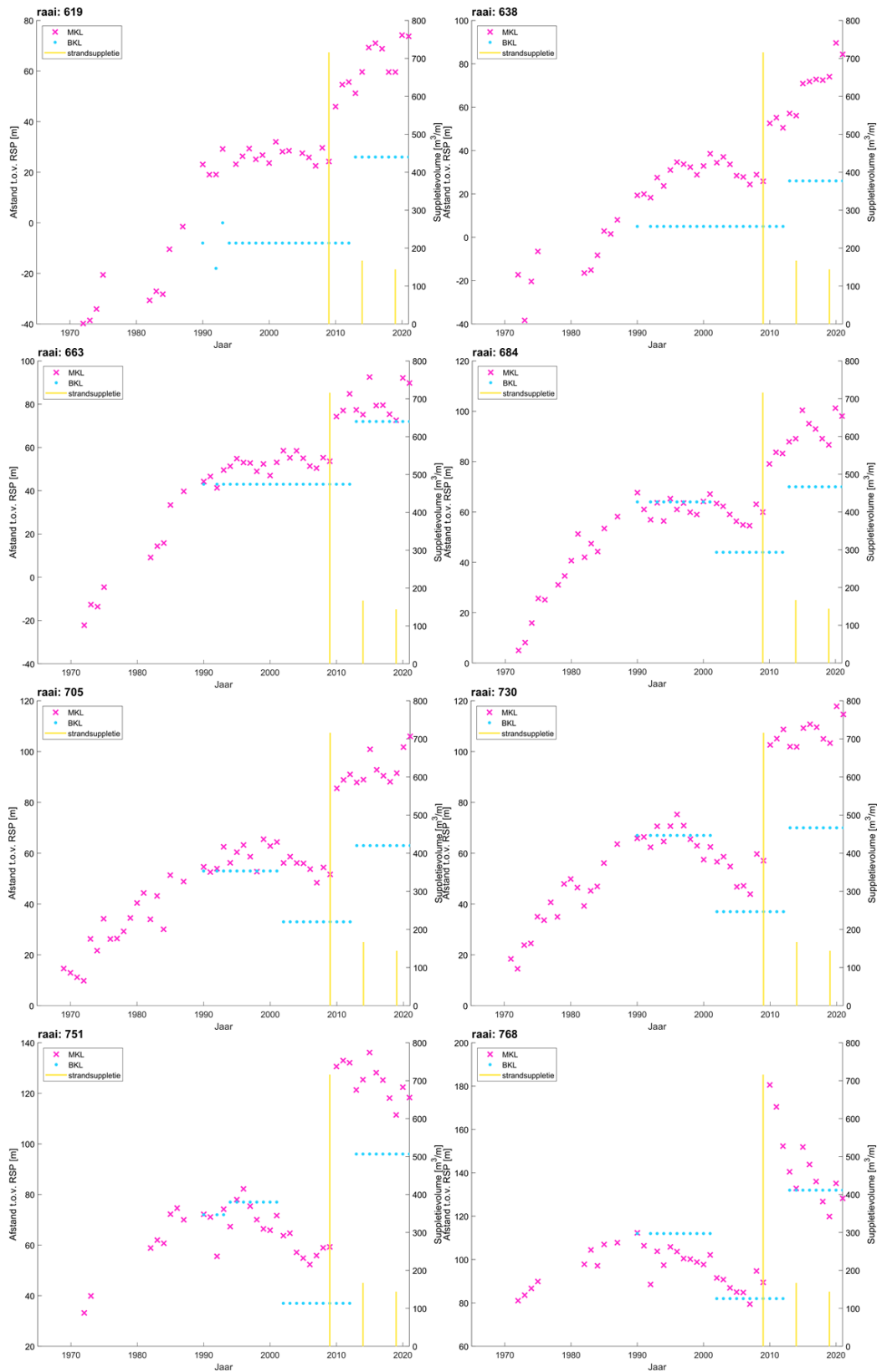


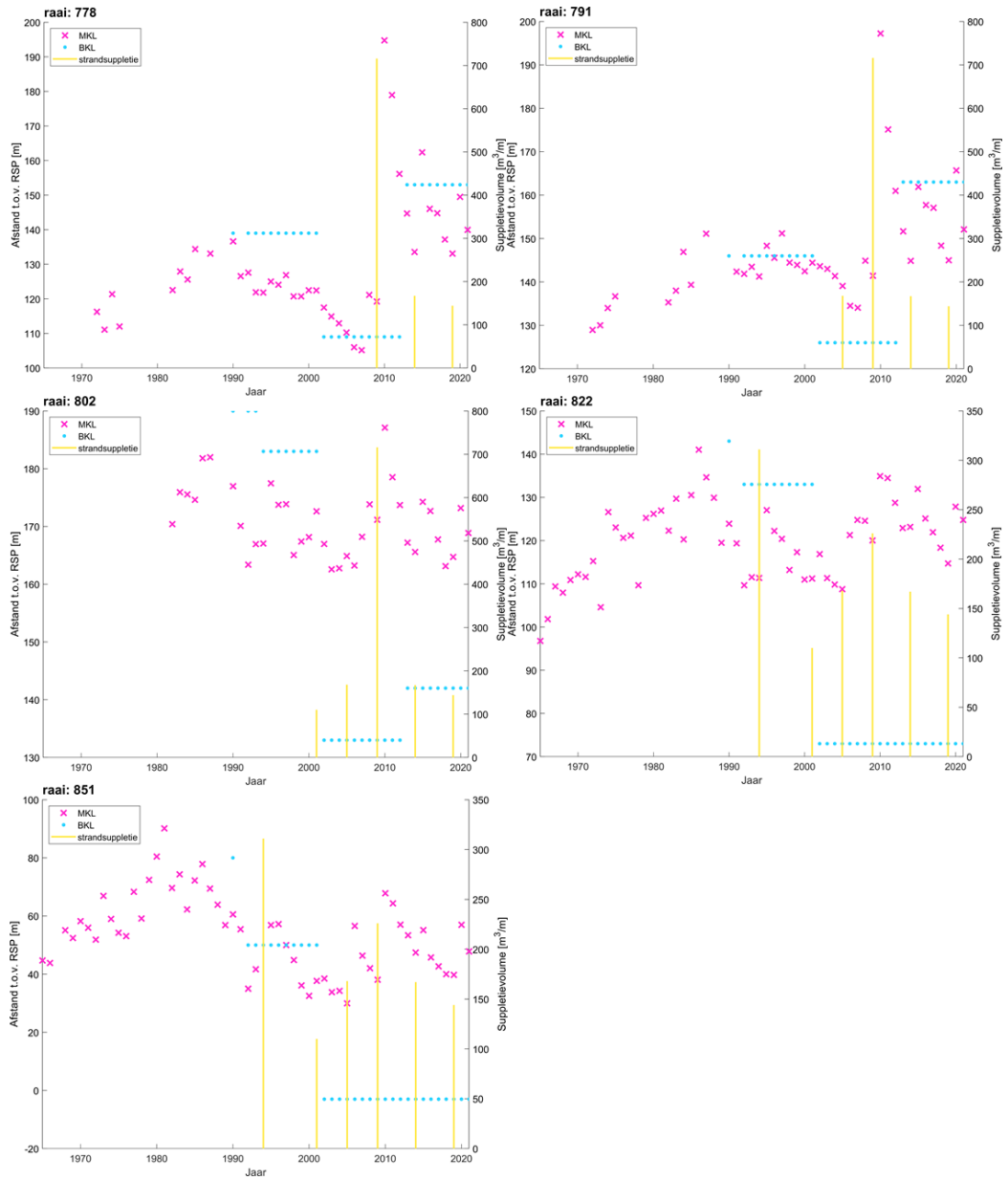




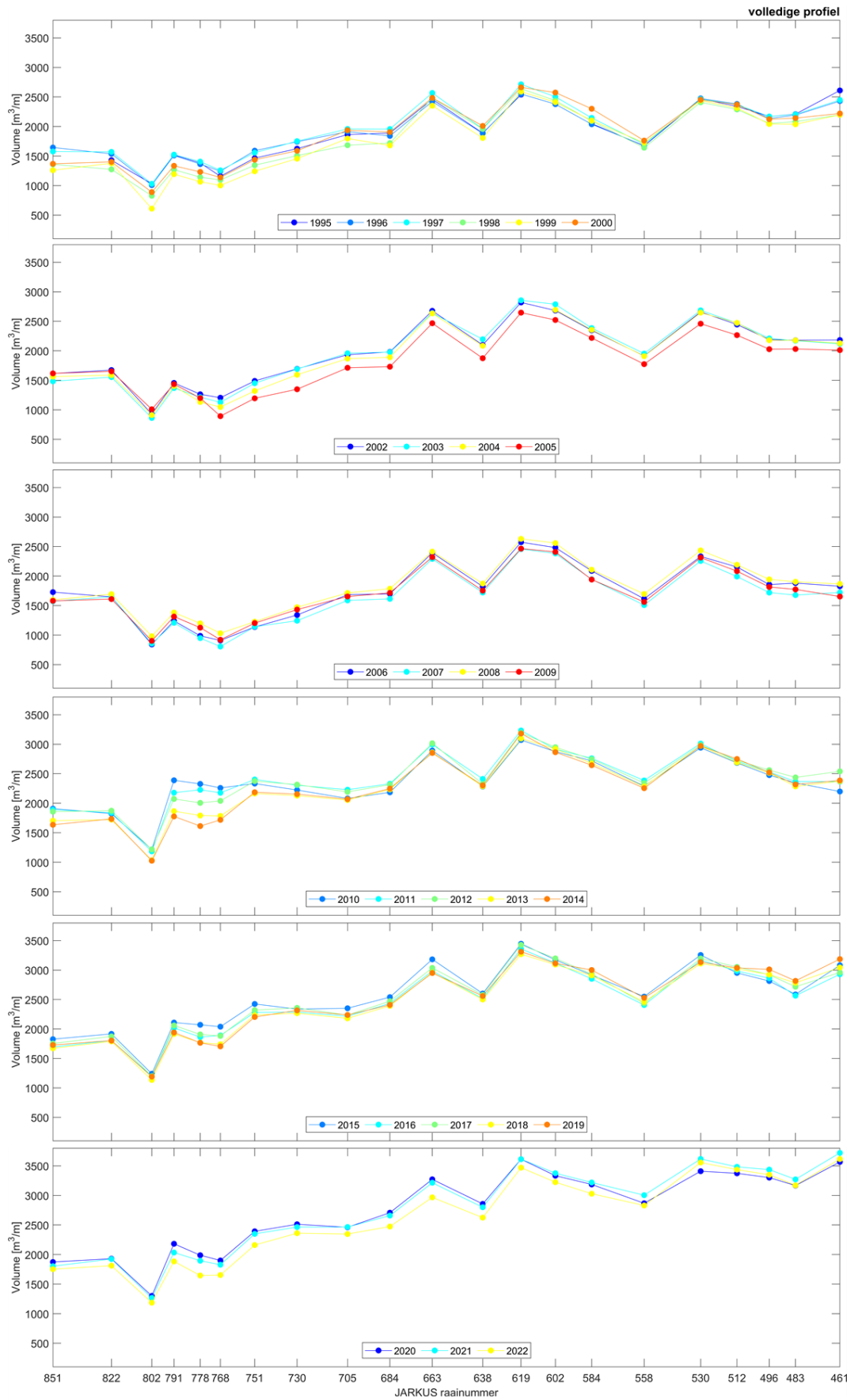
A.4 MKL-BKL trends raai 461-851



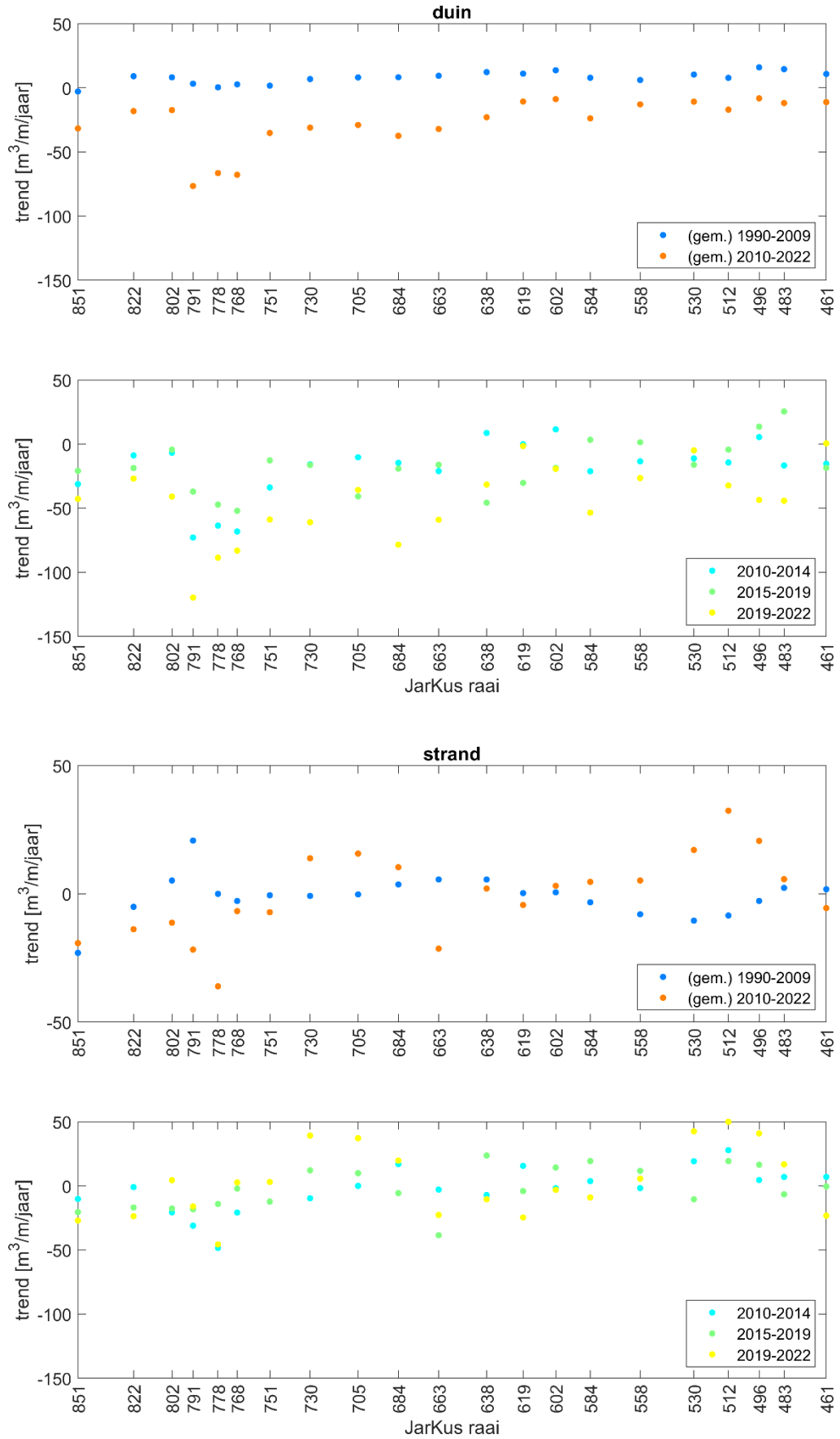


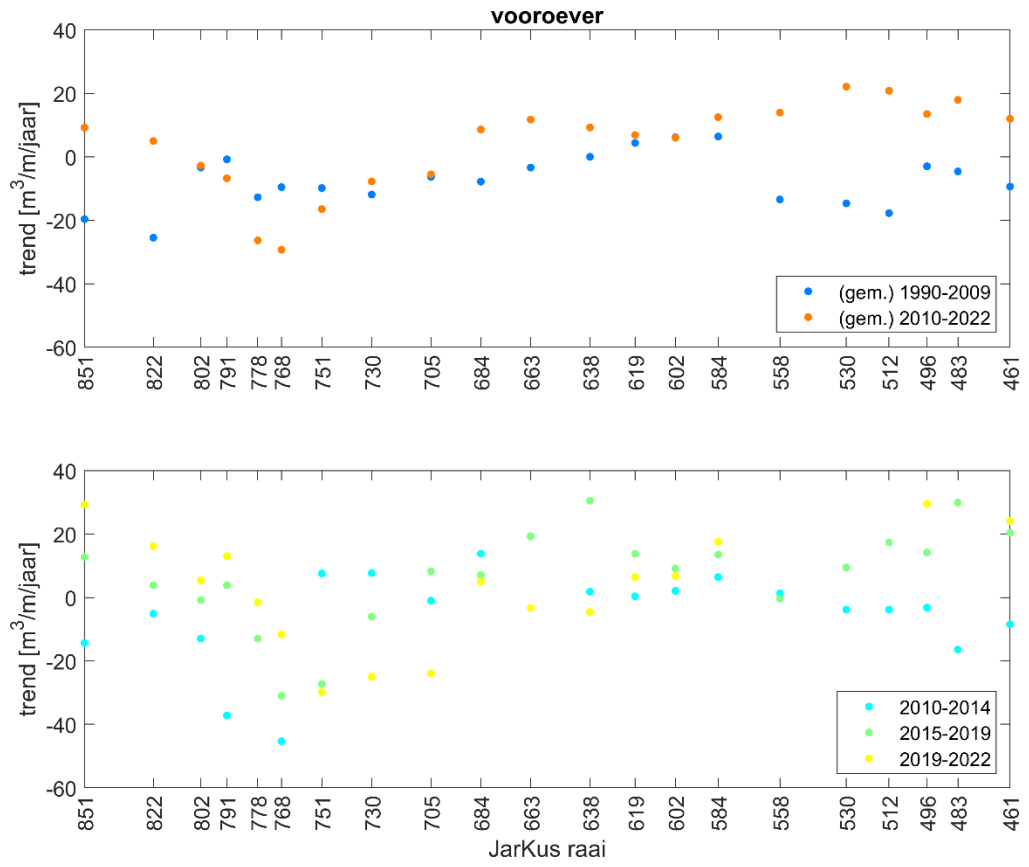


A.5 Volumes onder het volledige JarKus profiel voor verschillende periodes



A.6 Trends in volumeverandering per periode tussen suppleties





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