

Regionaal Advies: Strand- geulwandsuppletie Noord-Beveland



Regionaal Advies: Strand-geulwandsuppletie Noord-Beveland

Auteur(s)

Ellen Quataert

Edwin Elias

Tim de Wilde

Regionaal Advies: Strand-geulwandsuppletie Noord-Beveland

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Niels van Kuik en Falco van Bakel
Referenties	
Trefwoorden	Banjaardstrand, Oosterscheldemoning, Noord-Beveland, strand-geulwandsuppletie

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	12-12-2023
Projectnummer	11209263-001
Document ID	11209263-001-ZKS-0002
Pagina's	104
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Ellen Quataert	
	Edwin Elias	
	Tim de Wilde	

Samenvatting

Rijkswaterstaat overweegt om in 2025-2026 een gecombineerde strand-geulwandsuppletie te plaatsen in de Schaar van Onrust tussen ca. raai 180 en 320 (het Banjaardstrand bij Noord-Beveland). Rijkswaterstaat heeft Deltares hiertoe om advies gevraagd over de kans op (ongewenste) toename van erosie van het strand of andere plekken rondom de beoogde suppletielocatie ten gevolge van de suppletie.

Het voorliggende onderzoek heeft als doelstelling: het inschatten van de effecten van een (gedeeltelijke) geulopvulling d.m.v. een gecombineerde strand-geulwandsuppletie op de hydrodynamica en daaruit afgeleide transportprocessen langs het Banjaardstrand. Het onderzoek is uitgevoerd door middel van een analyse van beschikbare meetdata (Jarkus, Vaklodingen, Lidar en kustindicatoren), gecombineerd met de resultaten van een beknopt modelonderzoek.

Data- en modelanalyse van eerder (in 2013) uitgevoerde strand- en geulwandsuppleties laat zien dat de structurele erosie van het strand niet is veranderd na aanleg van de strand- en geulwandsuppleties. Wel hebben de suppleties geresulteerd in een kleine verandering in stromingen in de Schaar van Onrust en op de zandbank Onrust en dus ook een beperkte verandering van de residuele transporten op die locaties. Mogelijk is dit de oorzaak achter de in de data geobserveerde verflauwing van de geulwanden en hoogte afname van de Onrust.

De gemodelleerde effecten van de twee beschouwde realistische suppletievarianten, (1) strand-geulwandsuppletie en (2) geulopvulling, zijn vrijwel identiek en komen overeen met de geobserveerde respons van de suppleties in 2013. De morfologische veranderingen zoals geobserveerd sinds 2013 zullen zich in de toekomst dan waarschijnlijk op dezelfde manier voltrekken voor beide varianten. Op de korte termijn (komende 5 jaar) zal daardoor de erosieve trend niet veel veranderen en frequente strandsuppleties zullen benodigd blijven om de MKL te onderhouden. Op langere termijn zal de verflauwing van de geulwand er voor zorgen dat de strandsuppleties gunstiger, met meer volume in het dwarsprofiel, kunnen worden aangebracht door het vergroten van accommodatieruimte. Dit zal dan een positief effect hebben op de levensduur van de strandsuppleties.

De beperkte invloed op de hydrodynamica laat zien dat er op korte termijn (~10 jaar) geen extra risico te verwachten is bij de harde elementen in de kustverdediging, zoals (de bestortingen van) de Oosterscheldekering en de aanwezige strandhoofden. Op langere termijn zouden er wel veranderingen kunnen optreden in de stroming naar de kering toe, als het drempelgebied tussen Roompot Zuid en Oude Roompot verandert ten gevolge van het verdwijnen van de Schaar van Onrust. De simulaties uitgevoerd met hypothetische suppletievarianten laten zien dat alleen bij volledige dichtzetting van de Schaar van Onrust een duidelijk grotere beïnvloeding van de transporten optreedt. Dit kan dan een risico vormen bij de bestortingen van de kering. Een langetermijnanalyse van mogelijke gevolgen van het verdwijnen van de Schaar van Onrust wordt aanbevolen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Introductie	7
1.1	Probleem- en vraagstelling	7
1.2	Aanpak & Leeswijzer	8
2	Kustontwikkeling bij Noord-Beveland	9
2.1	Overzicht	9
2.1.1	Evaluatie van de 2013 geulwand- en strandsuppleties door Schrijvershof (2017)	11
2.2	Grootschalige analyse Oosterscheldemonding	12
2.2.1	Morfologische veranderingen in de monding	12
2.2.2	Ontwikkeling van het drempelgebied tussen Oude Roompot en Roompot Zuid	16
2.3	Morfologische ontwikkeling kustzone	18
2.4	Analyse van de kustindicatoren en individuele kustlijnprofielen	26
2.4.1	Ontwikkeling van deelgebied I (raai 120 – 180)	28
2.4.2	Ontwikkeling van deelgebied II (raai 200 - 380)	31
2.4.3	Ontwikkeling van deelgebied III (raai 380 - 540)	35
2.5	Duin en droge strandontwikkeling in detail	36
2.5.1	Ontwikkeling strand Noord-Beveland	37
2.5.2	Damaanzet van de stormvloedkering	39
2.6	Deelconclusies op basis van de data-analyse	40
3	Modellering van de (strand-)geulwandsuppleties	41
3.1	Het Delft3D-FM model	41
3.1.1	Modelschematisatie en rekenrooster	41
3.1.2	Sedimenttransport	42
3.1.3	Golven	43
3.2	Overzicht van de modelsimulaties en suppletievarianten	44
3.3	Referentie simulatie (T0 – 2022)	47
3.4	Evaluatie van de 2013 geulwandsuppletie	51
3.5	Modelresultaten voor de gevoeligheidssimulaties	56
3.6	Modelresultaten voor de RWS suppletieontwerpen	58
4	Conclusies en aanbevelingen	62
4.1	Conclusies	62
4.2	Aanbevelingen	64
5	Referenties	65
	Bijlagen	67

A	Volumebalans Noord-Beveland	68
A.1	Volumeontwikkeling per raai	68
A.2	Volumebalans Noord-Beveland: trends in miljoen m ³ per jaar	74
B	Gevoeligheidssimulaties	76
B.1	Referentie simulatie (2022 bodem)	76
B.2	Evaluatie 2013 suppleties	77
B.3	Gedeeltelijke opvulling Schaar v Onrust	80
B.4	Gedeeltelijke afsluiting (ofwel kustdwarse uitbouw)	82
B.5	Volledige opvulling Schaar v Onrust	84
B.6	Volledige afsluiting	86
C	Snelheden en transporten voor de RWS suppletievarianten	88
C.1	Geulwandsuppletie	88
C.2	Geulbodem	90
D	Debieten door dwarsdoorsnedes	93
E	Snelheden en transporten voor de suppletievarianten	95
E.1	2013 suppleties	95
E.2	Geulwand	96
E.3	Geulbodem	98
E.4	Kustdwarse uitbouw	100
F	Debieten door dwarsdoorsnedes	102

1 Introductie

1.1 Probleem- en vraagstelling

Rijkswaterstaat overweegt om in 2025-2026 een gecombineerde strand-geulwandsuppletie te plaatsen in de Schaar van Onrust tussen ca. raai 180-320 (het Banjaardstrand). Deze suppletie vult de geul "Schaar van Onrust" voor een deel op. Deze opvulling zou ertoe kunnen leiden dat de stroming dan een weg over het strand gaat zoeken, wat onbedoeld een hogere erosiesnelheid van het strand kan opleveren. Rijkswaterstaat vraagt Deltares om advies over de stabiliteit van deze suppletie en de kans op (ongewenste) toename van erosie van het strand of op andere plekken rondom de beoogde suppletielocatie.

Achtergrond

In 2013 is er een geulwandsuppletie uitgevoerd die gedeeltelijk op de bodem van de geul is terechtgekomen. De suppletie van 1,5 miljoen m³ vulde circa 50% van de geul op. Na aanleg van de geulwandsuppletie is de geul relatief stabiel gebleven, alleen de zeewaartse oever lijkt te verflauwen en zich nog wat zeewaarts te verplaatsen. Er heeft dus beperkt erosie van het aangelegde zand plaatsgevonden. De beperkte erosie wijst erop dat de geul zich niet hervormt en ook de verflauwing van de geulwand is een indicatie dat de geul in belang afneemt. Na aanleg van de suppletie lijkt het gedrag van het strand niet wezenlijk anders dan voor aanleg. De stranderosie gaat wel door, maar additionele negatieve effecten van de suppleties, zoals versterkte stroming over het strand of een versnelling van de stranderosie, zijn niet direct zichtbaar.

De verkleining van de geulgebieten na de suppletie was conform de modelstudie van Van der Werf et al (2010). Deze studie voorspelde echter ook tijdelijke erosie van de geulwand direct na aanleg, wat niet tot nauwelijks is gebeurd. Het zou kunnen dat deze erosie niet heeft plaatsgevonden doordat de geul ondieper is gemaakt in plaats van smaller (zoals de planning was).

In de nabije toekomst zal de erosie van het strand en daarmee de landwaartse verplaatsing van de MKL-positie niet stoppen zolang de geul Schaar van Onrust actief blijft. Suppleren van de kust van Noord-Beveland blijft voorlopig dus noodzakelijk. De beoogde suppletie voor 2025-2026 is in totaal ca 1,1 miljoen m³, waarvan ongeveer 400.000 m³ bestemd is voor het strand en 600.000 - 700.000 m³ voor de geulwand. Dit volume resulteert in een afname van het doorstroomoppervlakte van de geul met iets minder dan 50% . Er is ook reeds een mogelijkheid besproken om een soortgelijke suppletie in het volgende meerjarenprogramma te herhalen, waardoor de geul steeds verder wordt opgevuld.

Doel van het onderzoek:

Het voorliggende onderzoek heeft als doelstelling: het inschatten van de effecten van een (gedeeltelijke) geulopvulling d.m.v. een gecombineerde strand-geulwandsuppletie op de hydrodynamica en daaruit afgeleide transportprocessen langs het Banjaardstrand (Noord-Beveland).

Onderzoeksvragen:

Om deze doelstelling te bereiken zijn onderstaande onderzoeksvragen gedefinieerd:

- 1 Wat is het effect geweest van de geulwandsuppletie in 2013 op de kust van Noord-Beveland?
- 2 Wat zijn de te verwachten effecten op stroming en sedimenttransporten bij verschillende suppletie varianten?

- 3 Welke effecten en risico's kunnen we bij een geulopvulling verwachten op (eventuele versnelde erosie van) het strand?
- 4 Welke mogelijke risico's kunnen we bij een geulopvulling verwachten bij harde elementen in de kustverdediging, zoals (de bestortingen van) de Oosterscheldekering en de aanwezige strandhoofden bij raai 180?

1.2 Aanpak & Leeswijzer

De gevolgde aanpak bestaat uit een data-analyse gecombineerd met een beknopt modelonderzoek.

De data-analyse gebruikt de resultaten van de studie Elias & Quataert (2021) als basis en is daarbij geactualiseerd met de meest recente meetdata (tot en met 2022). De resultaten van het onderzoek van Elias & Quataert (2021) zijn nogmaals getoetst en waar nodig zijn de observaties/conclusies aangevuld of aangescherpt. In Hoofdstuk 2 wordt de data-analyse uitgewerkt. Hierbij wordt gebruik gemaakt van meerdere data-bronnen:

- De veranderingen van de voorliggende Oosterscheldemonding zijn in kaart gebracht door analyse van de Vaklodingen (H2.2). Dit zijn gebiedsdekkende metingen in 20m resolutie die ongeveer elke 3 jaar worden opgenomen. Deze data, tot 2010, zijn gebruikt in de studie van Elias en Van der Spek (2015), welke hier gebruikt is als basis en aangevuld met de meest recente Vaklodingen (tot en met 2022).
- Voor analyse van de ontwikkeling van de kustlijn zijn de Jaarlijkse Kustmetingen (Jarkus) en de LiDAR (kusthoogte) metingen gebruikt. De Jarkusdata worden sinds 1965 ingewonnen. Ze vormen de basis van de berekening van de volumeverandering van de kustzone (H2.3) en kustindicator MKL (Momentane KustLijn, H2.4). Detailanalyses van de individuele Jarkusraaien verschaft extra inzicht in H2.4. Voor het droogvallende strand worden ook LiDAR metingen gebruikt. Deze metingen zijn vanaf 1998 tot 2022 beschikbaar. De LiDAR opnames geven ook een gedetailleerd beeld van de morfologische veranderingen van het strand en de eerste duinenrij in H2.5.
- Tenslotte wordt in H2.6 de ontwikkeling van de geulwandsuppletie van 2013 besproken.

Het tweede deel van de studie, Hoofdstuk 3, bestaat uit een beknopte modelstudie naar de effecten van verschillende suppletie varianten op stroming en sedimenttransport. Hiervoor is een Delft3D-FM model van de Oosterschelde en -mondig gebruikt. Met het model zijn simulaties uitgevoerd van zowel de in 2013 uitgevoerde geulwandsuppletie als twee series van suppletievarianten. De eerste serie betreft een gevoeligheidsonderzoek door middel van vier suppletieontwerpen (met een relatief groot volume). De tweede serie omvat twee door RWS aangeleverde suppletieontwerpen, naar aanleiding van de resultaten van het gevoeligheidsonderzoek. De doelstelling van deze simulaties is niet het realistisch doorrekenen van de werkelijke transporten, maar door de varianten te vergelijken met de referentiesimulatie (de simulatie zonder suppletie) kan wel een goede inschatting van de mogelijke effecten van de ingreep worden gemaakt.

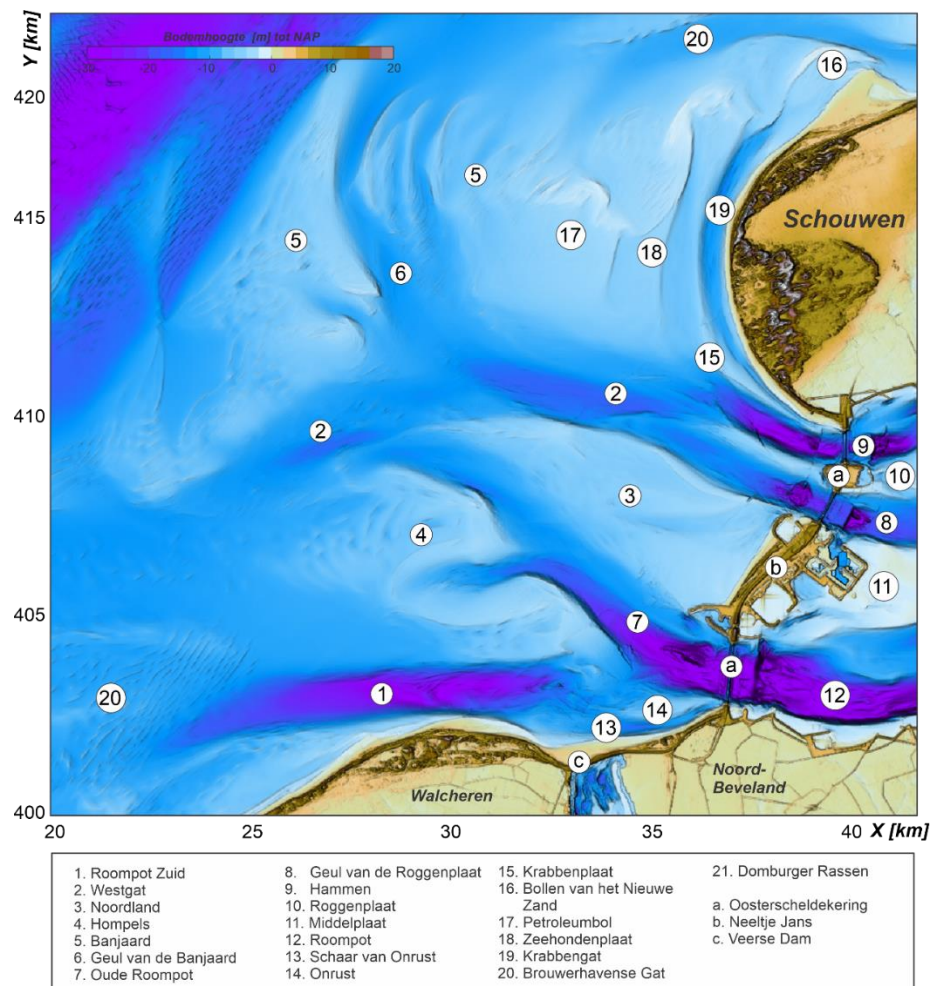
Dit onderzoek focust zich op de morfologische effecten van het toevoegen van zand aan de geulwand en/of geulbodem, in de modelstudie wordt daarom gesproken van een geulwandsuppletie. De suppletievarianten zijn echter een gecombineerde strand-geulwandsuppletie, met aanleghoogte $\geq +2\text{m}$ NAP en loopt door tot in de geul. In 2013 zijn twee losstaande suppleties uitgevoerd: een strandsuppletie en een geulwandsuppletie; in de vergelijking van bodems en volumes voor en na 2013 zijn beide suppleties verwerkt.

In Hoofdstuk 4 worden de belangrijkste resultaten samengevat in conclusies en aanbevelingen.

2 Kustontwikkeling bij Noord-Beveland

2.1 Overzicht

De Oosterscheldemonding strekt zich uit tussen de eilanden Walcheren - Noord-Beveland en Schouwen (Figuur 2-1). Op de buitendelta bevinden zich meerdere grote geulen die zich ver zeewaarts uitstrekken. Lokaal hebben deze geulen dieptes van meer dan 20 m. De ontgrondingskuilen nabij de Oosterscheldekering hebben lokaal een diepte van meer dan 50 m.



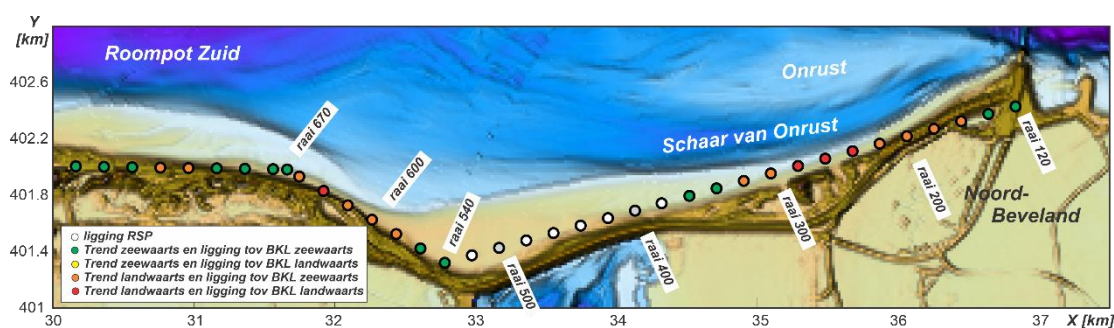
Figuur 2-1: Overzicht van de Oosterscheldemonding gebaseerd op gecombineerde 2019-2022 Vaklodingen. De eilanden zijn opgevuld met het AHN bestand.

In de monding vormt het eiland Neeltje Jans en de aansluitende Middelplaat een duidelijke scheiding tussen de noordelijke en zuidelijke geulen. Ten noorden van Neeltje Jans liggen de twee geulen Geul van Roggenplaat en Hammen. Deze twee geulen gaan op de buitendelta over in het Westgat. Het zeewaartse deel van het Westgat buigt af naar het zuidwesten.

Voor de kust van Noord-Beveland zijn de geulen ten zuiden van Neeltje Jans van direct belang. De Roompot strekt zich vanuit de Oosterschelde (noord)westelijk uit de buitendelta op en wordt hier dan Oude Roompot genoemd. Net ten westen van de stormvloedkering maakt de geul over een ondiep drempelgebied verbinding met de westelijk gerichte geul Roompot Zuid. Tussen deze twee geulen bevindt zich het bankengebied Hompels, waarop nog twee kleinere

obschaar en -schild systemen te zien zijn. Een derde kleine geul, Schaar van Onrust, bevindt zich ten zuiden van het drempelgebied tussen Oude Roompot en Roompot Zuid. De Schaar van Onrust ligt ingeklemd tussen de kust van Noord-Beveland en het kleine bankengebied Onrust. In het verleden lagen het bankengebied en ook de Schaar van Onrust verder zeewaarts (H2.2.2), maar de geul en bank hebben zich zuidelijk verplaatst, waardoor de geul zich de laatste jaren direct langs de kust bevindt.

Figuur 2-2 geeft een gedetailleerd beeld van de kustlijn en vooroever van Noord-Beveland en de noordzijde van Walcheren. De kustlijn van Noord-Beveland strekt zich uit vanaf de Veerse Gatdam tot de Oosterscheldekering. De Veerse Gatdam ligt tussen raaien 400 en 540 en werd voltooid in 1961. Vóór afsluiting was er in de bodem nog een kleine buitendelta aanwezig (Figuur 2-4, 1960). Na afsluiting, met het wegvallen van de in- en uitstroming richting het Veerse Meer, hebben zich grote veranderingen in de vooroever voorgedaan. De voorliggende ondiepe banken werden landwaarts verplaatst, waardoor de strandzone hier sterk uitbouwde (zie Figuur 2-4, 1980-2010). Het strand tussen raai 200 en raai 300 is smal en hier grenst de Schaar van Onrust direct aan de kust. Het stuk strand tussen raai 130 en 400 wordt sinds 1973 gesuppleerd. In totaal is hier 5,0 miljoen m³ zand aangebracht (Tabel 2-1). Met uitzondering van de geulwandsuppletie in 2013 zijn deze suppleties uitgevoerd op het strand. De gesuppleerde volumes liggen over het algemeen tussen de 400.000 en 500.000 m³.



Figuur 2-2: Een overzicht van de kust van Noord-Beveland (raai 120-500) en Walcheren (raai 540 – 570). Trends op basis van de kustlijnbeoordeling 1-1-2023. Niet alle getoonde raaien zijn toetsraaien (BKL2017).

Tabel 2-1: Een overzicht van uitgevoerde suppleties in het kustvak Noord-Beveland.

Locatie	Datum	Begin raai	Eind raai	Type	Volume (situ) [m ³]	Volume [m ³ /m]
Onrustpolder	01-Jan-73	180	220	strandsuppletie	210.000	525
Onrustpolder	01-Mei-93	220	365	strandsuppletie	411.000	283
Onrustpolder	01-Jan-96	210	380	strandsuppletie	435.000	256
Onrustpolder	01-Jan-00	200	360	Strandsuppletie	524.000	328
N-Beveland	01-Apr-04	135	405	Strandsuppletie	502.000	186
Onrustpolder	01-Okt-08	140	400	Strandsuppletie	461.000	177
Onrustpolder	01-Apr-13	160	340	Geulwandsuppletie	1.500.000	833
Onrustpolder	01-Apr-13	180	320	strandsuppletie	360.000	257
Onrustpolder	01-Sept-18	160	320	strandsuppletie	250.000	156
Onrustpolder ¹	01-Mei-22	160	320	strandsuppletie	370.000	231
Totaal					5.023.000	

¹ De strandsuppletie is uitgevoerd na het inmeten van de Jarkus-raaien van 2022. De suppletie is dus niet terug te zien in de analyses met de Jarkus-data in dit onderzoek.

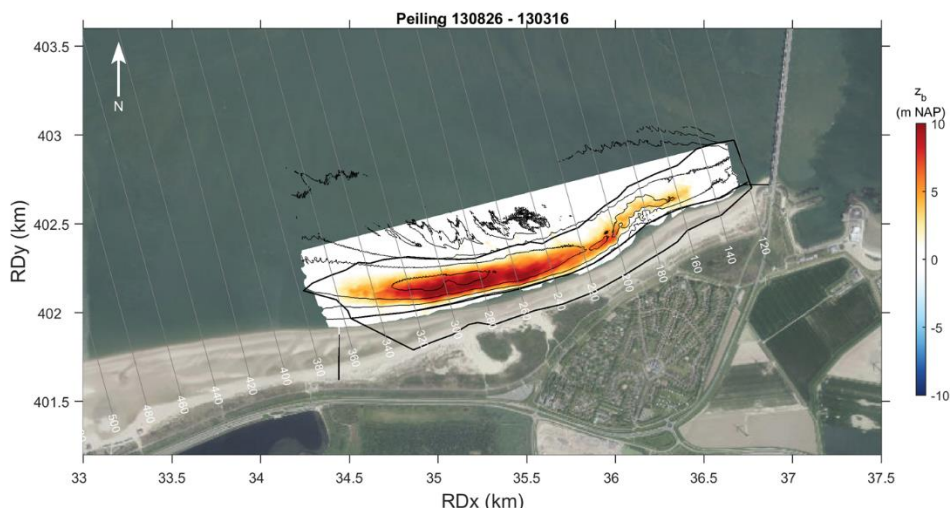
2.1.1 Evaluatie van de 2013 geulwand- en strandsuppleties door Schrijvershof (2017)

Een evaluatie van de geulwandsuppletie ná aanleg is uitgevoerd door Schrijvershof (2017). Ondersteunend onderzoek ter voorbereiding van de suppletie is gerapporteerd in Van der Werf et al. (2010). De hypothesen zoals opgesteld in Van der Werf et al. (2010) zijn op basis van het oorspronkelijke ontwerp van een geulwandsuppletie. De suppletie is uiteindelijk anders uitgevoerd, het werd meer een geulopvulling dan een geulwandsuppletie. In deze paragraaf wordt eerst de belangrijkste resultaten uit deze twee studies samengevat.

In Van der Werf (2012) zijn twee hypothesen opgesteld over het mogelijke effect van de geulwandsuppletie, op basis van de geulwandsuppleties bij Walcheren en Oost-Vlieland:

1. De suppletie fungeert als erosiebuffer; de eroderende processen worden vertraagd en dit heeft een positief effect op de MKL.
2. De suppletie blokkeert de stroming door de geul; er kan een nieuwe geul ontstaan en dit heeft een negatief effect op de MKL. Dit is niet het geval als een andere, al bestaande geul, de debietafname opvangt.

De uitgevoerde geulwandsuppletie blokkeert de getijstrooming, waardoor het debiet in de geul naar verwachting afneemt. Dit is in lijn is met de modelvoorspellingen van Van der Werf et al. (2010), waar 12% (vloed) en 18% (eb) afname in getijdebiet werd voorspeld. Er is echter geen nieuwe geul ontstaan: de debietafname is waarschijnlijk opgevangen door de Oude Roompot geul (7 in Figuur 2-1) ten noorden van de plaat Onrust. De ontwikkeling en het effect van de geulwandsuppletie komen goed overeen met bovengenoemde hypothese 2.



Figuur 2-3: Verschilkaart van de in- en uitpeiling van de geulwandsuppletie in de Schaar van Onrust in 2013. Zwarte contourlijnen geven de bathymetrische situatie van de inpeiling weer, grijze lijnen geven de ligging van de JARKUS raaien (uit Schrijvershof, 2017).

De geulwandsuppletie van 1,5 miljoen m³ is in april en mei 2013 aangelegd tussen de raaien 160 – 340 (Figuur 2-2). Gelijktijdig is er een strandsuppletie van 0,41 miljoen m³ uitgevoerd tussen dezelfde raaien. Het centrale gedeelte van de suppletie (rond raai 280) is zo aangelegd dat de helling van het kustprofiel is afgenomen van ongeveer 1:7 tot ongeveer 1:13. De geulwandsuppletie is daarbij niet alleen tegen de landwaartse (zuidelijke) geulwand neergelegd maar ook voor een gedeelte tegen de zeewaartse (noordelijke) geulwand. De Schaar van Onrust is, door de manier waarop de suppletie is aangebracht, voor een groot gedeelte opgevuld (geulopvulling). Dit verminderde het doorstroomoppervlak van de geul aanzienlijk. Ter plaatse van raai 280 is het doorstroomoppervlak afgenomen van ~3000 m² naar ~1600 m² onder NAP -5 m (indicatie op basis van de diepte en breedte van de geul). Dit is een afname van bijna 50%.

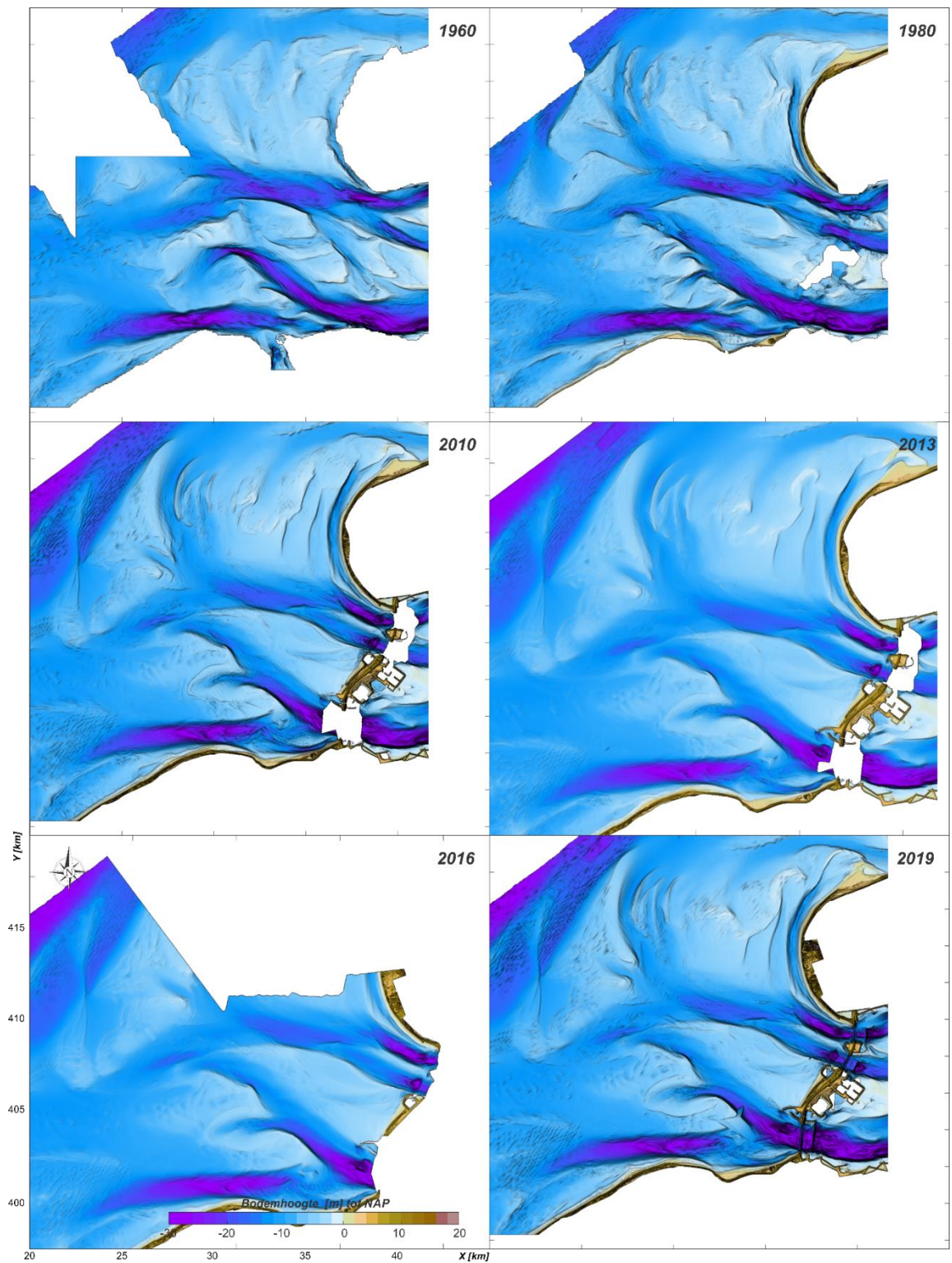
2.2 Grootschalige analyse Oosterscheldemonding

2.2.1 Morfologische veranderingen in de monding

Het geulen- en platenpatroon in de bodems van 1960 en 2019 is in hoofdlijnen gelijk gebleven (Figuur 2-4), maar er hebben zich wel grote veranderingen in de bodem voorgedaan (Figuur 2-5). In de studies van Elias en van der Spek (2015) en Elias et al. (2016) zijn deze veranderingen uitgewerkt en voor een gedetailleerde beschrijving van de sedimentvolumebalans wordt naar deze twee studies verwezen. Hieronder staan de belangrijkste ontwikkelingen samengevat.

Elias en van der Spek (2015) concluderen dat de veranderingen in de monding sterk beïnvloed zijn door de gedeeltelijke afsluiting van de Oosterschelde in 1986, maar ook door de voorafgaande afsluiting van de Grevelingen (1971). Daarnaast hebben de aanleg van dammen aan de binnenkant van het Oosterscheldebekken (de Grevelingendam, Zandkreekdam, Philipsdam in de Krammer en de Oesterdam bij het Zoommeer) invloed gehad. Tussen 1960 en 1980 vond er op de buitendelta netto aanzanding plaats (Figuur 2-5, boven). In deze periode fungeerde de monding van de Oosterschelde nog als een actieve buitendelta. Aanvoer van sediment vanuit de Oosterschelde deed in deze periode het volume van de buitendelta toenemen. Voor het getoonde gebied in Figuur 2-5 (boven) ligt deze toename op 70 miljoen m³. Als verklaring voor deze toename geven Van den Berg (1984) en Eelkema (2013) dat er tussen 1965 en 1985 een toename van de sedimentexport optrad ten gevolge van de afsluitingen in het Oosterscheldebekken en van de Grevelingen. De grote veranderingen die in het geulenstelsel plaatsvonden laten zien dat in aanloop naar de aanleg van de stormvloedkering de invloed van menselijk ingrijpen al groot was (Figuur 2-4). Door aanleg van het werkeiland Neeltje Jans werd de 'Geul', de verbindingsgeul tussen Roompot en Westgat, afgedamd waarna deze volledig verzandde (+19 miljoen m³, zie 1 in Figuur 2-5). Grote morfologische veranderingen vonden ook plaats in de Geul van de Banjaard en de Hammen. Het kleinere werkeiland tussen de Geul van de Roggen en de Hammen zorgt dat deze twee geulen verder gescheiden werden. Hierdoor zijn deze lokaal sterk verdiept door uitschuring.

De ontwikkeling van het zuidelijke gedeelte van de monding wordt gedomineerd door de veranderingen rond de geul (Oude) Roompot. De karakteristieke ebschild en ebschaartjes op de Hompels geven aan dat de Oude Roompot een eb-gedomineerde geul is. De ebschaartjes leken vóór de afsluiting een patroon te volgen: ze ontstonden landwaarts, migreerden zeewaarts, waarna er landwaarts weer een nieuwe ebschaar vormde. Dit patroon blijft tot 1985 duidelijk zichtbaar (zie bijvoorbeeld de 1980 bodem in Figuur 2-4).



Figuur 2-4: Overzicht van de bodemligging in de Oosterscheldemonding in de jaren 1960, 1970, 2010 en 2019 (zie Figuur 2-1 voor de meest recente 2022-2019 Vaklodging).

De Oude Roompot verruimde richting het Westgat, waarbij het ebschild verder opgeruimd werd. De vergrote getijprisma's in de Oosterscheldemonding, door aanleg van de Grevelingen- en Volkerakdam, zouden hier mogelijk de oorzaak van kunnen zijn. In totaal verloor het geulstelsel Roompot ~40 miljoen m³ aan sediment (2 in Figuur 2-5), terwijl de naastliggende

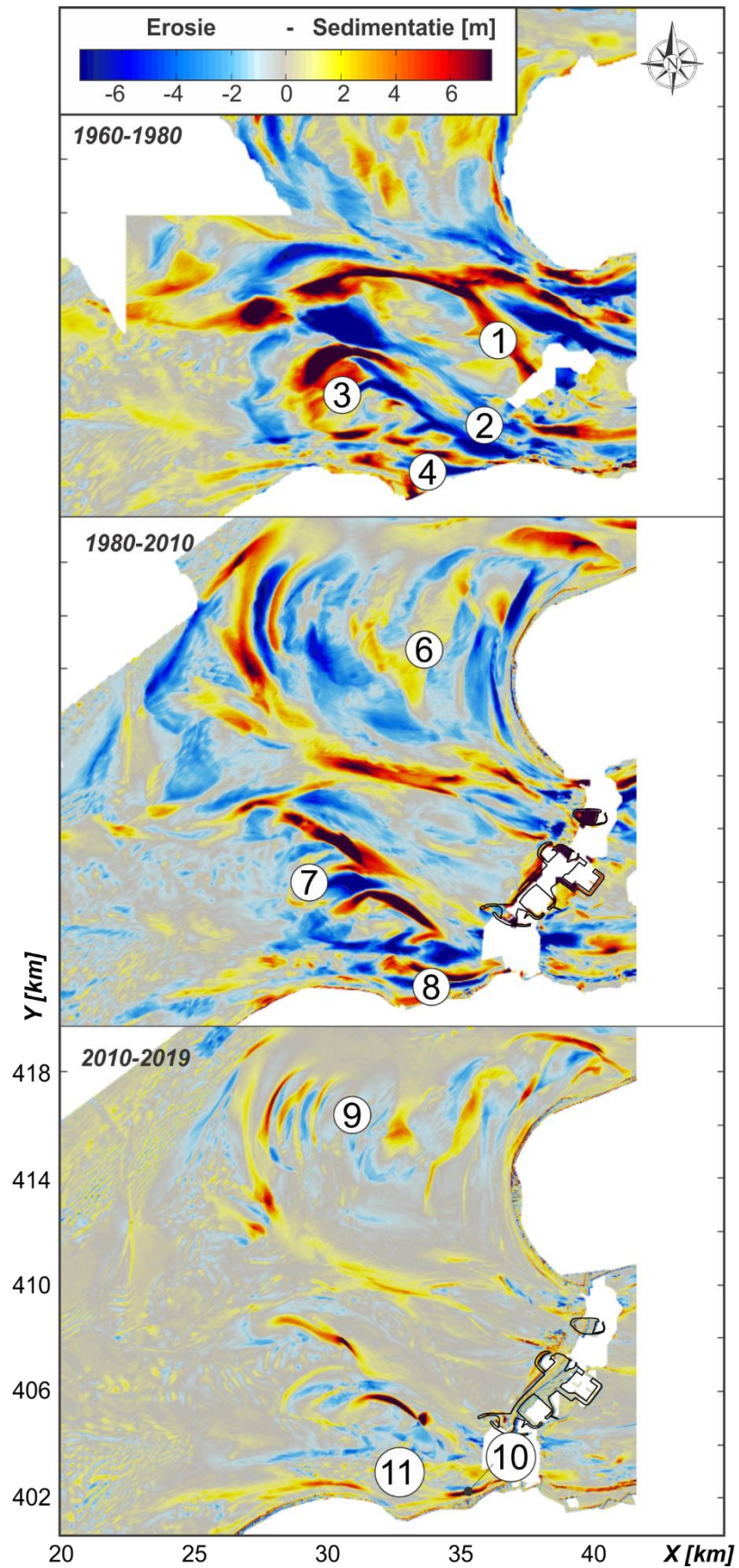
Hompels met 40 miljoen m³ in volume toenam (3). Voor de kust van Noord-Beveland is vooral de bijna 10 miljoen m³ erosie van de Geul van de Onrust van belang (4).

In vergelijking met de grote veranderingen in de Haringvliet- en Grevelingenmonding (Elias en van der Spek (2015) zijn de veranderingen in de Oosterscheldemonding door de aanleg van de Oosterscheldekering beperkt (Figuur 2-4 1980-2010, Figuur 2-5, midden). Dit komt omdat er na aanleg nog een verbinding met het Oosterscheldebekken blijft. Dit houdt zowel het noordelijk als zuidelijk geulensysteem op hoofdlijnen in stand. Wel is de sedimenttoevoer duidelijk gereduceerd. De volumeverandering van de monding over de periode 1980-2010 vertoont dan ook een tegengesteld beeld met de periode 1960-1980 (Figuur 2-5, midden). Over het totale gebied is er een afname in sedimentvolume van bijna -150 miljoen m³. Het grootste deel van de afname, ~90 miljoen m³, vond plaats op de Banjaard (6) en de Hompels (7). In de periode 1960-1980 was het noordelijke gedeelte van de Banjaard nog vooral aanzandend, maar sinds 1980 vindt hier vooral een herverdeling van sediment plaats.

Langs de kust van Noord-Beveland blijft de erosie door Schaar van Onrust domineren (-8 miljoen m³, zie 8 in Figuur 2-5). De afwisselende patronen van erosie, sedimentatie en erosie laten zien dat deze erosie samenhangt met het zuidelijk verplaatsen van zowel de geul en naastliggende bank. Dit wordt in hoofdstuk 2.2.2 in meer detail beschouwd.

De morfologische veranderingen over de periode 2010-2019 lijken beperkt. In tegenstelling tot voorgaande periode nemen nu de volumes toe; in totaal met bijna 40 miljoen m³ (Figuur 2-5, onder). De grootse toename treedt op in het Westgat en de geul van de Banjaard. Op het bankengebied van de Banjaard (9) is vooral een landwaartse verplaatsing van de banken en geulen te zien. Dit resulteert in elkaar afwisselende gebieden van sedimentatie en erosie.

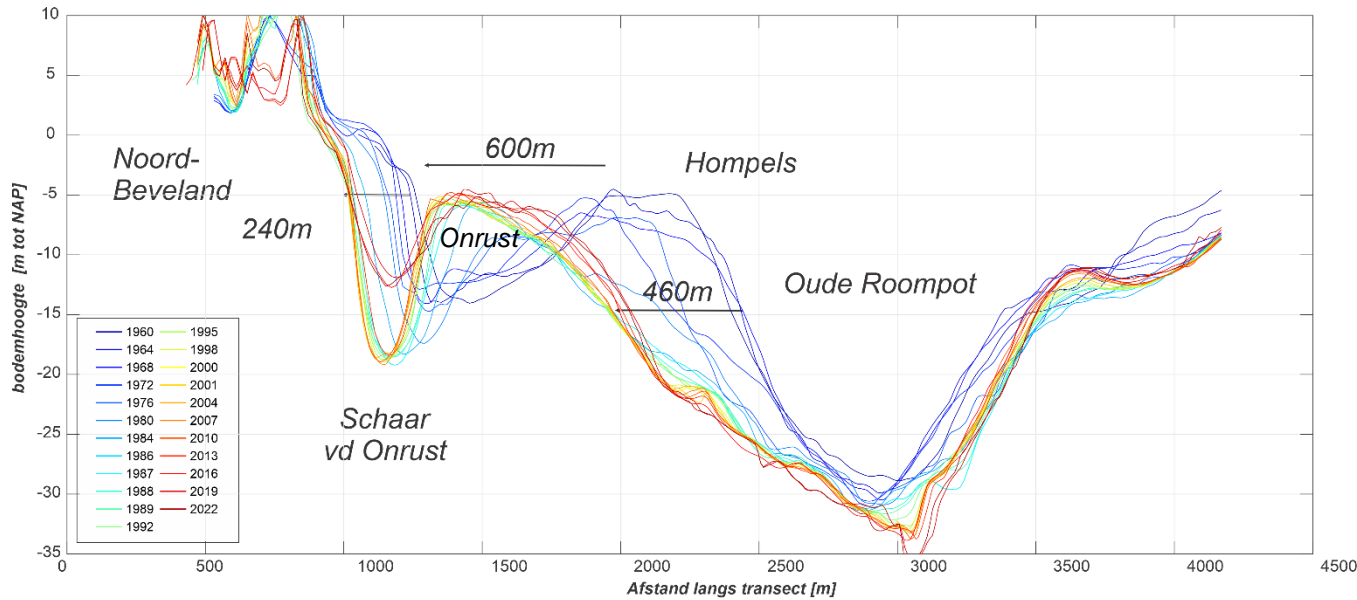
Nabij Noord-Beveland is een grote aanzanding zichtbaar in de Schaar van Onrust (10). Deze aanzanding komt door de in 2013 aangelegde geulwandsuppletie. Ook langs de noordkust van Walcheren (11) is over het algemeen aanzanding te zien. De voorliggende Roompot Zuid wordt aan de landzijde ondieper. Alleen ter plaatse van Breezand is een klein gebied van lokale erosie zichtbaar.



Figuur 2-5: Overzicht van de grootschalige morfologische veranderingen 1960-1980, 1980-2010 en 2010-2019.

2.2.2 Ontwikkeling van het drempelgebied tussen Oude Roompot en Roompot Zuid

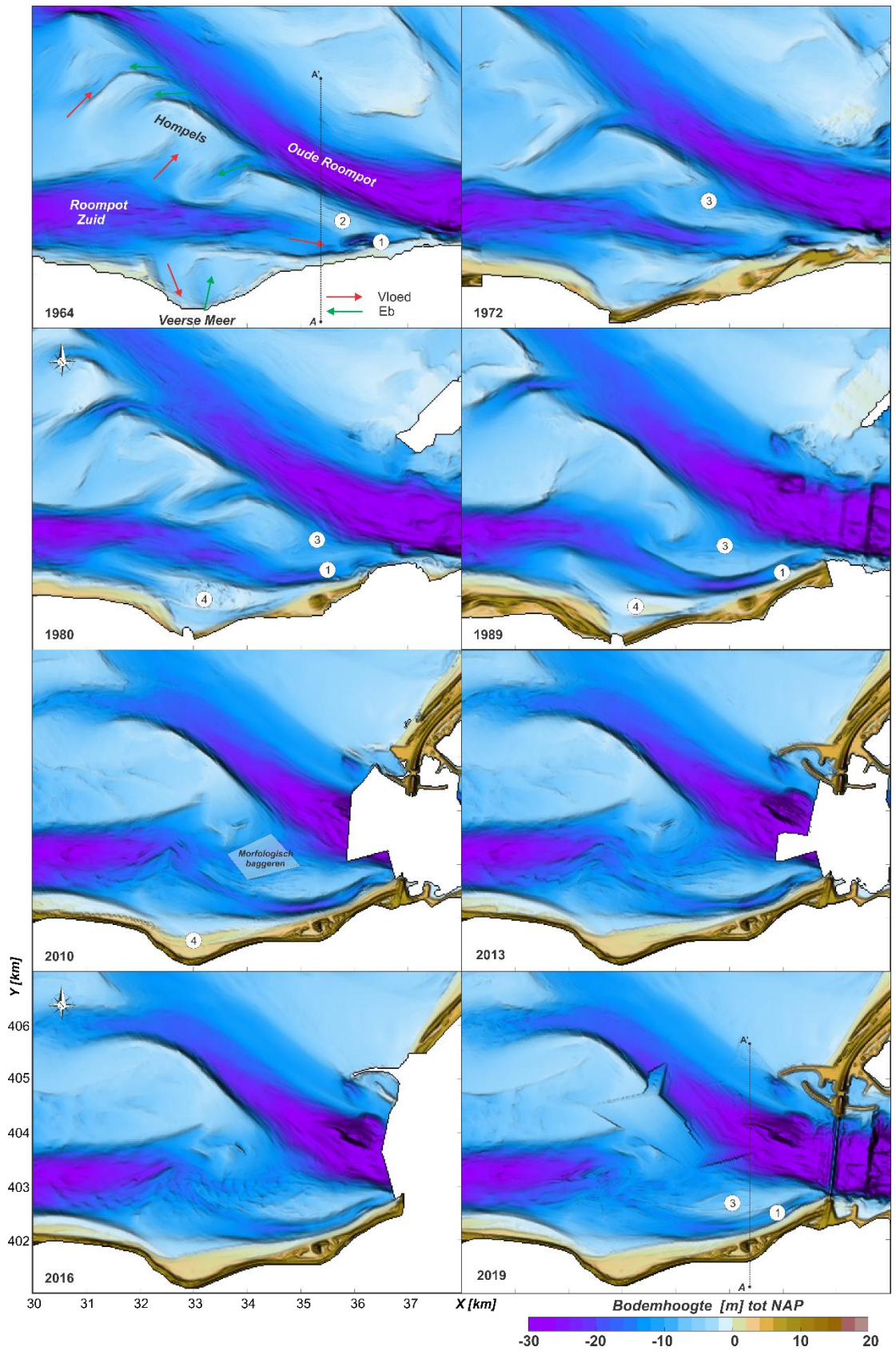
De kustlijn van Noord-Beveland wordt vooral beïnvloed door de morfologische ontwikkeling van de voorliggende Onrust en Schaar van Onrust. De Schaar van Onrust wordt onder de invloed van het zuidelijke deel van de Hompels zuidwaarts de kust ingedrukt (Figuur 2-6 en Figuur 2-7). Dwarsdoorsnede A-A' getrokken vanaf de kust van Noord-Beveland tot op de bank Noordland geeft een goed overzicht van de verplaatsingen en diepte ontwikkeling van de geul. Het zuidelijke deel van de Hompels wordt ook wel Onrust genoemd.



Figuur 2-6: Overzicht van de bodemligging in de Oosterscheldedemonding in de jaren 1964 -2019 voor raai A-A' (zie Figuur 2-7 voor ligging).

In 1964 vormt de Hompels nog een langgerekte ondiepe bank langs de zuidzijde van de Oude Roompot. Op de bank zijn diverse schaartjes te onderscheiden. Sommige van deze schaartjes zijn duidelijk eb- of vloeddominant. Zeewaarts is Hompels breed en relatief ondiep, richting de Oosterscheldedemonding wordt de bank de bank smaller en vormt hier een drempel, een scheiding, tussen de Oude Roompot en de Roompot Zuid. Tussen de zuidelijke punt van de Hompels (zie 2 in Figuur 2-7, 1964) en de kust van Noord-Beveland bevindt zich een kleine geul, met lokaal waarschijnlijk een ontgrondingskuil (zie 1 in Figuur 2-7 1964). Dit geultje is vloed gedomineerd en ontstaat doordat een deel van het getij tussen de zuidelijke punt van de Hompels en de kust van Noord-Beveland wordt gedrukt.

De ontwikkeling van de kust van Noord-Beveland wordt sterk gestuurd door de vorming van een ebschaar op de zuidelijke punt van de Hompels (3). Deze ebschaar ontstaat tussen 1972 en 1989. De bijbehorende bank verplaatst zich, onder druk van deze ebschaar, langzaam zuidelijk. Deze bank wordt Onrust genoemd (zie 3 in Figuur 2-7, 2019) . De Schaar van Onrust wordt daardoor steeds smaller en dieper. Een diepe, langgerekte geul vormt zich langs de kust van Noord-Beveland. Deze geul is een belangrijke oorzaak van het smalle strand en de optredende erosie. In 2019 ligt de geulbodem van de Schaar van Onrust hoger dan in de 2013. Dit is het gevolg van de geulwandsuppletie die in 2013 is uitgevoerd. De geulwandsuppletie uitgevoerd in 2013 verkleint dan de geuldiepte tot -12 m NAP in de 2019 bodemopname.



Figuur 2-7: Overzicht van de bodemligging in de Oosterscheldemonding in de jaren 1964 -2019.

2.3 Morfologische ontwikkeling kustzone

Figuur 2-8 geeft de morfologische veranderingen van de kustzone aan de hand geselecteerde Jarkus grids van een aantal jaren weer. De Jarkus zone strekt zich uit van ruwweg de duinvoet (kaarten tot 1990) of de landwaartse zijde van de eerste duinenrij (kaarten vanaf 1990) tot een kleine kilometer zeewaarts. De metingen zijn vrijwel jaarlijks beschikbaar sinds 1964, alhoewel de oudere datasets (1964-1990) niet altijd geheel dekkend gemeten zijn. Een gelijkwaardige dekking is echter wel essentieel voor het berekenen van de volumeveranderingen. Per jaar zijn de missende datapunten daarom ingevuld met de gegevens van het eerstvolgende jaar waarin deze data beschikbaar is. De morfologische veranderingen bevestigen het beeld dat vanuit de analyse van de Vaklodgingen (H2.2) ontstaat. De erosie van de kustzone concentreert zich tussen raai 200 en 400 doordat hier de Onrust en de geul van de Onrust zuidelijk verplaatsen.

Analyse van deze jaarlijkse metingen geeft een gedetailleerd beeld van de volumeverandering van de kustzone. Hiervoor is de kustzone in deze studie onderverdeeld in 3 deelgebieden (Veerse Gatdam: raai 360 – 520, Banjaardstrand: raai 180 – 340 en Oosterscheldekering: raai 120 – 160); zie Figuur 2-9. Voor ieder deelgebied is de volumeverandering van de kustzone bepaald over de periodes 1965-2022 en 1990-2022 (Figuur 2-10), 1990 – 2013 2014-2022 (Figuur 2-11). De volumes zijn geaggregeerd over 3 deelgebieden: duinzone, strand-geulwand zone en vooroever. De duinzone is hier de zeereep (eerste duinenrij) tot +3m NAP. De strand-geulwand zone is hierbij gedefinieerd als de zone tussen de +3m NAP (duinvoet) en punt met maximale geuldiepte (in het studiegebied sinds 1965 variërend tussen -18 en -8m NAP). De vooroever is de kustzone zeewaarts van het punt met maximale geuldiepte tot de zeewaartse grens van het profiel. De locatie van de maximale geuldiepte is per raai, voor elk jaar bepaald. Deze begrenzing tussen de deelpolygonen strand-geulwand en vooroever kan dus variëren in de tijd (Figuur 2-12). Deze begrenzing maakt het goed mogelijk de morfologische effecten van de 2013 geulwandsuppletie te kwantificeren. De volumes zijn per zone bepaald voor elke Jarkus-raai, in Bijlage A is de volumeontwikkeling per raai te zien. In deze paragraaf (en voor Figuur 2-10 tot en met Figuur 2-16) zijn de volumes van de raaien geaggregeerd per deelgebied. Voor alle volumes is 1990 als referentiejaar aangehouden.

Veerse Gatdam (raaien 360 – 520)

In de periode tot 1990 wordt de kustzone ter hoogte van de Veerse Gatdam gedomineerd door de afsluiting van het Veerse Gat. De banken op de buitendelta van het Veerse Gat verplaatsen zich landwaarts tussen 1965 en 1990 (Figuur 2-8). Het volume van de totale kustzone tussen raaien 360 – 520 neemt in deze periode af met $-4,70 \text{ Mm}^3$ (Figuur 2-10 en Figuur 2-13), voornamelijk in de vooroever door de opdringende Schaar van Onrust (Figuur 2-8).

Rond 1988 wordt een minimum in het sedimentvolume bereikt en sindsdien nemen de volumes vrijwel lineair toe. In totaal is het sedimentvolume van de kustzone tussen 1990 en 2022 toegenomen met $+2,14 \text{ Mm}^3$ (Figuur 2-13). Deze volumetoename gaat gepaard met een zeewaartse groei en een verhoging van het strand (Figuur 2-11). Deze toename is op zich niet verrassend. Na afsluiting van het Veerse Meer verplaatsen de banken van de voormalige buitendelta zich landwaarts en de kromming van de kust zorgt hier voor een luwtegebied waar veel aanzanding kan optreden. Naast het landwaarts verplaatsen van banken speelt ook de aanvoer van zand vanuit de westelijk gelegen kustzone een rol. De frequente suppleties ten behoeve van het BKL-onderhoud spelen waarschijnlijk een rol in het aanvoeren van zand vanuit Walcheren. Ook dit zand kan in het luwte gebied makkelijk bezinken. De tijdseries van volumeontwikkeling (Figuur 2-13) laten geen direct effect van de 2013 geulwandsuppletie op de zandvolumes in dit deelgebied zien. De erosie van deze suppletie was beperkt en het netto transport is oostelijk gericht.

Banjaardstrand (raaien 180 – 340)

De tijdserie van volumeontwikkeling (Figuur 2-14) laat een vergelijkbaar beeld zien als in het deelgebied Veerse Gatdam, waarbij erosie domineert tot 1990 en sedimentatie sindsdien. Tussen 1965 en 1990 nam het volume van de strand-geulwand zone met meer dan 4 Mm³ af (Figuur 2-10), terwijl de vooroever juist iets in volume toeneemt (+0,77 Mm³). Deze toename vindt vooral plaats na 1980. Deze tegengestelde ontwikkeling komt door de verplaatsing van Onrust en de naastgelegen bank. De geulverplaatsing domineert de strand-geulwand zone, terwijl de bankverplaatsing zichtbaar is in de volumes van de vooroever.

In de periode 1990-2013 verplaatst de Onrust nog steeds zuidelijk richting de kust (Figuur 2-8). De geul wordt dan steeds smaller en dieper en ook de strandzone wordt smaller. Het sedimentvolume in de vooroever neemt met 1,15 Mm³ toe (Figuur 2-11) en ondanks de geulverplaatsing en verdieping neemt het sedimentvolume in de strand-geulwand zone toe met 0,23 Mm³. Deze toename komt doordat de erosie gecompenseerd wordt door 1.79 Mm³ aan strandsuppleties tussen 1990 en 2013 (Figuur 2-11). Gecorrigeerd voor dit suppletievolume zou de strand-geulwand zone -1,55 Mm³ aan sediment hebben verloren. Het merendeel van dit sediment wordt kustlangs afgevoerd door de grote getijstromingen in de geul. Een klein deel wordt door wind-gedreven transport landwaarts verplaatst, waardoor de duinvolumes met 0,34 Mm³ toenemen.

Na aanleg van de geulwandsuppletie in 2013 is er een sprong in sedimentvolume zichtbaar (Figuur 2-14). In de vooroever blijven de sedimentvolumes ook na aanleg nog iets toenemen (+0,30 Mm³). In de dwarsprofielen is echter wel te zien dat de landwaartse verplaatsing van de Onrust stopt en de hoogte van de Onrust afneemt door verflauwing van de zeewaartse geulwand aan de noordzijde (zie H2.4.2). Aan de landwaartse zijde vertoont de geulwand ook een verflauwing. Deze verflauwing van beide geulwanden, eigenlijk het breder worden van de geul bovenin het profiel, en erosie van de suppletie zelf verklaren de geobserveerde gelijkblijvende erosiesnelheid van de strand-geulwand zone. Gecorrigeerd voor de suppleties bedroeg de erosiesnelheid -0,07 Mm³/jaar (-1,55 Mm³ over 23 jaar) in de periode 1990-2013. Sinds 2013 bedraagt de snelheid -0,09 Mm³/jaar (-0,72 Mm³ in 8 jaar). De gemiddelde erosiesnelheid per jaar is daarmee nagenoeg gelijk in beide onderzochte periodes.

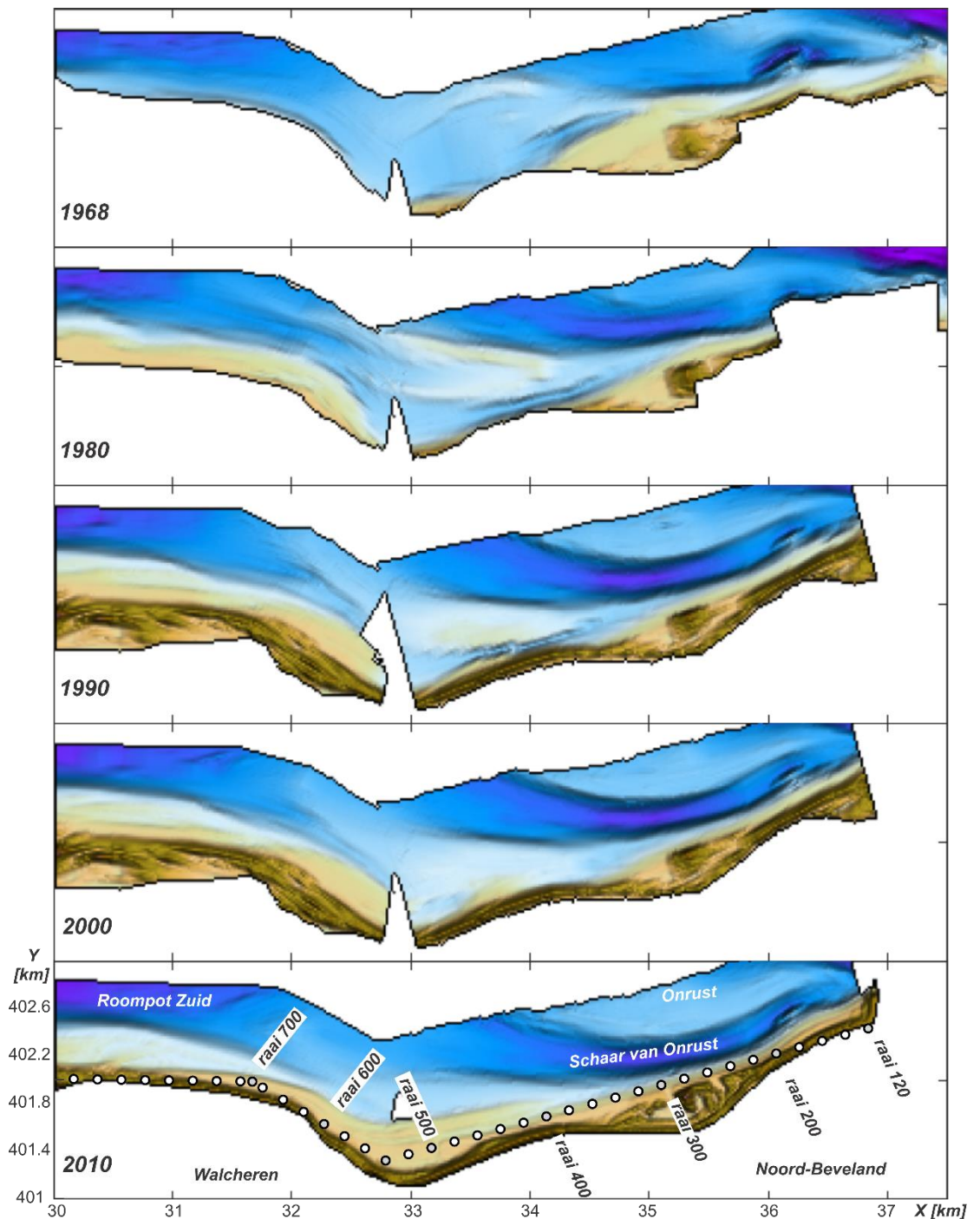
Oosterscheldekering (raaien 120 – 160)

Het deelgebied Oosterscheldekering vertoont een andere volumeontwikkeling dan het naastgelegen vak. Sinds 1978 is er een vrijwel constante toename in sedimentvolume te zien over de gehele kustzone (Figuur 2-10 en Figuur 2-15). De duin- en strandzones bouwen zich zeewaarts uit, waardoor de Schaar van Onrust tussen raaien 120 – 160 ondieper wordt en zeewaarts verplaatst. Ook de vooroever ter hoogte van deze raaien neemt geleidelijk in volume toe, +0,30 Mm³ over periode 1990 – 2013 en 0,23 Mm³ toename sinds 2014 (Figuur 2-11). De toename in sedimentvolume wordt veroorzaakt doordat de damaanzet van de Oosterscheldekering een luwtegebied heeft gecreëerd wat kan opvullen met sediment. Deze opvulling is vergelijkbaar met het opvullen van het strand naast havenhoofden. De frequente strandsuppleties die westelijk zijn uitgevoerd zullen zeker bijgedragen hebben als sedimentbron voor de opvulling.

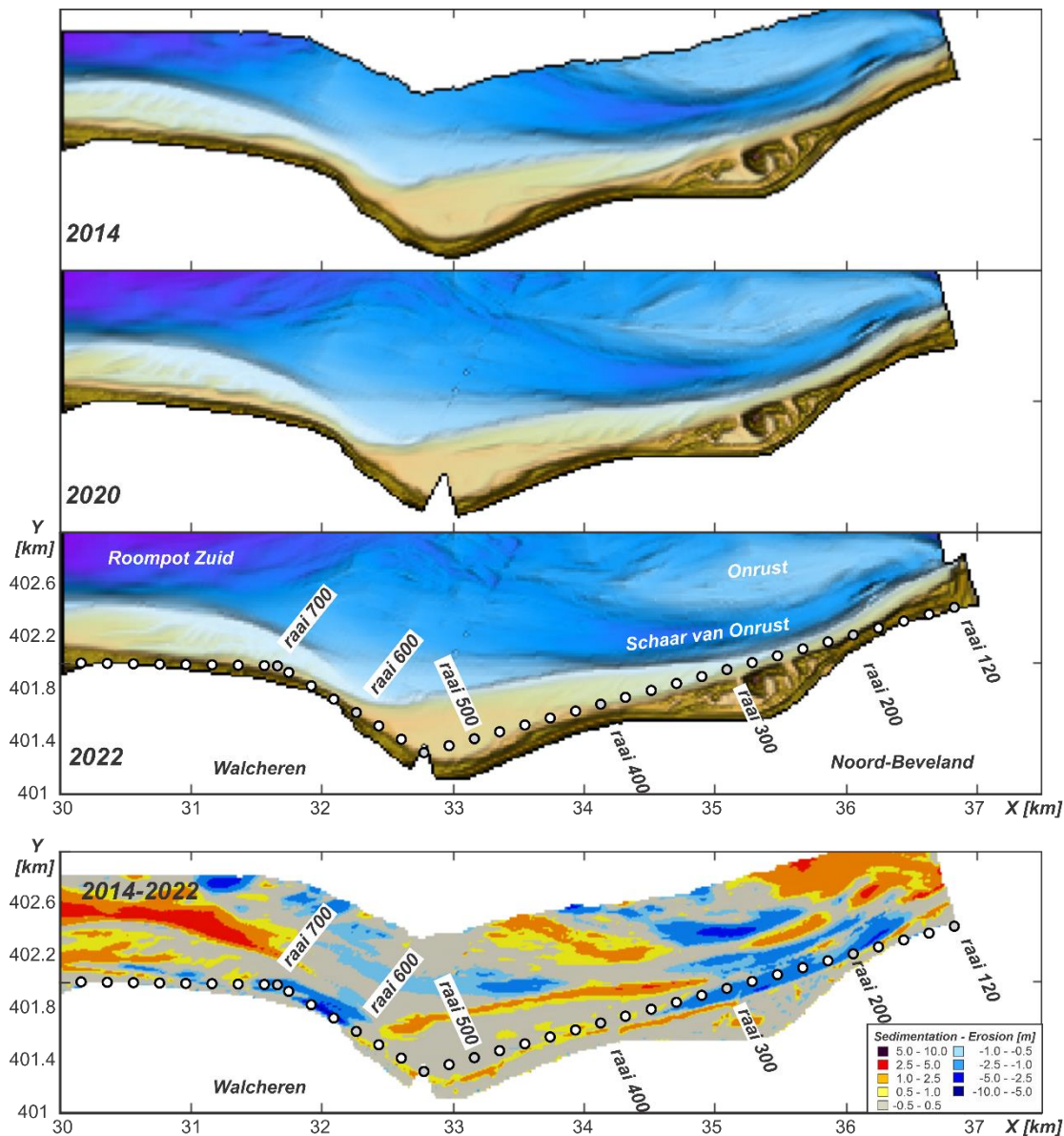
Totale balans Noord-Beveland (raaien 120-520)

Het sedimentvolume van het gehele kustvak is in 1965 en 2022 vrijwel gelijk, maar dit geeft geen representatief beeld van het gedrag van het kustvak. Tot 1990 was er een sterk erosieve trend (Figuur 2-16). De volumes namen af met -7,08 Mm³ tussen 1965 en 1990 (-0,28 Mm³/jaar) door erosie nabij de Veerse Gatdam en het Banjaardstrand. Sinds 1990 is er dan een trend van volumetoename zichtbaar van +4,15 Mm³ tot 2013 (+0,18 Mm³/jaar). Dit is over het algemeen een geleidelijke toename. In 2013 vindt een sprong in sedimentvolume plaats door aanleg van de geulwandsuppletie, waarna de sedimentvolumes weer geleidelijk verder toenemen tot 2022. Het lijkt waarschijnlijk dat ook na 2022 de volumes zullen blijven toenemen.

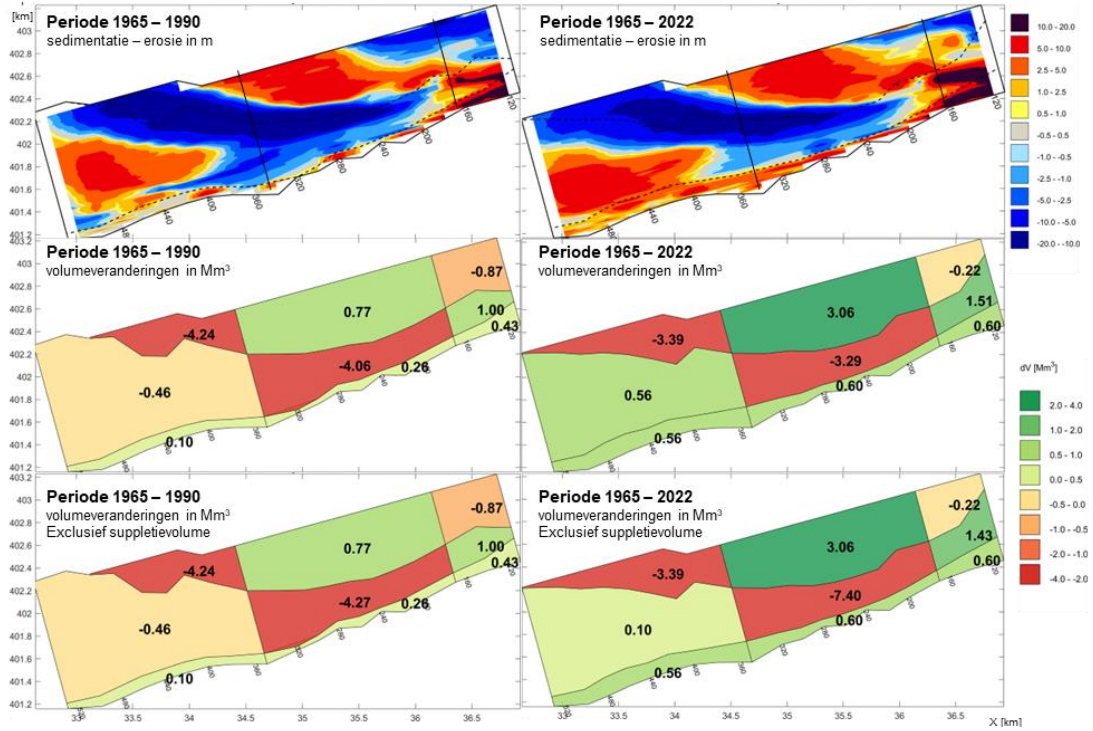
De uitgevoerde suppleties (4,65 Mm³) vormen een significant deel van de toename in sedimentvolume. Zonder deze suppleties was de sedimentatie van met name het deelgebied Banjaardstrand niet opgetreden.



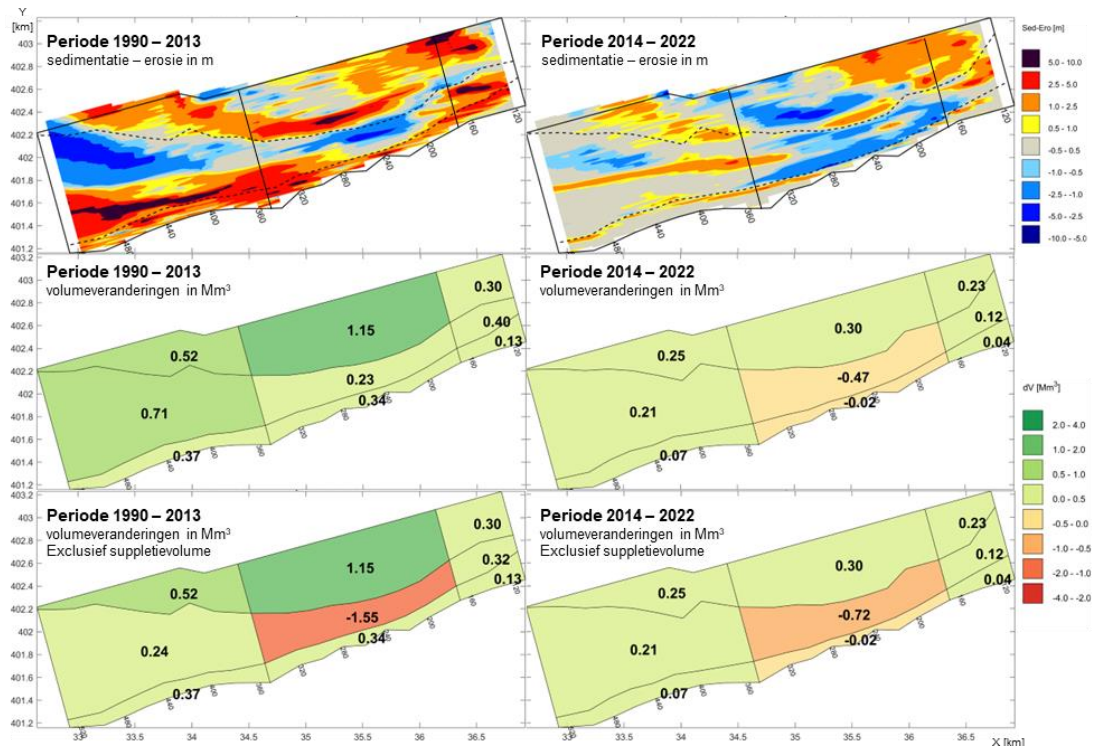
Figuur 2-8: Ontwikkeling van de kustzone tussen raai 120 en raai 800 over de periode 1968 en 2010 door middel van de Jarkus grids voor de jaren 1968, 1980, 1990, 2000 en 2010.



Figuur 2-9: Ontwikkeling van de kustzone tussen raai 120 en raai 800 in de jaren 2014, 2020 en 2022. Onderste paneel geeft de sedimentatie-erosie patronen weer over de periode 2014-2022 (na de geulwandsuppletie van 2013).

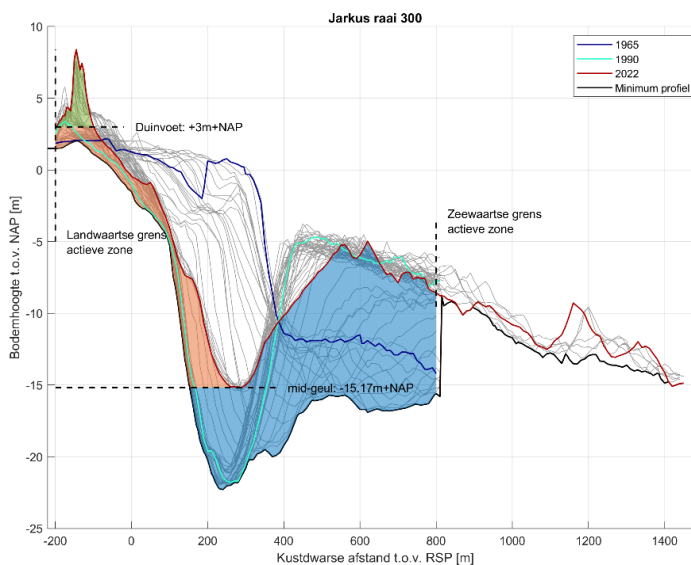


Figuur 2-10 Volumeveranderingen bij Noord-Beveland op basis van de Jarkus-data over periode 1965 – 1990 (links) en 1965 – 2022 (rechts). Het kustvak is opgedeeld in box Veerse Gatdam (raai 360 – 520), Banjaardstrand (raai 180 – 340) en Oosterscheldekering (120 – 160). Polygonen maken onderscheid tussen duin ($> +3m$ tov NAP), strand-geulwand ($+3m$ tot punt met maximale geuldiepte) en vooroever (vanaf punt met maximale geuldiepte tot zeevaartse grens van de raai). De getallen geven de volumeveranderingen aan in Mm^3 over de periode (midden) en de volumeveranderingen gecorrigeerd voor het gesuppleerde volume aangebracht in de periode (onder).

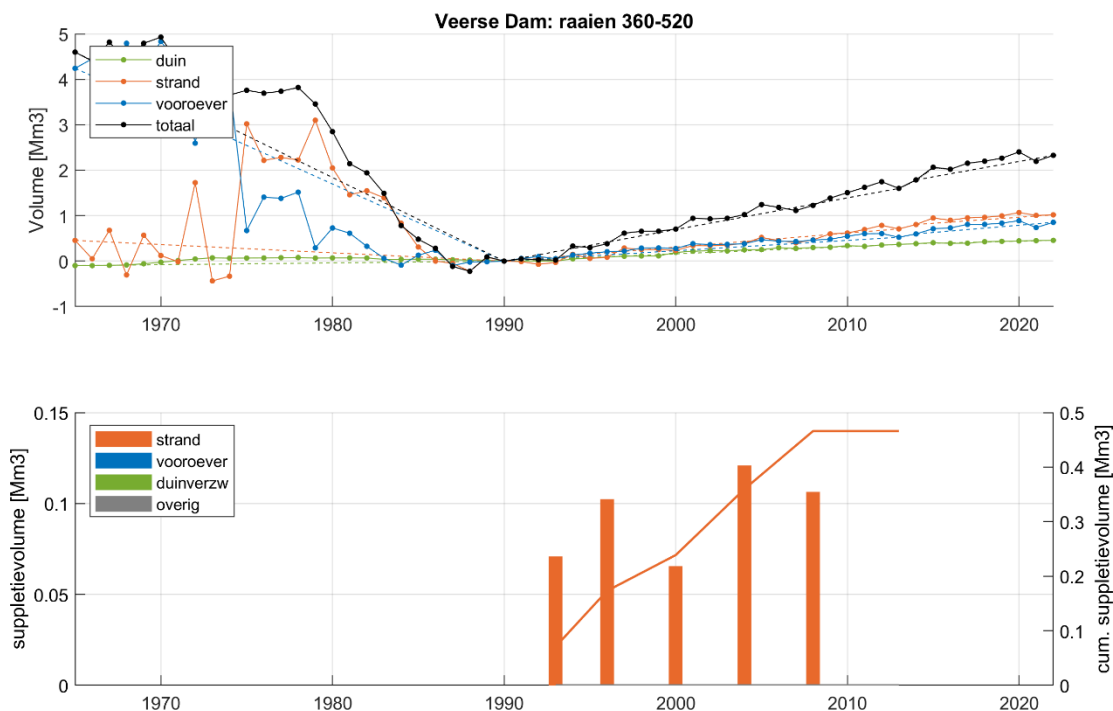


Figuur 2-11 Volumeveranderingen bij Noord-Beveland op basis van de Jarkus-data over periode 1990-2013 (links) en 2014-2022 (rechts, na de geulwandsuppletie van 2013). Het totale kustvak is opgedeeld in box Veerse Gatdam (raai 360 – 520), Banjaardstrand (raai 180 – 340) en Oosterscheldekering (120 – 160).

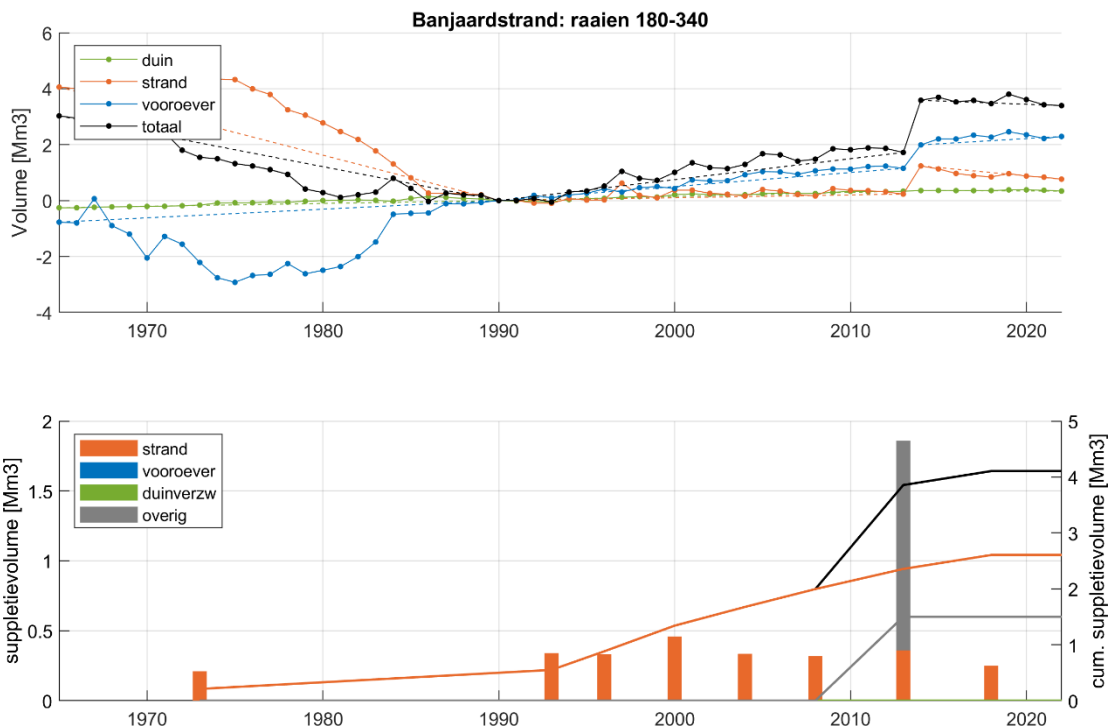
De polygonen maken onderscheid tussen duin (> +3m t.o.v. NAP), strand-geulwand (+3m tot punt met maximale geuldiepte) en vooroever (vanaf punt met maximale geuldiepte tot zeewaartse grens van de raai). De getallen geven de volumeveranderingen aan in Mm³ over de periode (midden) en de volumeveranderingen gecorrigeerd voor het gesuppleerde volume aangebracht in de periode (onder).



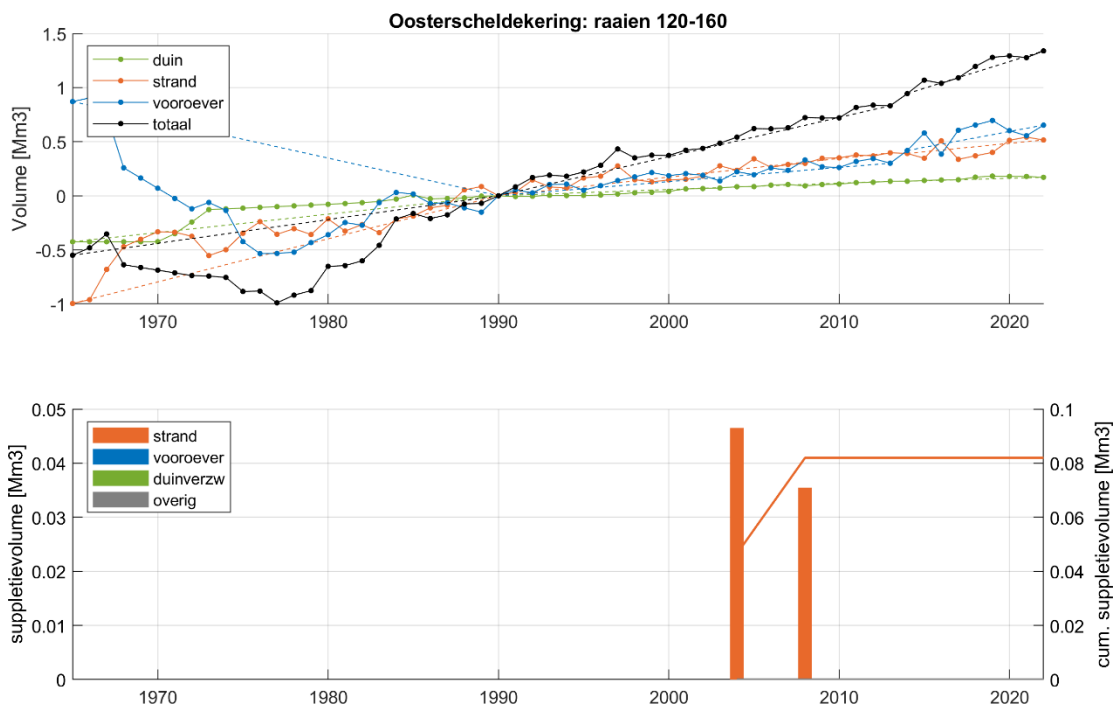
Figuur 2-12 Illustratie methode berekenen volumes uit Jarkus-raaien voor raai 300 bij Noord-Beveland. Dwarsprofielen alle jaren (grijze lijnen) met uitgelicht 1965 (blauwe lijn), 1990 (cyaan), 2022 (rode lijn) en minimum bodemprofiel over de periode 1965 – 2022 (donker grijze lijn). Zones voor volumes voor duin (> +3m in groene vlak), strand-geulwand (+3m tot punt met maximale geuldiepte, in oranje vlak) en vooroever (vanaf punt met maximale geuldiepte tot zeewaartse grens van de raai, in blauwe vlak).



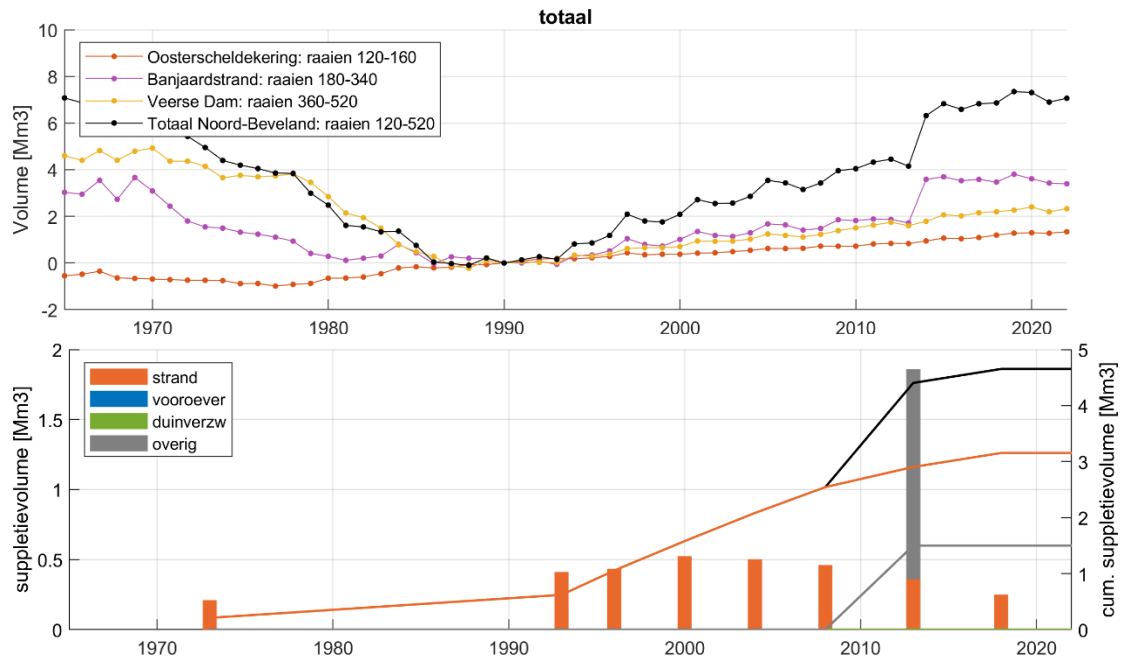
Figuur 2-13: Volumeveranderingen (boven) en suppletievolumes (onder) tussen raaien 360 – 520 bij Veerse Gatdam. Onderscheid wordt gemaakt tussen duin (groen, > +3m tov NAP), strand-geulwand (oranje, van de +3m tot het midden van de geul), vooroever (blauw, vanaf midden van de geul tot einde van de Jarkusraai) en totaal (grijs). Suppletievolumes uitgevoerd tussen deze raaien zijn weergegeven per type suppletie (balken, linker as) en cumulatief (lijn, rechter as).



Figuur 2-14: Volumeveranderingen (boven) en supplementevolumes (onder) tussen raaien 180 – 340 bij Banjaardstrand. Onderscheid wordt gemaakt tussen duin (groen, > +3m tov NAP), strand-geulwand (oranje, van de +3m tot het midden van de geul), vooroever (blauw, vanaf midden van de geul tot einde van de Jarkusraai) en totaal (grijs). Supplementevolumes uitgevoerd tussen deze raaien zijn weergegeven per type suppletie (balken, linker as) en cumulatief (lijn, rechter as). De geulwandsuppletie valt onder “overig” (grijze balken).



Figuur 2-15: Volumeveranderingen (boven) en supplementevolumes (onder) tussen raaien 120 – 160 bij Oosterscheldekering. Onderscheid wordt gemaakt tussen duin (groen, > +3m tov NAP), strand-geulwand (oranje, van de +3m tot het midden van de geul), vooroever (blauw, vanaf midden van de geul tot einde van de Jarkusraai) en totaal (grijs). Supplementevolumes uitgevoerd tussen deze raaien zijn weergegeven per type suppletie (balken, linker as) en cumulatief (lijn, rechter as).

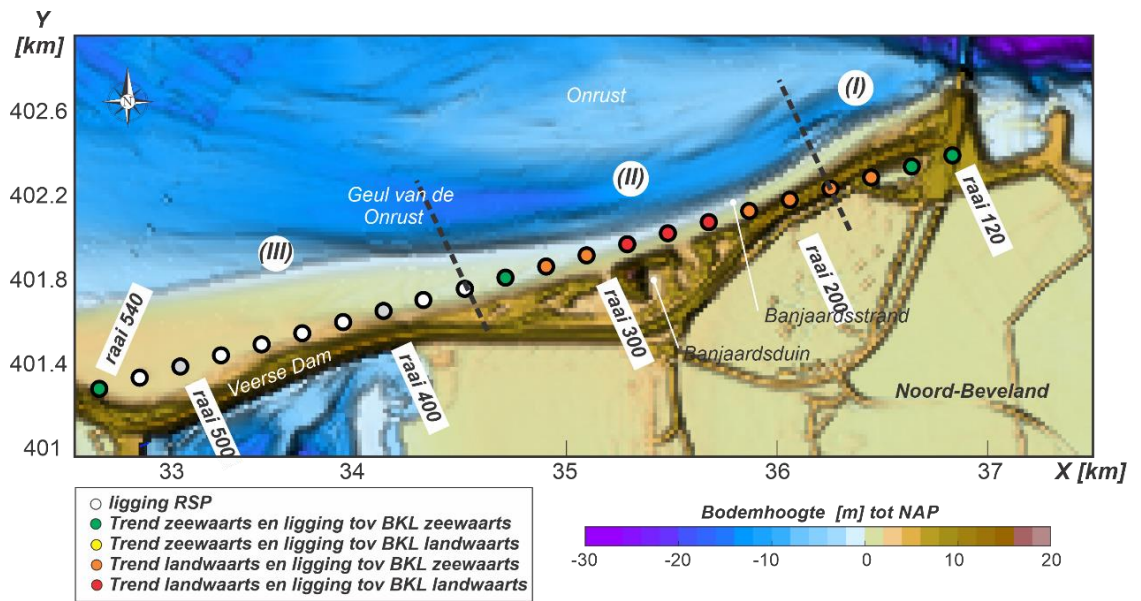


Figuur 2-16: Volumeveranderingen van de totale kustzone (boven) en suppletievolumes (onder) tussen raaien 120 – 520 bij Noord-Beveland. Onderscheid wordt gemaakt tussen Oosterscheldekering (rood), Banjaardstrand (paars), Veerse Gatdam (geel) en totaal Noord-Beveland (grijs). Suppletievolumes uitgevoerd tussen deze raaien zijn weergegeven per type suppletie (balken, linker as) en cumulatief (lijn, rechter as). De geulwandsuppletie valt onder “overig” (grijze balken).

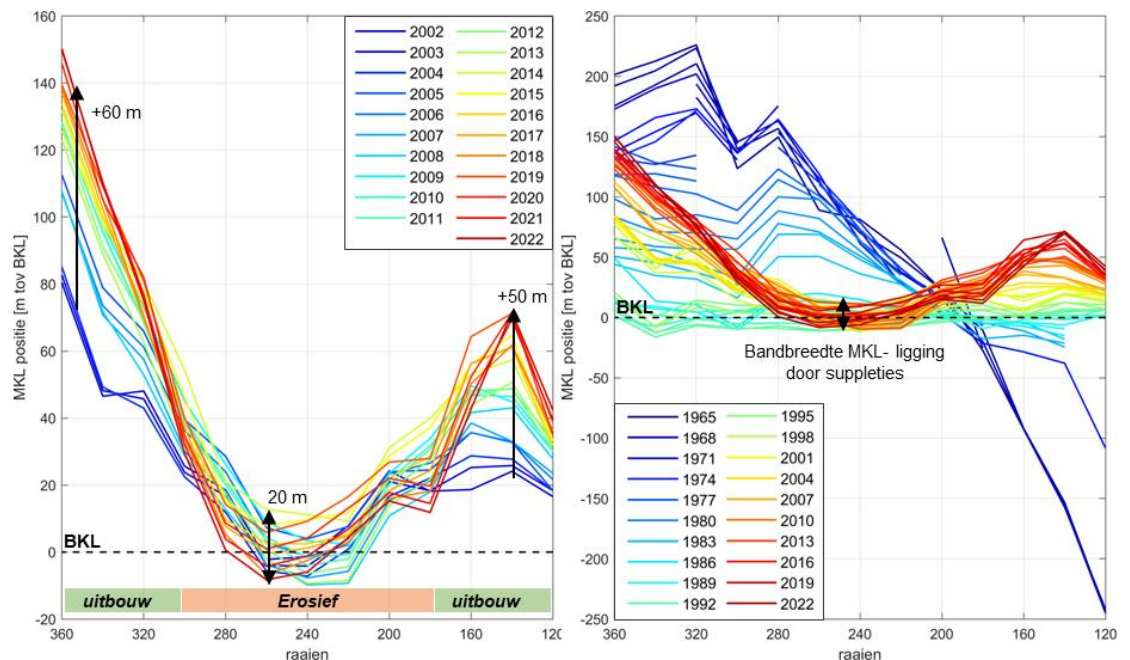
2.4 Analyse van de kustindicatoren en individuele kustlijnprofielen

Het kustvak Noord-Beveland strekt zich uit vanaf de Oosterscheldekering, raai 120, tot en met raai 520 bij de Veerse Gatdam (Figuur 2-17). De Schaar van Onrust ligt dicht op de kust en zorgt voor een minimale strandbreedte tussen raai 180 en 360. Op basis van de MKL (Figuur 2-18) kan de kustzone in een drietal zones onderverdeeld worden:

- Zone I (raai 120-180): overgang naar de Oosterscheldekering. Hier ligt de geul iets verder uit de kust en is het strand breder. In dit gebied zandt de kust aan;
- Zone II (raai 180-360): hier ligt de geul dicht op de kust waardoor het strand zeer smal is. In dit gebied vindt het merendeel van de suppleties plaats;
- Zone III (raai 380-540) hier is geen BKL gedefinieerd.



Figuur 2-17: Overzicht van de kust van Noord-Beveland (raai 120-500). Alleen raaien 120-360 zijn toetsraaien.



Figuur 2-18: Een overzicht van de ontwikkeling van de MKL-ligging t.o.v. de BKL tussen raai 360 en 120 voor de periode 2002-2022 (links) en 1965-2022 (rechts).

Voor de analyse van de kustindicatoren is de vigerende BKL (1-1-2022) gebruikt. Bij de Herziening van de BKL 2023 wordt de BKL bij raaien 220, 240 en 260 herzien, en een BKL gedefinieerd tussen raaien 380 – 520. Het gebruik van de vigerende of herziene BKL heeft geen invloed op de analyse van de erosie bij Noord-Beveland. Frequente suppleties zullen nodig blijven om de erosieve processen te compenseren.

Dicht bij de Oosterschelde kering bouwt het volume in de MKL rekenschijf uit (deelgebied I). Deze uitbouw was een continu proces, maar in de recente metingen is er een omslag in de trend (Figuur 2-18, links). Sinds 2000 is de MKL bij raai 140 met 50 m zeewaarts verplaatst, maar vanaf 2018 is er een stabilisatie van de MKL positie. Bij raaien 160 en 180 is er sinds 2018 een erosieve trend in de MKL ligging te zien (ordegrootte 4 – 6 m/jaar). Het lijkt waarschijnlijk dat de overgang van de Oosterscheldekering naar de kust van Noord-Beveland hier voor een blokkade van de langstransporten zorgt. Aan de zeewaartse zijde vult de ruimte dan langzaam op met zand. Dit opvullen vindt plaats tot het einde van de blokkade bereikt wordt, daarna kan het zand de blokkade weer passeren en zal de kustlijn stabiliseren.

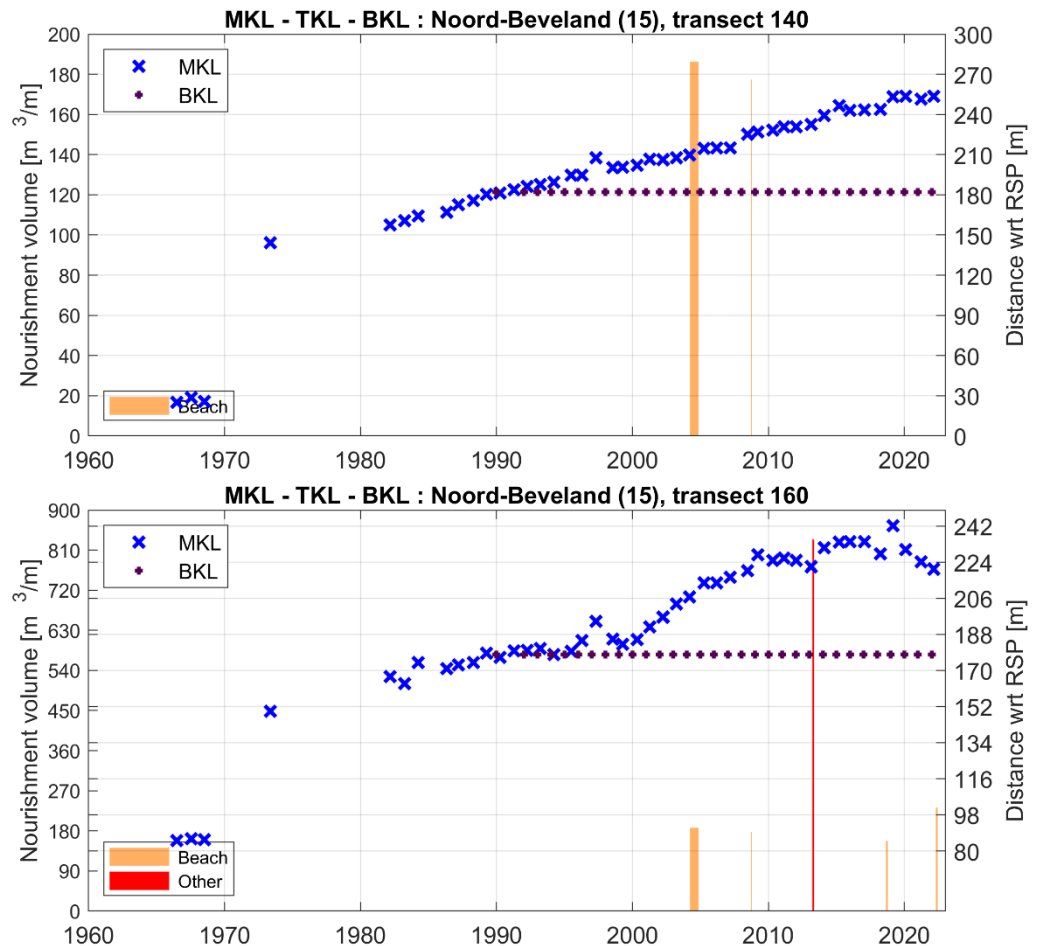
Vanaf raai 180 tot raai 360 (deelgebied II) is het strand smal en vindt er een overschrijding van de BKL plaats. Vanaf 1965 tot 1990 is de MKL hier sterk teruggetrokken tot ongeveer de huidige BKL positie (Figuur 2-18, rechts). Zonder suppleties zou deze terugtrekking zich doorgezet hebben, maar door intensief suppleren blijft de MKL binnen een bandbreedte van ongeveer 20 m rond de BKL positie fluctueren (Figuur 2-18, links). De ligging van de geul Schaar van Onrust zorgt ervoor dat het strandprofiel snel overgaat in de steile geulwand. Er is beperkte ruimte op het strand om het zand op een vlak gedeelte van het kustprofiel aan te leggen, waardoor er telkens een beperkt volume aangebracht kan worden. Om deze reden is het in de eerste paar jaar na een suppletie dan ook niet mogelijk om opnieuw (efficiënt) in te grijpen, omdat een deel van de vorige suppletie er dan nog ligt en er nog minder ruimte overblijft om een suppletie uit te voeren. In die jaren wordt echter de BKL wel overschreden, maar is het vanuit de morfologie van het kustprofiel niet mogelijk (efficiënt) te suppleren.

Westelijk van raai 360 (deelgebied III) ligt de Schaar van Onrust verder zeewaarts en kan het strand sterk uitbouwen. De aanleg van de Veerse Gatdam maakt deze uitbouw mogelijk. De voorliggende banken migreren landwaarts en worden tegen de dam aangedrukt. Hierdoor neemt het strand sterk in breedte toe. Sinds 2000 is de MKL hier met bijna 65m zeewaarts verplaatst.

In de volgende paragrafen wordt het gedrag in ieder van de zones in meer detail uitgewerkt aan de hand van geselecteerde raaien.

2.4.1 Ontwikkeling van deelgebied I (raai 120 – 180)

Het stukje strand gelegen tussen raai 120 en 180 vertoont een toename van de volumes in de kustzone, geïllustreerd door de MKL ontwikkeling van raai 140 (Figuur 2-19, boven). De MKL neemt hier sinds 1960 toe en de metingen vanaf 1982 geven een vrijwel lineaire stijging van de volumes. In 2020 ligt de MKL meer dan 50 m zeewaarts van de BKL. Een respons op de uitgevoerde suppleties, de meeste net ten westen van deze raai, is voor de recente jaren (strandsuppleties 2013 en 2018) te zien aan een sprong in de MKL. In de naastgelegen raai 160 is er vanaf 2018 een omslag in MKL-trend, van uitbouwend naar erosief (Figuur 2-19, onder).



Figuur 2-19: Ontwikkeling van de MKL van raai 140 en 160 tussen 1965 en 2022 (vóór uitvoering van de suppletie in 2022).

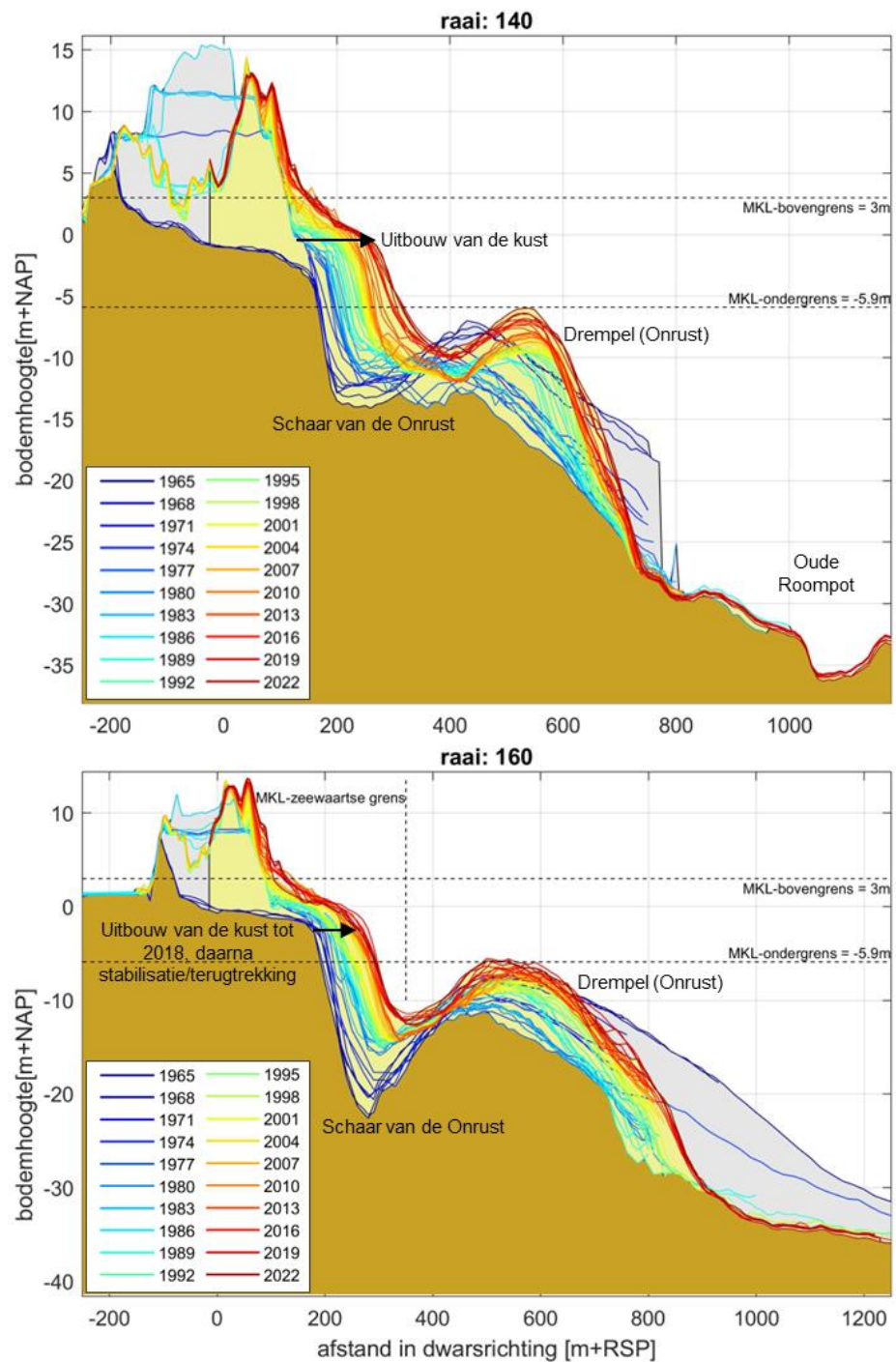
De uitbouwende kust in raai 140 is duidelijk terug te zien in de profielontwikkeling (Figuur 2-20, boven). Het dwarsprofiel bestaat uit twee delen. Het eerste, ondiepe, deel wordt gevormd door de overgang van de kust naar de geul Schaar van Onrust. Het zeewaartse, diepe, deel doorsnijdt de geul Oude Roompot. Als een scheiding tussen deze twee systemen is een drempel zichtbaar (onderdeel van de plaat Onrust).

De Oude Roompot vertoont, in het beperkt aantal metingen dat in dit deel beschikbaar is, vrijwel geen verandering beneden de -25 m NAP. In de Schaar van Onrust zijn juist grote veranderingen zichtbaar. Het gehele profiel, vanaf de duinvoet tot de -10 m NAP verplaatst zeewaarts. Ook de geul en de drempel verplaatsen mee. De verplaatsing van de landwaartse geulwand is vrijwel constant door de tijd.

De verplaatsingssnelheid van de drempel varieert over de tijd. Met name in de periode 1980-1990 bouwt de drempel sterk uit in zeewaartse richting (zie ook Figuur 2-10 en Figuur 2-15). Sinds 1990 is de zeewaartse verplaatsing kleiner en neemt vooral de hoogte toe tot -6m NAP. De zeewaartse verplaatsing van de drempel heeft tot gevolg dat een steile geulwand vormt tussen de -10 en -25 m NAP.

Met de zeewaartse verplaatsing van de drempel neemt ook de diepte van de Schaar van Onrust af, van -14 m in 1965 tot -10m in 2017-2022. De diepte was in de periode 2005-2013 vrij stabiel op -12 m NAP, maar na de geulwandsuppletie in 2013 werd een diepte van -10 m NAP bereikt. Na aanleg van de suppletie, verandert de diepte hier nauwelijks, wel blijft het gehele profiel in deze periode zeewaarts opschuiven.

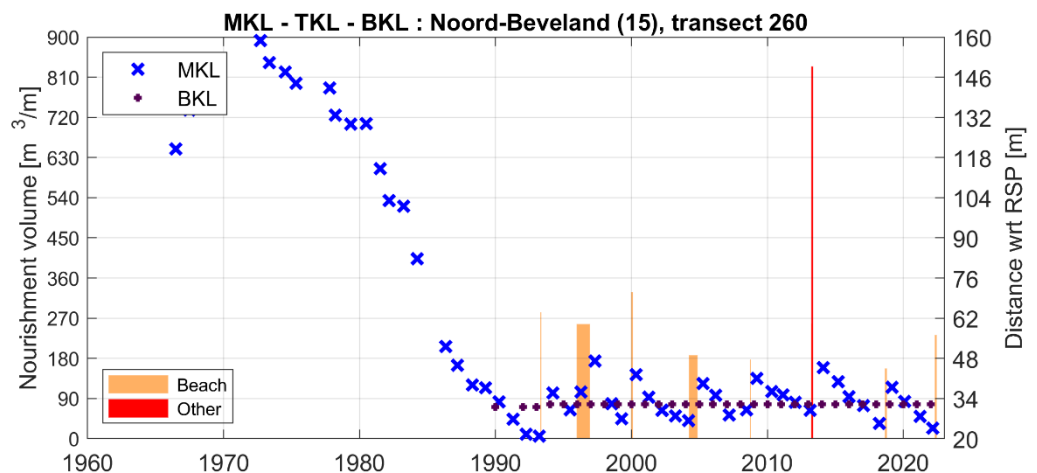
Voor raai 160 zijn de ontwikkelingen van de drempel en Schaar van Onrust vergelijkbaar met raai 140 (Figuur 2-20, onder). De diepte van de Schaar van Onrust neemt wel wat meer af van -21 m NAP in 1965 tot -11m NAP in 2022, en de drempel wordt voornamelijk hoger. Ook de uitbouwende kustzone is te zien, maar vanaf 2014 stabiliseert het profiel in de MKL-rekenshijf. Vanaf 2019 is er juist een duidelijke terugtrekking in MKL-positie te zien (Figuur 2-19, onder). Met name het bovenste deel van het profiel lijkt in volume af te nemen. Verflauwing van de geulwand en de afgenomen suppletie intensiteit ten westen van deze raai spelen hier mogelijk een rol in.



Figuur 2-20: Ontwikkeling van het dwarsprofiel van raai 140 (boven) en 160 (onder) tussen 1965 en 2022 (vóór uitvoering van de suppletie in 2022). Grize vlak geeft de omhullende van de maximum ligging, bruine vlak de minimum ligging en gele vlak de meest recente (2022) ligging.

2.4.2 Ontwikkeling van deelgebied II (raai 200 - 380)

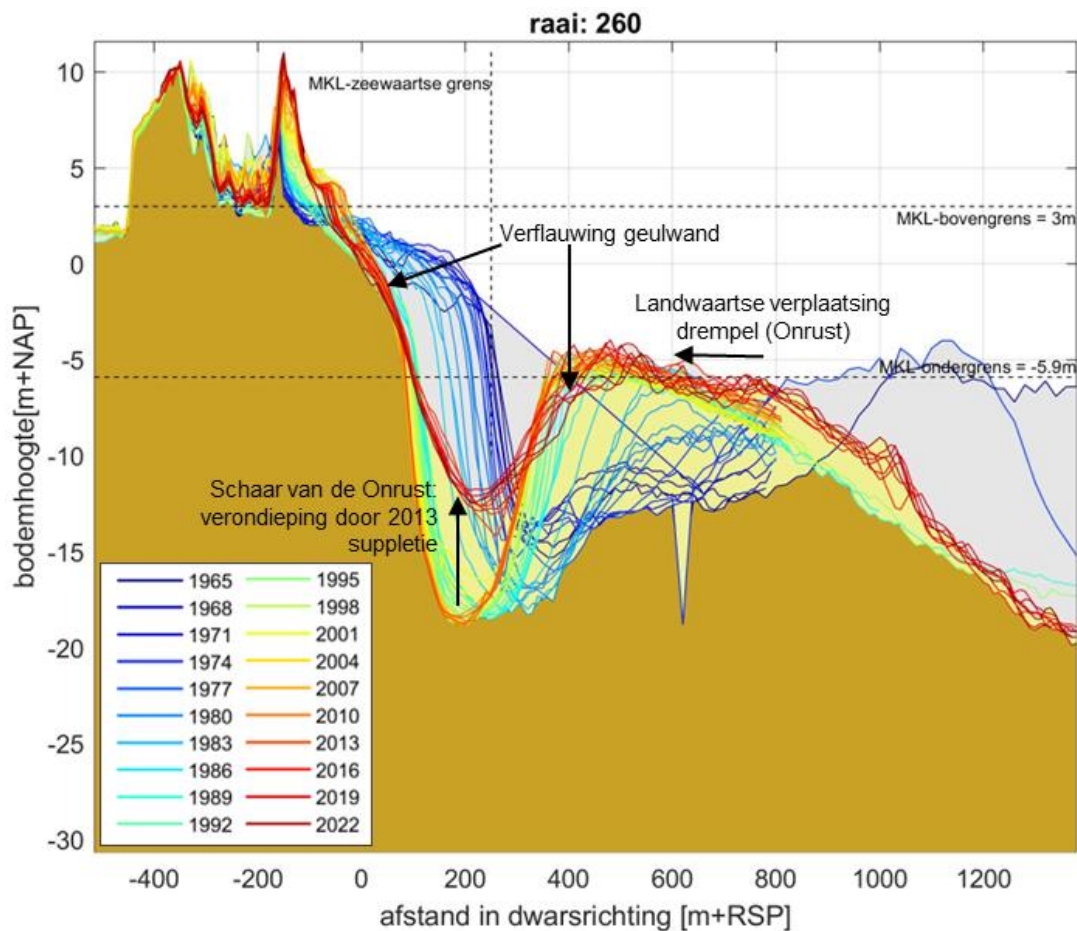
Tussen raaien 160 en 200 vindt de overgang plaats van een uitbouwende kust naar een eroderende kust. De kust trekt hier terug, omdat de Schaar van Onrust hier in de kust snijdt. Raai 260 geeft een representatief beeld van de MKL ontwikkeling tussen raaien 220-280. Vanaf 1980 is hier een grote teruggang van de MKL te zien tot 1993 (Figuur 2-21). Met behulp van strandsuppleties lukt het de MKL-positie te handhaven ten opzichte van de BKL-positie. Na iedere suppletie wordt de MKL zeewaarts verlegd naar een positie tussen de 45 en 48 m tot de RSP. Dit is ongeveer 15 m zeewaarts van de BKL positie. Het duurt dan gemiddeld 3 jaar tot de kustlijn terug op of landwaarts van de BKL ligt (Figuur 2-21). De geulwandsuppletie uitgevoerd in 2013 verandert dit beeld niet. Ook na deze suppletie vindt de erosie van de MKL-zone onverminderd plaats. Het smalle strand zorgt ervoor dat er een beperkte accommodatieruimte is om een suppletie aan te brengen. Dit zorgt ervoor dat er beperkt volume aangebracht kan worden, waardoor de BKL-overschreiding relatief snel (~3 jaar) plaatsvindt. In de Herziening van de BKL 2023 is de BKL voor deze raaien wat landwaarts verlegd, zodat de BKL weer een signaleringsfunctie heeft.



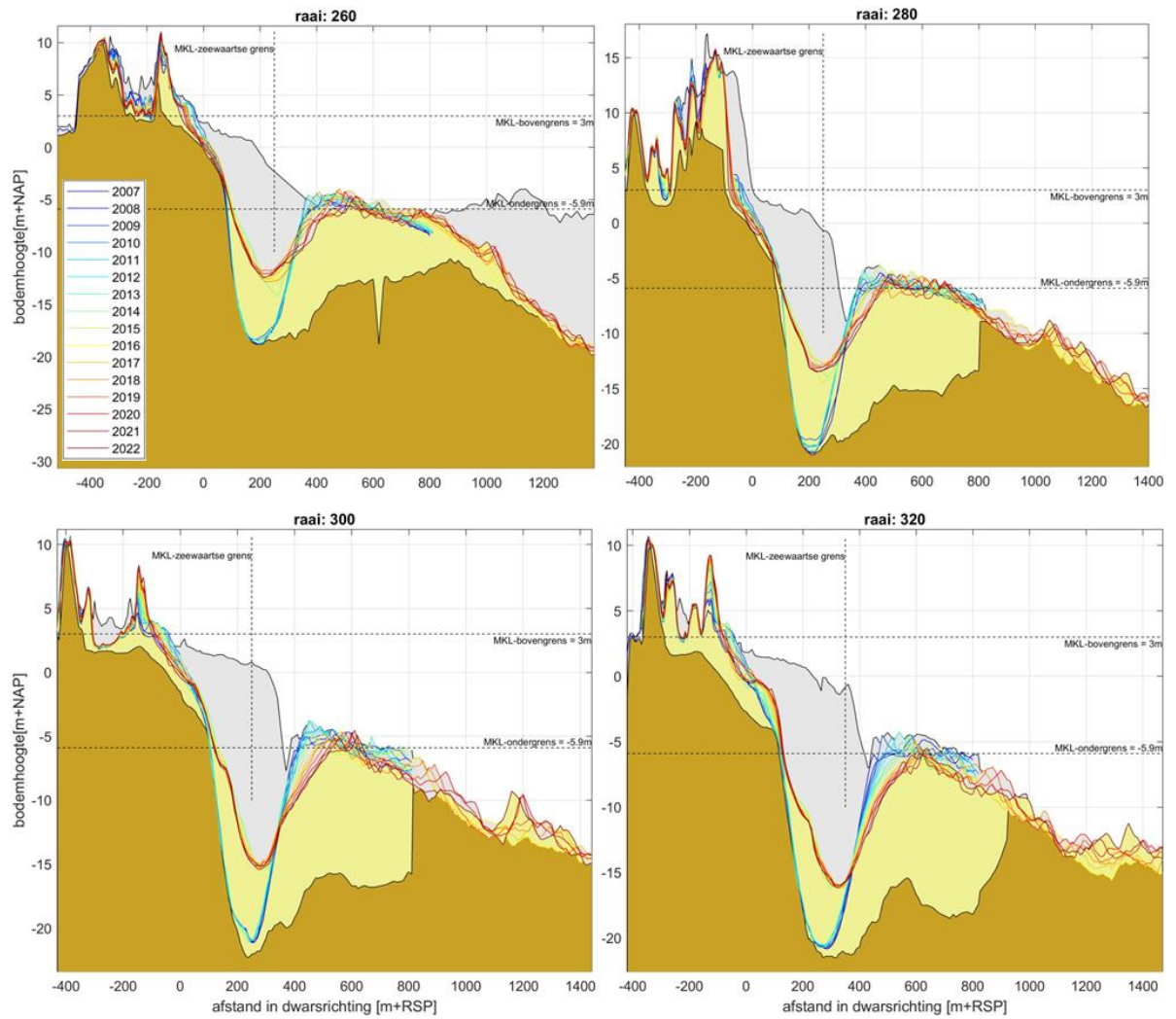
Figuur 2-21: Ontwikkeling van de MKL van raai 260 tussen 1965 en 2022 (vóór uitvoering van de suppletie in 2022).

- De profielontwikkeling laat een aantal verschillende trends zien (Figuur 2-22 en Figuur 2-24).
- In 1969 was de Schaar van Onrust nog een brede geul met een maximale diepte van -15 m NAP. De Onrust ligt nog ver zeewaarts (meer dan 1000m tot de RSP);
 - In de periode 1969 tot ongeveer 1990 verplaatst de Onrust snel landwaarts, in totaal zo'n 600m. Ook de landwaartse zijde van de geul verplaatst landwaarts, maar deze verplaatsing is veel kleiner: zo'n 200m. De geul wordt dan niet alleen smaller maar ook dieper (tot -19 m NAP). Aan weerszijden van de geul ontstaan steile geulwanden. Het steiler worden van de geulwanden en een kleine landwaartse verplaatsing zet zich door tot het jaar 2000;
 - Vanaf 2000, tot de aanleg van de geulwandsuppletie in 2013, blijft het profiel redelijk stabiel. De getijstromingen door de Schaar van Onrust zorgt voor het in stand houden van de steile geulwand, en voeren het opgewoelde zand op het strand efficiënt kustlangs af. Met de aanleg van de geulwandsuppletie neemt de diepte van de Schaar van Onrust met 5 m af;
 - Ook na aanleg van de geulwandsuppletie in 2013 blijft de diepte van het midden van de geul iets afnemen tot -12 m in 2022. Het benodigde zand hiervoor wordt waarschijnlijk geleverd door de geulwanden. Door de geulopvulling veranderen de getijstromingen, en zou in principe de erosieve trend wat moeten verminderen. Dit is echter niet terug te zien in de MKL-trend, de MKL blijft zich met vergelijkbare snelheid terugtrekken. Een tweede verandering die optreedt is een verflauwing van de geulwanden. Deze verflauwing treedt aan beide zijden op, maar is het grootst op de Onrust (Figuur 2-22 en Figuur 2-23).

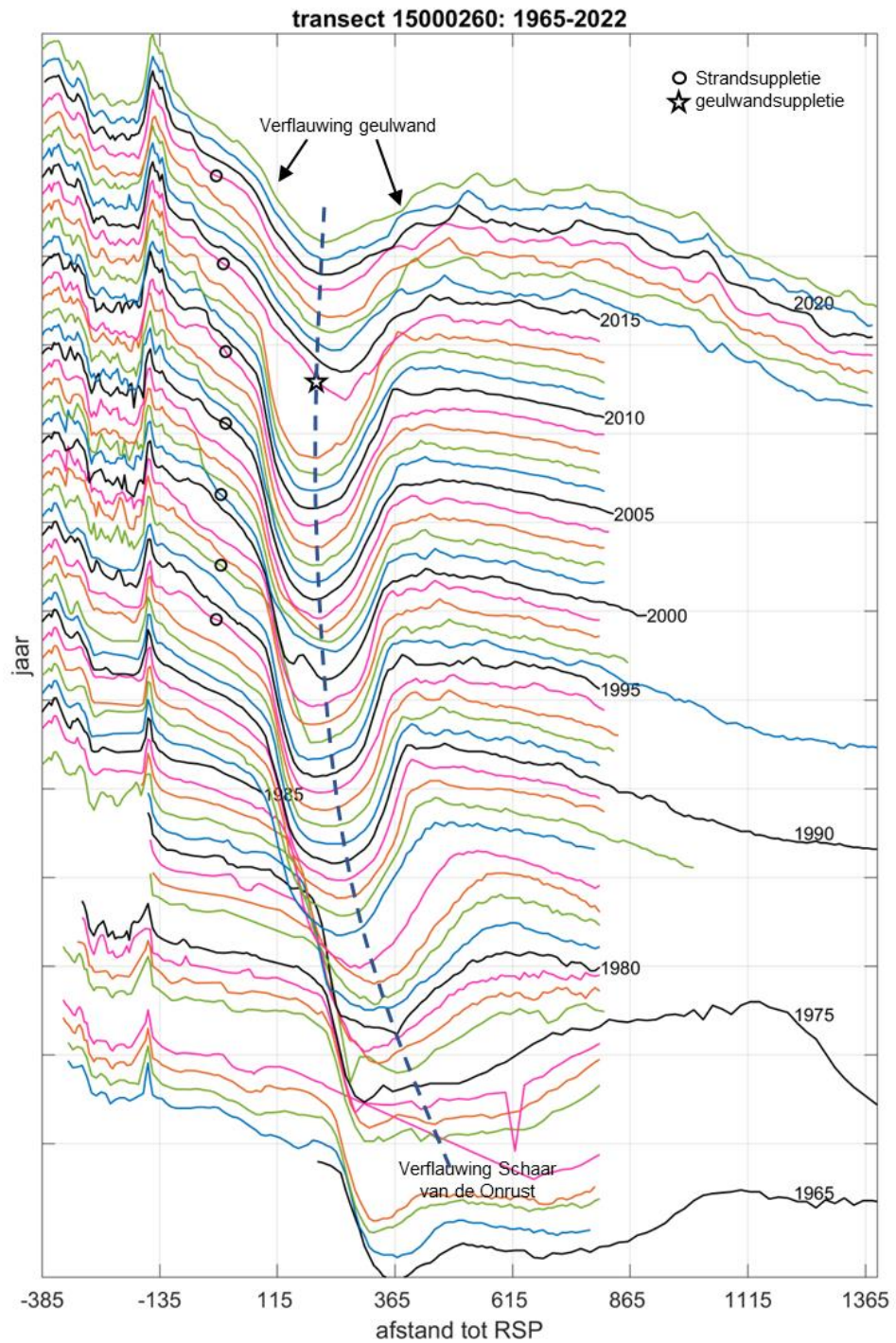
Doordat de getijstromingen veranderen in de geul, kan een steile geulwand (zoals voor de suppletie) niet in stand worden gehouden. Op het strand vindt nog onverminderd de erosieve processen plaats (opwoeling van het zand). Samen met de verflauwing van de geulwand is een mogelijke oorzaak dat de MKL zich ook na aanleg van de geulwandsuppletie met vergelijkbare snelheid blijft terugtrekken.



Figuur 2-22: Ontwikkeling van het dwarsprofiel van raai 260 tussen 1965 en 2022 (vóór uitvoering van de suppletie in 2022).



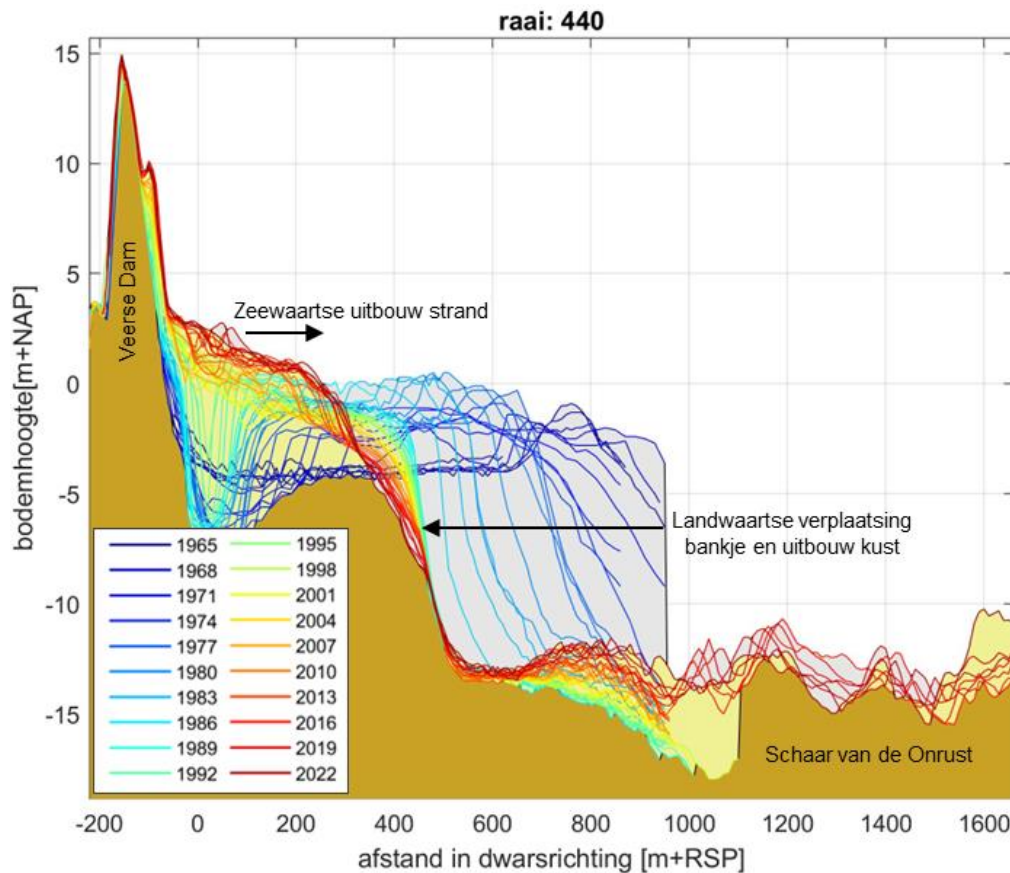
Figuur 2-23: Ontwikkeling van de dwarsprofielen van raai 260, 280, 300 en 320 tussen 2007 en 2022 (vóór uitvoering van de suppletie in 2022).



Figuur 2-24: Ontwikkeling van het dwarsprofiel met behulp van een timestack voor raai van 260 tussen 1965 en 2022 (vóór uitvoering van de suppletie in 2022). De timestack geeft dezelfde Jarkus profielen weer als Figuur 2-22, alleen zijn alle profielen iets in de verticaal opgeschoven zodat ze boven elkaar komen te liggen. Deze weergave maakt het mogelijk de verplaatsingen veel beter te volgen dan in een normale weergave van het dwarsprofiel.

2.4.3 Ontwikkeling van deelgebied III (raai 380 - 540)

Een BKL is (nog) niet gedefinieerd voor het gebied tussen raaien 380 en 540, wel doen zich hier grote morfologische veranderingen voor. Deze veranderingen zijn samengevat door raai 440 weer te geven (Figuur 2-25).



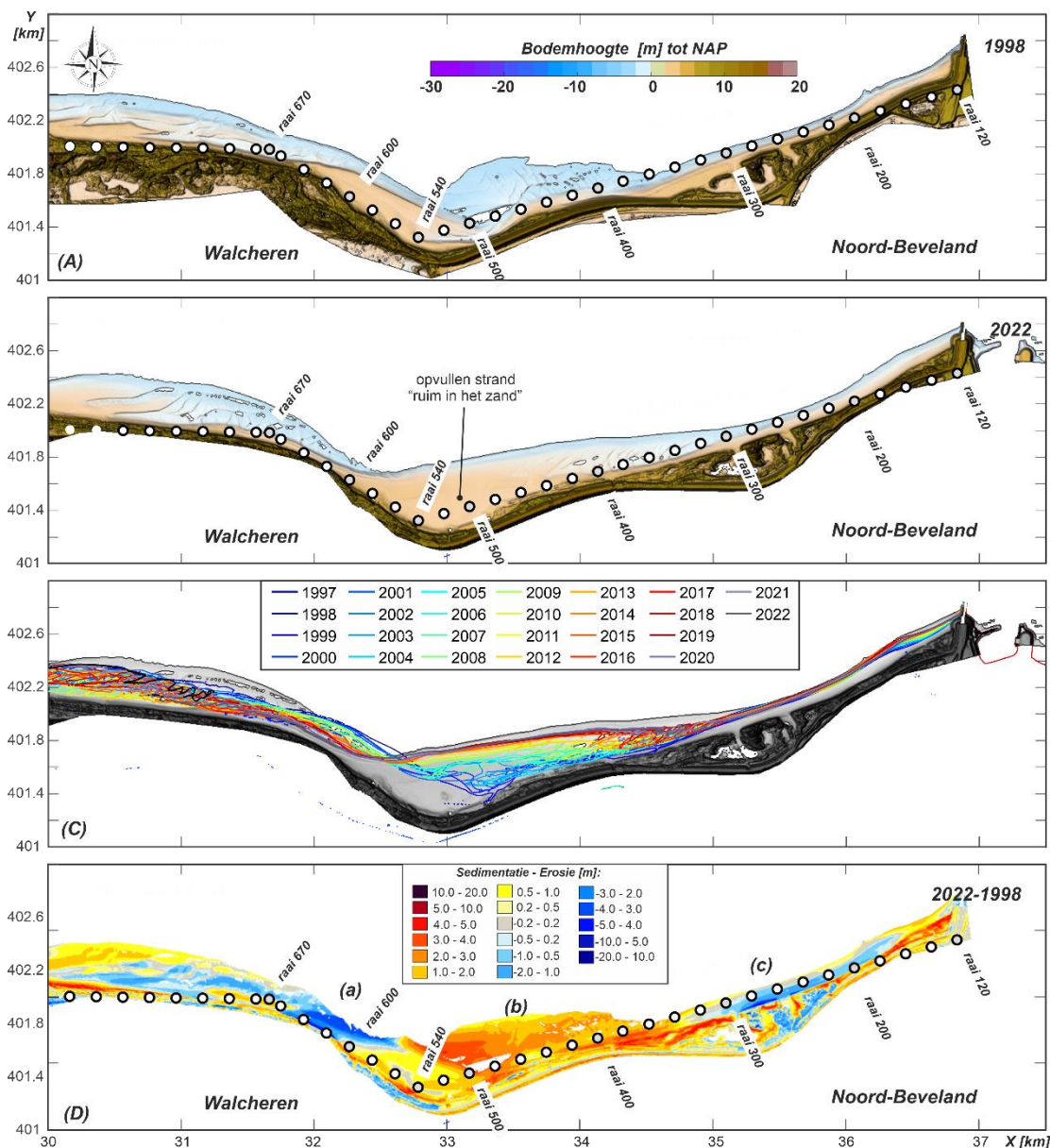
Figuur 2-25: Ontwikkeling van het dwarsprofiel van raai 440 tussen 1965 en 2022.

In 1968 ligt er een klein geultje (-7 m NAP) vlak langs het strand. Zeewaarts hiervan bevindt zich een bank met een kruinhoogte van -1 m NAP. De Schaar van Onrust ligt hier weer zeewaarts van (> 1000 m+RSP). De bank verplaatst tussen 1969 en 1990 landwaarts. De geulwand bevindt zich in 1965 op meer dan 1000 m+RSP, in 1990 ligt deze al op 450 m+ RSP. Landwaarts hiervan is de kustzone sterk in hoogte toegenomen. De toename in hoogte zet zich ook na 1990 door tot ongeveer 2015. Naast een toename van de hoogte neemt ook de breedte van het strand toe. Het strand bouwt zich zeewaarts uit.

De opbouw van het strand wordt enerzijds gevoed door de hier in het verleden aanwezige buitendelta banken van het Veerse Gat. Deze verplaatsen landwaarts (zie 4 in Figuur 2-86). Daarnaast is er netto zandtransport van west naar oost langs de kust van Walcheren. Bij Breezand en langs de Veerse Gatdam ontstaat een luwtegebied waar aanzanding kan optreden.

2.5 Duin en droge strandontwikkeling in detail

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



Figuur 2-26: Een overzicht van de LiDAR meting voor de bodems (A) 1998 en (B) 2022. (C) De ontwikkeling van de 0 m NAP contourlijn tussen 1998 en 2022. (D) Het verschil in bodemhoogte tussen 1998 en 2022, voor aanleg van de 2022 strandsuppletie.

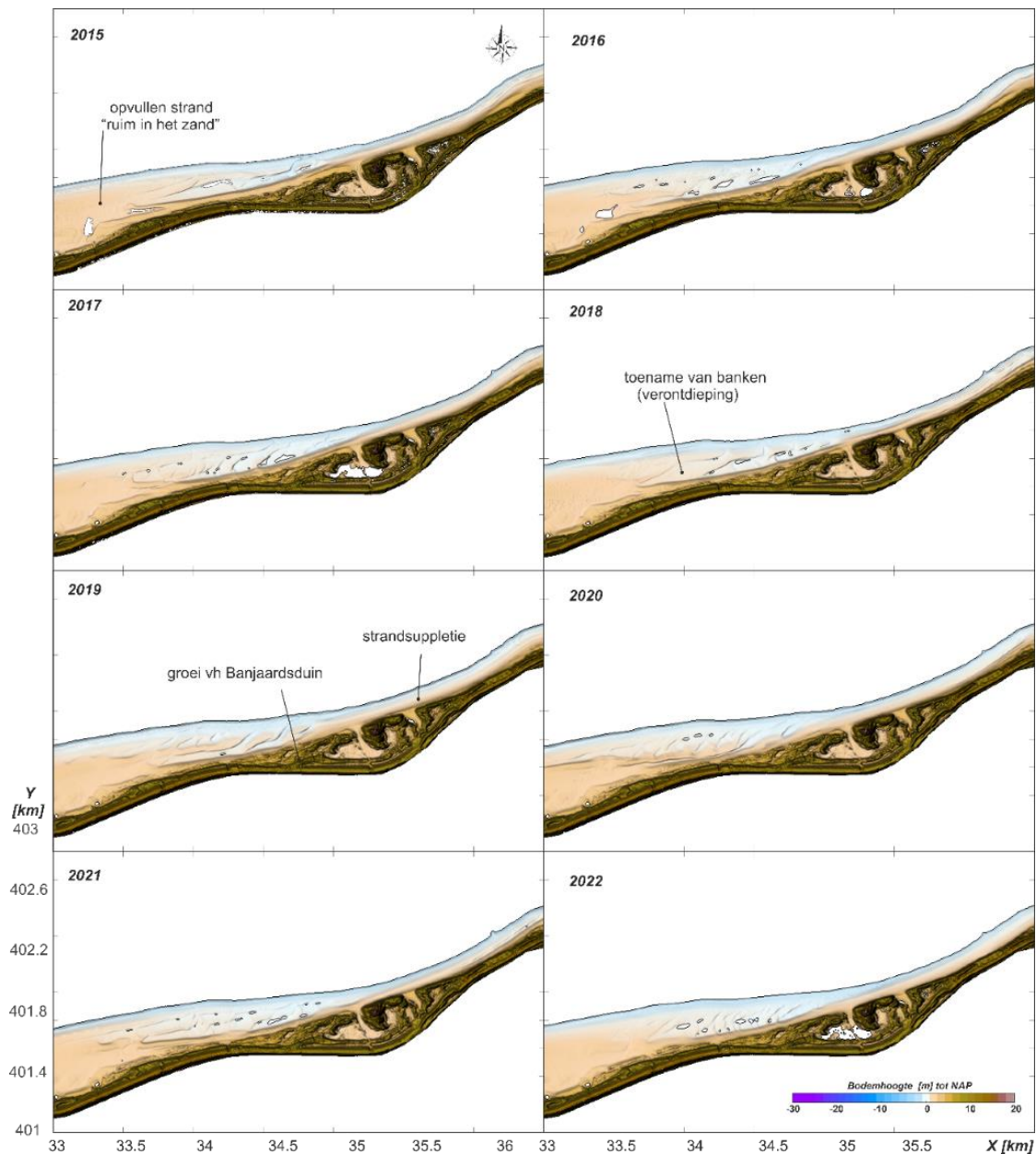
Voor dit deel van de kustlijn zijn er 24 DTM's beschikbaar voor de periode 1998 – 2022. Iedere DTM bevat ten minste de eerste duinenrij en het droogvallende strand tot een diepte van ongeveer -1.5 m NAP. In Figuur 2-26 is de gehele kustzone vanaf raai 120 tot raai 800 weergegeven. Deze metingen geven een goed overzicht van de recente kustlijnontwikkeling en de karakteristieken van het droogvallende strand.

2.5.1 Ontwikkeling strand Noord-Beveland

Zowel de 1998 en de 2022 opname illustreren het smalle Banjaardstrand (Figuur 2-26 en Figuur 2-27). In 1998 is alleen tussen raai 540-600 een uitbouw van het strand te zien. Bij de Veerse Gatdam, raai 400-540, is de strandbreedte nog beperkt. De voorliggende bank is hier nog niet duidelijk zichtbaar. Tussen raai 300 en 400 is het strand dan iets breder. Dit komt vooral doordat het Banjaardsduin nog iets teruggetrokken ligt. Doordat het duin verder landwaarts ligt, is hier lokaal een wat breder strand aanwezig. De strandbreedte is minimaal tussen raai 200 en 300. Richting de damaanzet van de Oosterscheldekering neemt de strandbreedte dan weer toe.

De verplaatsing van de 0 m NAP contour (Figuur 2-26 C) illustreert de toename van de strandbreedte ter hoogte van de Veerse Gatdam (raai 360-540) tussen 1998 en 2022. De strandbreedte nabij raai 300 neemt af (Figuur 2-26 A ten opzichte van Figuur 2-26 B). Deze afname komt niet alleen omdat de kustlijn zich terugtrekt, maar ook door het uitbouwende Banjaardsduin. Deze uitbouw vindt vooral na 2017 plaats (Figuur 2-27). Deze recente LiDAR metingen laten zien dat het strand tussen raai 200 en 300 weliswaar weinig verandering toont, maar er wel grote veranderingen ten zuiden van raai 300 optreden. De uitgevoerde zandsuppleties dragen bij aan de aanzanding en groei van de Sluffer (Banjaardsduin), door wind-gedreven transport van suppletiezand naar de eerste duinenrij. Naarmate de vooroever aan de westzijde (Figuur 2-9 en Figuur 2-10), voor de Veerse Gatdam, opvult en ondieper wordt, verplaatst er ook meer zand in oostelijke richting. Deze zandverplaatsing is te zien in de vorm van banken die ontstaan bij de Veerse Gatdam en dan oostelijk verplaatsen onder invloed van zowel getij als golven. In de bodem van 2019 is ook de in 2018 uitgevoerde strandsuppletie te zien. In de 2022 bodem is de strandsuppletie van 2022 nog niet te zien.

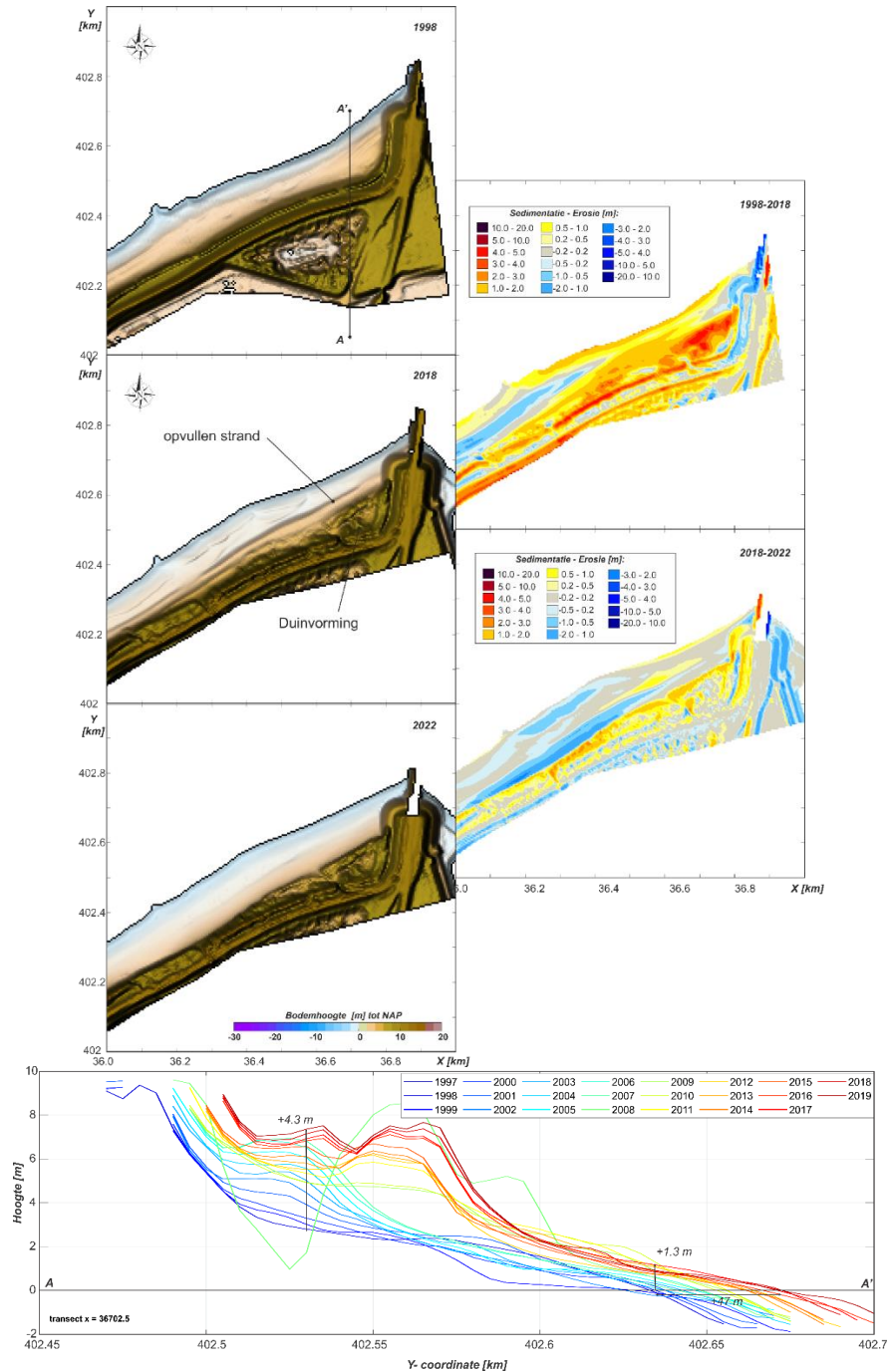
De eerste duinenrij bij de Veerse Gatdam, met name daar waar de eerste duinenrij teruggetrokken lag in 1998 (raai 300-420), is zeewaarts aangegroeid in de afgelopen 20 jaar (Figuur 2-27). Tussen de damaanzet (ca. raai 200) en raai 300 blijft de positie van de zeereep tussen 1998 en 2022 constant. De zeereep neemt gedurende deze periode wel beperkt (tot 2 meter) in hoogte toe.



Figuur 2-27: Een weergave van de recente LIDAR metingen (2015-2022) van het Banjaardstrand en -duin.

2.5.2 Damaanzet van de stormvloedkering

Een gedetailleerd beeld van de strandontwikkeling westelijk van de damaanzet van de stormvloedkering wordt getoond in Figuur 2-28. De damaanzet van de stormvloedkering staat hier als een obstakel dwars op de kust en steekt zo'n 200m zeewaarts uit t.o.v. de kustlijn. Sediment beweegt hier van west naar oost en vult dan de ruimte tussen de stormvloedkering en de kustlijn. Voor 1998 heeft zich zo al een breed strand gevormd. In de periode 1998-2022 vindt dan nog een verdere uitgroei plaats. De 0m NAP contour verplaatst zich een kleine 50 m zeewaarts en het strand wordt 1,3 m hoger. Tegen de zeewering is de groei nog sterker. Hier vormen duinen en neemt de hoogte met meer dan 4 m toe.



Figuur 2-28: Een overzicht van de LiDAR meting voor de bodems 1998, 2018 en 2022 en het verschil (2018-1998 en 2022-2018) ten westen van de damaanzet van de stormvloedkering rond raai 200. De onderste figuur toont de hoogteontwikkeling van het dwarsprofiel A-A'.

2.6 Deelconclusies op basis van de data-analyse

De kustlijn van Noord-Beveland wordt vooral beïnvloed door de morfologische ontwikkeling van de voorliggende Onrust en Schaar van Onrust. De Schaar van Onrust wordt onder de invloed van het zuidelijke deel van de Hompels zuidwaarts de kust ingedrukt in de periode 1980-2013. De geul wordt dan steeds smaller en dieper en ook de strandzone wordt smaller. Vanaf 1980 is een sterke teruggang van de MKL te zien tot 1993. Met behulp van frequente (elke 3-4 jaar) strandsuppleties lukt het de MKL-positie te handhaven ten opzichte van de BKL-positie. Het smalle strand zorgt ervoor dat er een beperkte accommodatieruimte is om een suppletie aan te brengen. Dit zorgt ervoor dat er beperkt volume aangebracht kan worden, waardoor er relatief snel na een suppletie (binnen ~3 jaar) nieuwe BKL-overschrijdingen plaatsvinden.

De geulwand- en strandsuppleties (2013) van 1,5 miljoen m³ (geul) en 0,41 miljoen m³ (strand) zijn aangelegd tussen de raaien 160 – 340. De Schaar van Onrust is, door de manier waarop de suppletie is aangebracht, voor een groot gedeelte opgevuld (geulopvulling). Na aanleg van de suppletie is er zeer weinig erosie van de geulwandsuppletie opgetreden. Deze conclusie werd in de rapportage van Schrijvershof (2017) getrokken, maar lijkt ook in de meest recente (2022) opname nog toepasbaar.

De volumeontwikkeling van het strand (van +3m NAP tot midden van de geul) is in de periode 1990 – 2013 vergelijkbaar met de volumeontwikkeling in de periode 2014 – 2022, met volumeverliezen van gemiddeld -0,07 en -0,09 Mm³ per jaar. De geulwand- en strandsuppleties van 2013 hebben er dus niet voor gezorgd dat de structurele erosie van het strand en de landwaartse verplaatsing van de MKL veranderd zijn. De MKL is door de strandsuppletie tijdelijk zeewaarts verschoven, maar de MKL-trend blijft landwaarts gericht.

In de periode 1990-2013 zijn de grote getijstromingen door de Schaar van Onrust de oorzaak van het in stand houden van de steile geulwand. Deze getijstromingen kunnen het sediment efficiënt kustlangs afvoeren. Met het aanbrengen van de geulwandsuppletie wordt de geul gedeeltelijk gevuld. Hierdoor veranderen waarschijnlijk de getijstromingen, wat dan in principe ook de kusterosie zou reduceren. Deze reductie is echter niet waar te nemen.

Een belangrijke reden hiervoor is dat op het strand nog onverminderd de erosieve processen plaatsvinden (opwoeling van het zand). Daarnaast is er een verflauwing van de geulwand te zien aan beide zijden van de Schaar van Onrust. Doordat de getijstromingen veranderen in de geul, kan een steile geulwand (zoals voor de suppletie) niet in stand worden gehouden. Het verflauwen van de geulwand door veranderen van de getijstromingen in de geul is ook in andere gebieden te zien zoals aan de zuidwestzijde van Texel nabij het Molengat (Elias en van der Spek, 2019). Deze twee processen (opwoeling van zand en verflauwing geulwand) samen zijn waarschijnlijk de oorzaak dat de MKL zich ook na aanleg van de geulwandsuppletie met vergelijkbare snelheid blijft terugtrekken. In H3 wordt door middel van numerieke modellering de verandering van de getijstroming gekwantificeerd.

3 Modelling van de (strand-)geulwandsuppleties

3.1 Het Delft3D-FM model

3.1.1 Modelschematisatie en rekenrooster

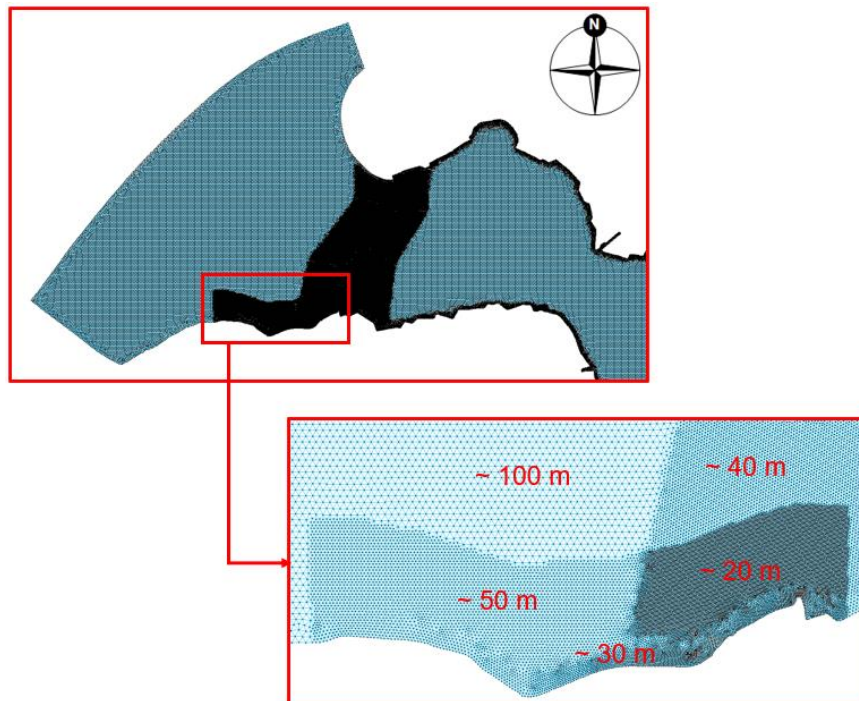
De uitgevoerde modellering is gebaseerd op een bestaande modelschematisatie (Krikke, 2023). Dit model vindt zijn oorsprong in het zesde generatie D-HYDRO hydrodynamische Oosterschelde model (Tiessen et al., 2019). Oorspronkelijk is dit 2D model ontworpen om waterstanden en stromingen in de Oosterschelde en monding te berekenen. Dit model is gevalideerd aan de hand van de waterstanden van 2016, 2013, 2007 en 1990 en geeft resultaten die zeer vergelijkbaar zijn met de gemeten waterstanden. Daarnaast wordt bij de Oosterscheldekering de neervorming goed beschreven.

Het oorspronkelijke model omvat het gehele Oosterscheldebekken inclusief een groot deel van de voordelta, zie Figuur 3-1. Het gehele model bestaat uit driehoekige roostercellen en varieert in resolutie tussen de 45 m (rond de Oosterscheldekering en de randen van het model) en 100 m. Om de Schaar van Onrust beter te beschrijven en de mogelijke effecten van een suppletie inzichtelijk te maken is het model in deze studie lokaal verfijnd rond het Banjaardstrand en de Schaar van Onrust, zie Figuur 3-2. De suppletielocatie zelf wordt met een resolutie van 20 m beschreven, met deze resolutie kunnen we de veranderingen in bodem door de suppleties voldoende beschrijven.

Waterstanden worden opgelegd aan de westelijke modelrand (zie Figuur 3-1). Tijdsreeksen op deze drie zee-randen zijn verkregen van Rijkswaterstaat Zee en Delta (RWS-Z&D). Wind is opgelegd als een ruimtelijk uniforme windforcering op basis van een vaste meetlocatie, de tijdsreeksen van windsnelheden en -richtingen is afkomstig van de meetlocatie Brouwershavense Gat 2 (BG2).



Figuur 3-1 Modeldomein van het Oosterschelde estuarium. De donkerblauwe rand aan de westkant van het model is de modelrand waar randvoorwaarden zijn toegepast.



Figuur 3-2: Modelresolutie van het model voor de buitendelta en de Oosterscheldekering (linksboven) en het interessegebied, het Banjaardstrand en de Schaar van Orrust (rechtsonder).

3.1.2 Sedimenttransport

In de studie van Krikke (2023) is ook de sedimenttransport functionaliteit (Van Rijn, 1993) geactiveerd en zijn er morfostatische berekeningen uitgevoerd. In de Van Rijn formulering worden zowel de bodemtransporten als de suspensieve transporten berekend en bij elkaar opgeteld. De bodemtransporten zijn gebaseerd op een parametrische formulering die ook het effect van golven meeneemt. De suspensietransporten worden berekend met een advection-diffusie vergelijking. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met initiële laagdikte van 5 m en een mediane korreldiameter van 0.2 mm.

In deze studie wordt de bodemhoogte gedurende de simulatie niet aangepast, maar wordt er een morfostatische berekening uitgevoerd. De aldus verkregen sedimenttransporten worden ook wel de “potentiële sedimenttransporten” genoemd. In werkelijkheid zou de convergentie of divergentie van de transporten een bodemaanpassing veroorzaken. Hierdoor varieert de bodem en dus ook de transporten door de tijd. Door in het model de bodem constant te houden, kan juist de verandering in sedimenttransport voor verschillende bodemconfiguraties (de suppletievarianten) nauwkeurig in kaart worden gebracht. Dit geeft dan een beeld van het initiële sedimenttransport kort na aanleg van de suppletievariant. Deze methode maakt het mogelijk om lange-termijn transportschattingen te verkrijgen zonder dat hier zeer rekenintensieve modelsommen voor gemaakt moeten worden.

De berekende sedimenttransporten geven inzicht in het morfologische systeem en de impact of verstoring van de verschillende suppletievarianten erop. Een veel gebruikte analysemethode is het afleiden van de residuele transporten. Door een vergelijking van de residuele transporten voor de verschillende processen (getij, golven) kan een inschatting van de maatgevende processen en condities worden gemaakt. Veranderingen in de residuele patronen tussen de referentie simulatie en simulatie met het suppletieontwerp geven inzicht in de toekomstige morfologische veranderingen. Doordat de suppletie lokaal de bodem verstoort, zullen hier lokaal, ongeacht de grootte van de ingreep, de transporten veranderen. Als de veranderingen beperkt zijn ten opzichte van de omliggende sedimentdynamiek, is het op basis van de

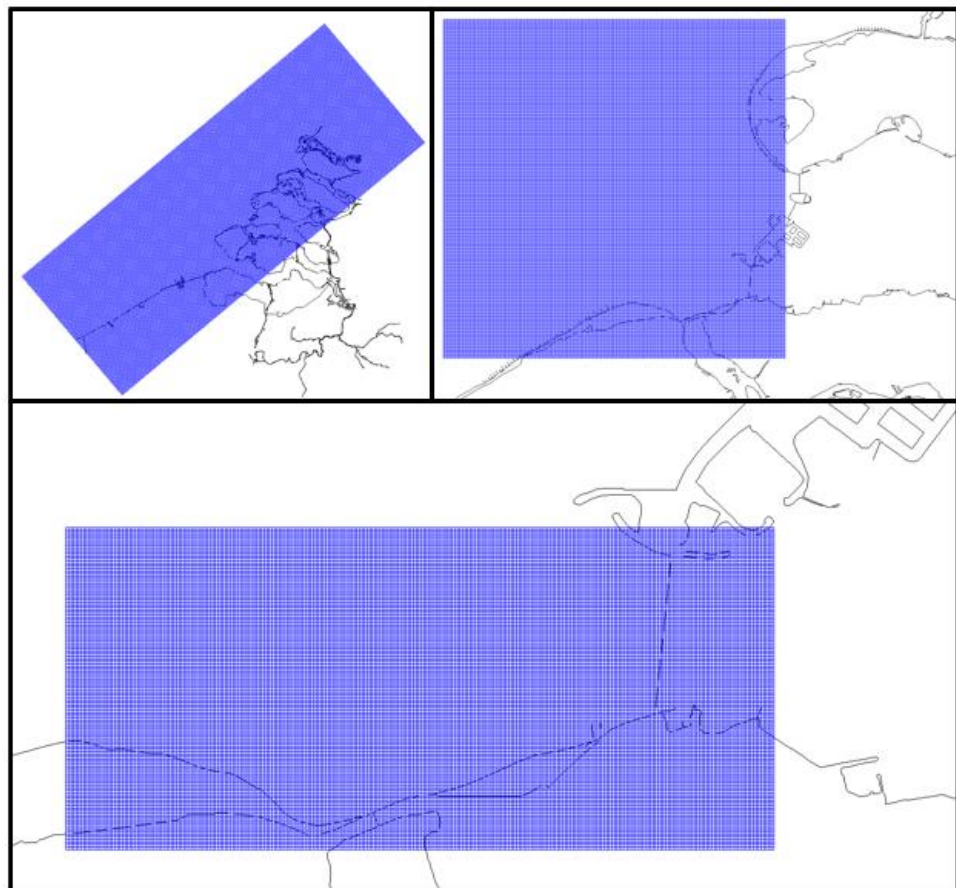
residuele transporten lastig een inschatting te maken van eventuele grootschalige effecten. Hiervoor zouden lange morfologische simulaties gemaakt moeten worden. Deze simulaties zijn rekenintensief en de resultaten vaak discutabel. Het is lastig om numerieke fouten en natuurlijke veranderingen te onderscheiden.

3.1.3 Golven

In de grote geulen worden de sedimenttransporten gedomineerd door het getij. Op de ondieptes van de buitendelta en langs de eilandkusten spelen golven echter belangrijke rol in de sedimenttransporten. Golfbreking zorgt voor de generatie van golf-gedreven stromingen en de opwoeling van sediment, dat vervolgens door de gecombineerde getij- en golf-gedreven stroming wordt verplaatst. Door koppeling van het stromingsmodel met het SWAN golvenmodel kunnen deze effecten meegenomen worden in de simulaties.

Het SWAN golvenmodel gebruikt het golfrooster en de parameter instelling zoals afgeleid in de studie van Elias et al. (2021) als basis. Het grootste rooster bevat de gehele Voordelta. In dit rooster zijn twee aanvullende hogere resolutie rooster genest om voldoende resolutie nabij het Banjaardstrand te verkrijgen (Figuur 3-3). De Oosterscheldemonding wordt daarbij in 100 m resolutie opgelost en het Banjaardstrand in 30 m resolutie.

Voor alle suppletievarianten is als randvoorwaarde een significante golfhoogte van 2 m uit het westen opgelegd. Dit komt overeen met een representatieve gemiddelde golfhoogte en richting op lange termijn (5 – 10 jaar) voor dit gebied.



Figuur 3-3 Een overzicht van de gebruikte golfroosters in dit model.

3.2 Overzicht van de modelsimulaties en suppletievarianten

Het Oosterschelde model is gebruikt om een referentie simulatie (T0, de 2022 bodem vóór suppletie0 door te rekenen en twee series van suppletievarianten (Figuur 3-4 en Figuur 3-5). Daarnaast is een aanvullende simulatie uitgevoerd om de effecten van de in 2013 uitgevoerde geulwandsuppletie te onderzoeken.

Alle simulaties gebruiken identieke randvoorwaarden (getij en golven) en instellingen. Alleen de oorspronkelijke bodemligging in het model wordt gevarieerd. De doelstelling van deze simulaties is niet het realistisch doorrekenen van de werkelijke transporten, maar door de varianten te vergelijken met de T0 simulatie kan een goede inschatting van de mogelijke effecten van de ingreep worden gemaakt.

Referentie simulatie (T0 – 2022)

De T0 simulatie gebruikt een gecombineerde bodem waarin de 2022 JarKus meting is aangevuld met de 2019 Vaklodging van de buitendelta. Deze 2019 is de meest recente, dekkende bodemopname van het gehele mondingsgebied. De T0 bodem is gebruikt als referentiesimulatie en vormt de basis voor de verschillende suppletieontwerpen (Figuur 3-4A).

Simulaties voor het effect van de 2013 strand-geulwandsuppletie

Evaluatie van de twee 2013 suppleties is gebaseerd op de vergelijking van een simulatie met de gemeten 2013 bodem (vóór aanleg van de strand- en geulwandsuppleties) en met de resultaten van een simulatie waarin de 2014 bodem, na aanleg, is opgenomen. Het doel van deze evaluatie is tweeledig. Ten eerste kan door deze simulatie het geobserveerde morfologische gedrag van de suppletie beter worden begrepen. Ten tweede geven deze resultaten een beter begrip van de verandering in waterbeweging en sedimenttransport in relatie tot de geobserveerde respons. Als de suppletievarianten een gelijkwaardige beïnvloeding van de stroming en transporten geven, dan zal de morfologische respons ook in overeenstemming zijn met de sinds 2013 opgetreden morfologische veranderingen.

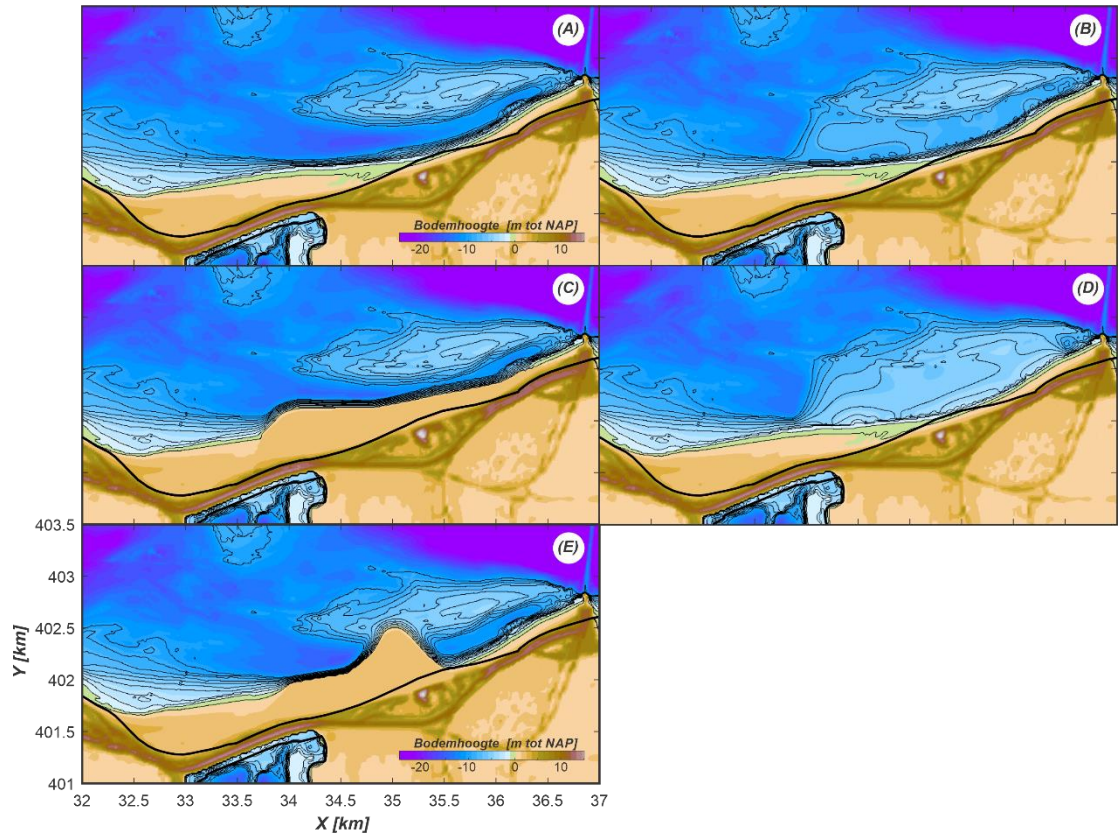
Gevoeligheidssimulaties

De eerste serie suppletieontwerpen zijn bedoeld als gevoeligheidsonderzoek. In dit gevoeligheidsonderzoek zijn vier ontwerpen gebruikt zoals weergegeven in Figuur 3-4. Deze ontwerpen zijn niet direct gebaseerd op werkelijke suppletieontwerpen en veel groter van volume.

De vier doorgerekende suppletievarianten zijn:

- (1). *Gedeeltelijke opvulling Schaar van Onrust (Figuur 3-4, B).*
In deze variant wordt de Schaar van Onrust tussen raai 120 en 400 opgevuld tot een maximum diepte van -7 m NAP. In totaal beïnvloedt dit een oppervlakte van 0,8 km², waarvoor een suppletie van 2,9 miljoen m³ benodigd is.
- (2). *Gedeeltelijke afsluiting Schaar van Onrust (Figuur 3-4, C).*
De gedeeltelijke afsluiting is een grote strand-geulwandsuppletie uitgevoerd tussen raai 120 en 400, waarbij de geul half dicht gezet wordt. De hoogte van de suppletie is +2 m NAP met een oppervlakte van 1,5 km². Voor deze suppletie is 6,6 miljoen m³ zand benodigd.
- (3). *Volledige opvulling Schaar van Onrust (Figuur 3-4, D).*
Een volledige opvulling van de Schaar van Onrust is bereikt door de maximale hoogte van de Onrust door te trekken naar de kust. De suppletie zet zo de Schaar van Onrust dicht tussen raai 120 en 400. Het totale beïnvloede oppervlakte is 1,15 km². Voor een kruinhoogte van de suppletie tussen de -4 en -5m NAP is dan een volume benodigd van 5,2 miljoen m³.
- (4). *Volledige afsluiting Schaar van Onrust (Figuur 3-4, E).*

Volledige afsluiting van de Schaar van Onrust wordt bereikt door tussen raai 300-400 een suppletie aan te brengen met een kruinhoogte van NAP +2m. De suppletie strekt zich nog iets westelijk en oostelijk uit om een vloeiend verloop met de bestaande kustlijn te krijgen. In totaal wordt een oppervlakte van 1 km² beïnvloed, waarvoor een volume van 5 miljoen m³ benodigd is.



Figuur 3-4: Overzicht van de bodemschematisaties voor het gevoeligheidsonderzoek. (A). TO bodem, (B). Gedeeltelijk opvulling Schaar v Onrust, (C). Gedeeltelijke afsluiting Schaar v Onrust, (D). Volledige opvulling Schaar v Onrust en (E). Volledige afsluiting Schaar v Onrust.

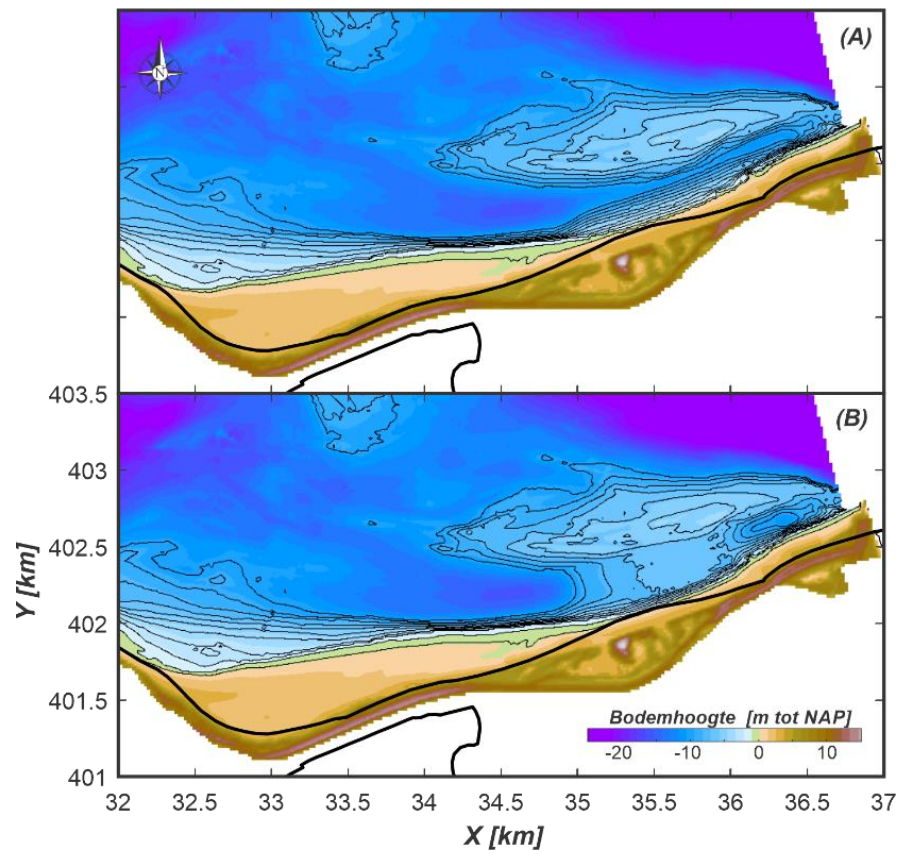
RWS suppletieontwerpen

De door RWS aangeleverde suppletieontwerpen bestaan uit (1) een gecombineerde strand-geulwandsuppletie en (2) gedeeltelijke geulopvulling.

De strand-geulwandsuppletie (Figuur 3-5A) strekt zich uit tussen raai 120 en 360. De bankhoogte ligt tussen de NAP +2,5 en +4 m. Gemiddeld over de gehele suppletie bedraagt het suppletievolume 512 m³/m, maar de grootste volumes, meer dan 1000 m³/m worden bij raai 240 en 260 aangebracht. Het totale suppletievolume komt op 1,3 miljoen m³ uit.

De geulopvulling (Figuur 3-5B) variant is gebaseerd op een mogelijk risico bij de uitvoer van de strand-geulwandsuppletie. Er is een kans dat een deel van de geulwandsuppletie naar de bodem van de geul zakt, zoals ook bij de geulwandsuppletie van 2013 is gebeurd. Het ontwerp van de gedeeltelijke geulopvulling bestaat uit 2 delen. Op het strand wordt een suppletie aangelegd met gelijke hoogte als de bovengenoemde strand-geulwandsuppletie (variant 1). Daarnaast wordt de geul tussen raai 200 en 320 gedeeltelijk opgevuld tot een diepte van NAP -7m.

De volumes voor beide varianten zijn ongeveer gelijk gehouden.



Figuur 3-5: Overzicht van de bodemschematisatie aan de hand van RWS suppletieontwerpen: (A). Strand-geulwandsuppletie en (B). Gedeeltelijke geulopvulling.

3.3 Referentie simulatie (T0 – 2022)

De dieptegemiddelde stroomvelden illustreren de complexe getijbeweging in het mondingsgebied (Figuur 3-6) en in de Schaar van Onrust (Figuur 3-7). Op de grote schaal (mondingsgebied) is de beïnvloeding van de stroming door de geulen en platen goed te onderscheiden. Tijdens vloed propageert het getij vanaf de Noordzee over het mondingsgebied en de stroming volgt daarbij de grote hoofdgeul Oude Roompot (NW – ZO oriëntatie) en de Roompot Zuid met west-oost oriëntatie (Figuur 3-6A,B). De stromingen in deze geulen zijn duidelijk hoger dan over de naastgelegen bankgebieden (Hompels en Noordland). In de Schaar van Onrust is geen duidelijke geul-gedreven stroming zichtbaar. De stroming in het gehele gebied, geul en plaat, vertoont overeenkomstige vectoren in grootte en richting (Figuur 3-7 A,B). Bij de stormvloedkering komen de stroomgeulen samen en ontstaat een uniforme west-oost gerichte stroming het bekken in.

Tijdens eb is het stroombeeld omgedraaid (Figuur 3-6D,E). Vanaf de kering is de stroming initieel voornamelijk noordwestelijk gericht, de Oude Roompot in. Vanaf de Oude Roompot maken de vectoren via het drempelgebied verbinding met de Roompot Zuid. In deze geul zijn de vectoren dan oost-west gericht. Naast uitstroming over dit drempelgebied laat ook de ebschaar op de Hompels een duidelijke uitstroming zien. Een directe verbinding vanuit de Oude Roompot richting de Schaar van Onrust is echter niet aanwezig (Figuur 3-6 E,F). De uitstroming vanuit de Schaar van Onrust naar de Oude Roompot is zelfs oostelijk (in vloedrichting) tijdens maximale uitstroming in de Oude Roompot. Een divergentiepunt in de stroming ontstaat net ten oosten van het sluftegebied (ca. raai 200-220, zie de rode ster in Figuur 3-7, E). Ten westen van dit divergentiepunt is de stroming ebdominant en ten oosten vloeddominant. Dit divergentiepunt is een mogelijke oorzaak van de grote lokale verliezen in dit gebied.

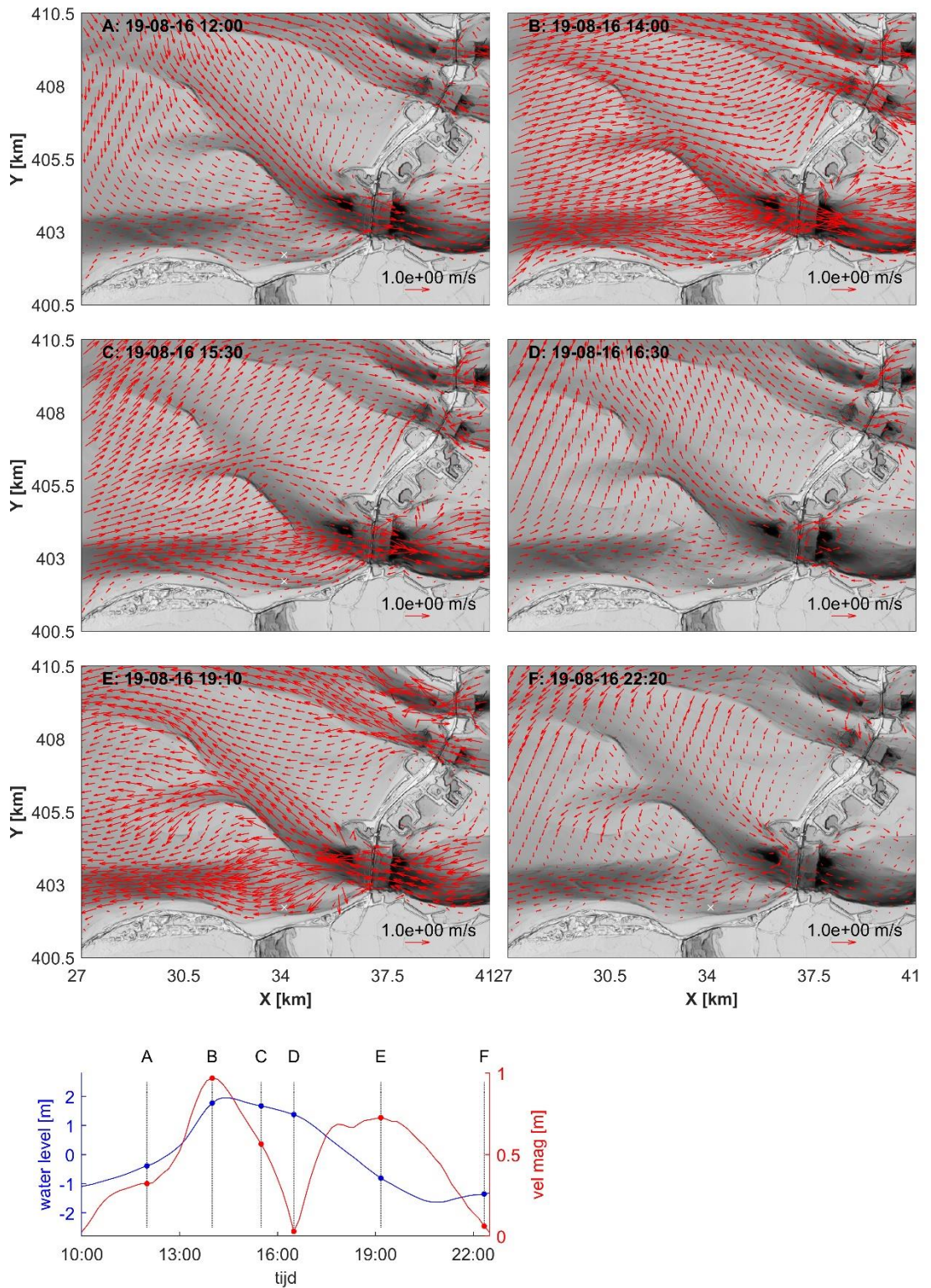
Deze observatie wordt bevestigd door het residuele transportveld (Figuur 3-8). De residuele transporten langs de kust van Noord-Beveland zijn westelijk gericht nabij Breezand en zuidwestelijk over de Hompels. In de Schaar van Onrust zijn de transporten juist oostelijk gericht, richting de kering, en deze transporten nemen in oostelijke richting sterk toe. Toenemende transporten betekent dat sediment opgepikt en verplaatst wordt. In dit geval wordt sediment vanaf het Banjaardstrand opgepikt en richting de Oude Roompot getransporteerd. Dit transportpatroon geeft direct een verklaring voor de geobserveerde erosie hier.

De gesimuleerde toename in transport vanaf het Banjaardstrand richting de Oude Roompot wordt bevestigd door de gemeten sedimentatie nabij de damaanzet van de Oosterscheldekering. Het model laat zien dat er een groot oostelijk gericht residueel transport aanwezig is. Zodra er voldoende accommodatieruimte beschikbaar is, bijvoorbeeld in de luwte van de damaanzet van de kering, kan hier dus veel sedimentatie optreden.

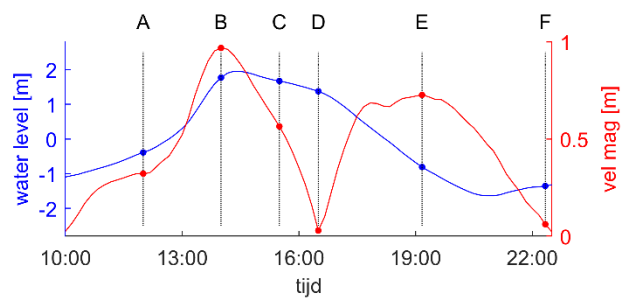
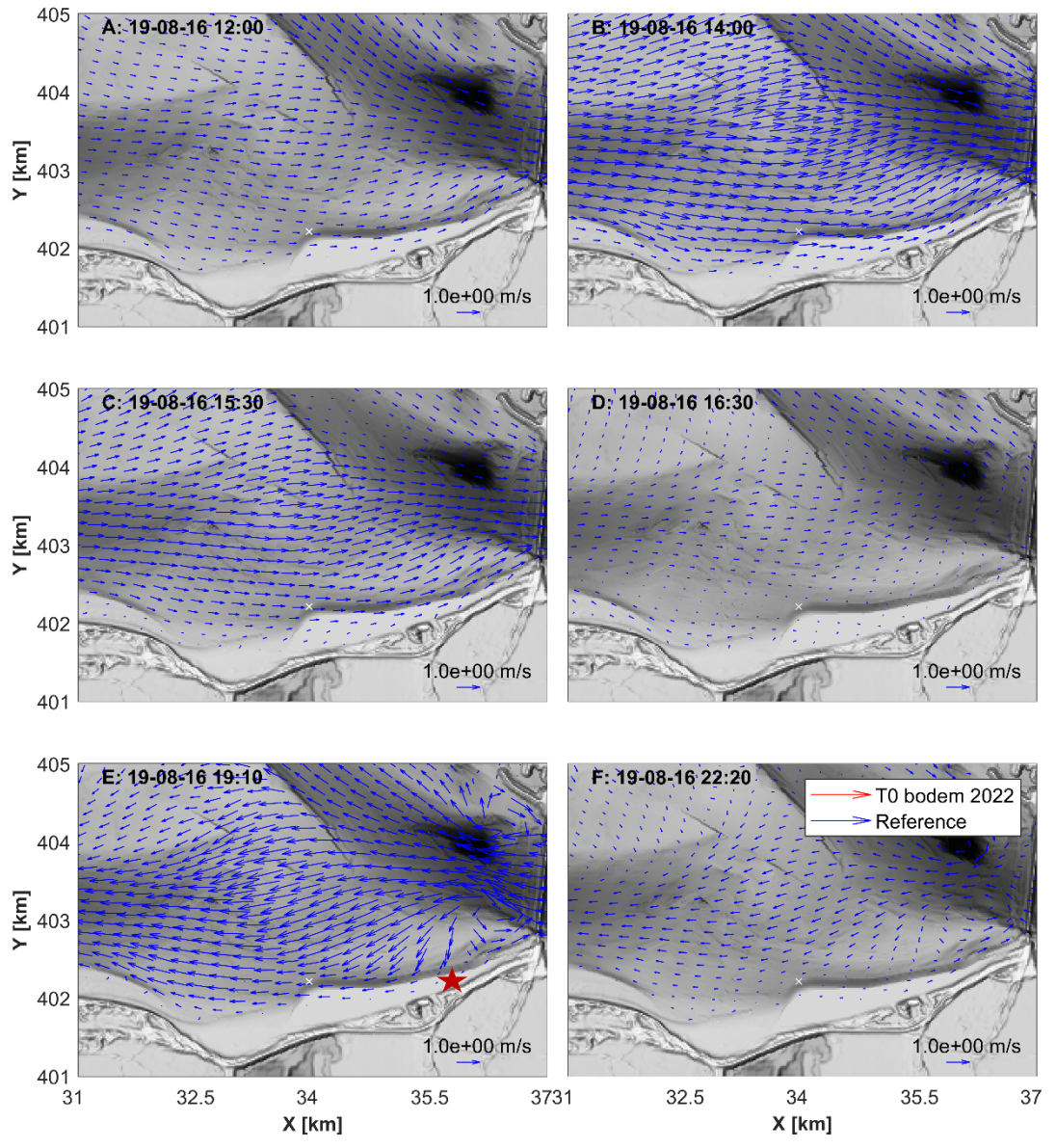
De modelresultaten laten een groot netto transport ter hoogte van de kering zien (Figuur 3-8). Deze transporten zullen in werkelijkheid niet optreden, maar zijn het resultaat van de modelschematisatie. In het model is een ruimtelijk uniform sedimentdikte van 5m opgelegd. Hierbij is geen rekening gehouden met de in werkelijkheid aanwezige bodembescherming bij de kering.

Het golfklimaat is gereduceerd tot een enkele golfhoogte van 2 m uit westelijke richting. Door dissipatie van de golfenergie neemt deze golfhoogte al af voordat de buitendelta wordt bereikt. Net zeewaarts van de monding ligt de significante golfhoogte rond 1,5 m, wat overeenkomt met de gemiddelde golfhoogte op lange termijn (5 – 10 jaar). Op de ondiepe banken van het mondingsgebied vindt een verdere reductie van de golfhoogte plaats (Figuur 3-9). Op de Onrust en in de Schaar van Onrust bedraagt de golfhoogte nog 0,6 tot 0,7m.

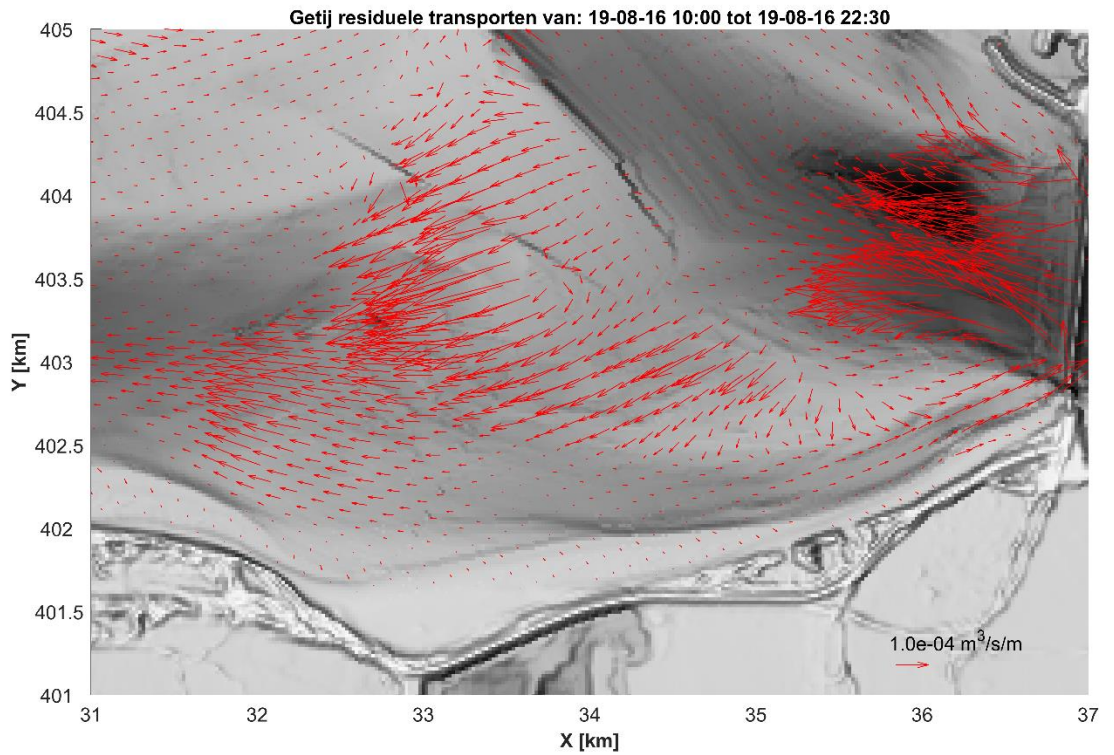
In Appendix B.1 worden aanvullende resultaten voor de referentiesimulatie getoond.



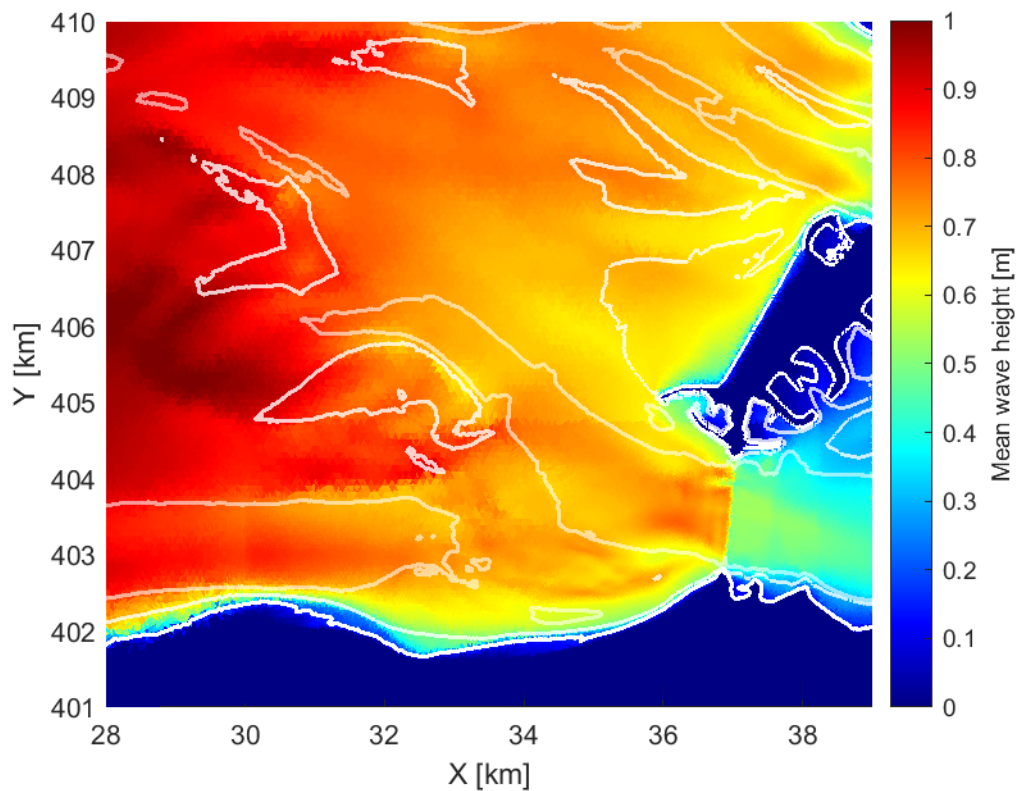
Figuur 3-6 Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode in de monding op basis van de T0-2022 bodem.



Figuur 3-7 Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode in de Schaar van Orrust op basis van de T0-2022 bodem (de referentiebodem is in dit geval gelijk aan de T0 bodem dus de blauwe en rode vector zijn identiek).



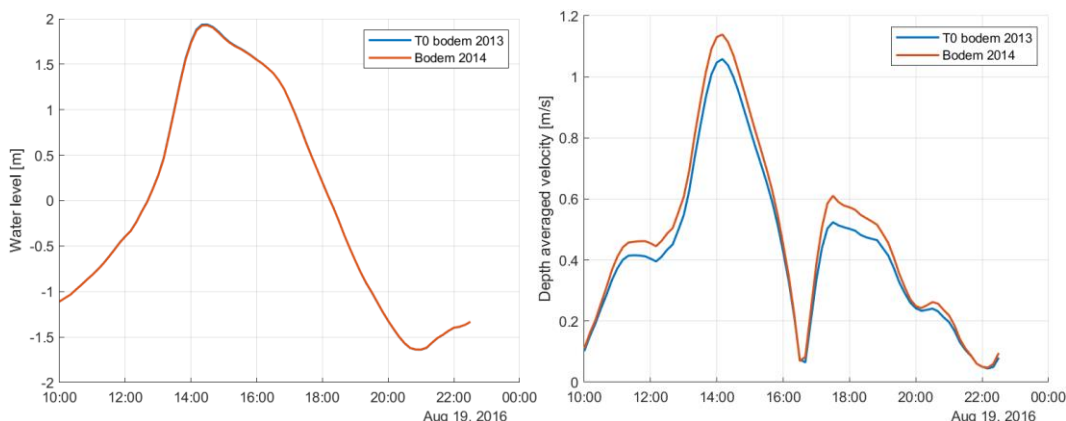
Figuur 3-8 Residuele transporten voor de Schaar van Onrust op basis van de T0-2022 bodem.



Figuur 3-9 Gemiddelde golfhoogte voor de T0-2022 simulatie voor een constant golfklimaat uit het westen ($H_s = 2 \text{ m}$). De contourlijnen laten respectievelijk de -1, -5 en -15 m NAP dieptecontouren zien.

3.4 Evaluatie van de 2013 geulwandsuppletie

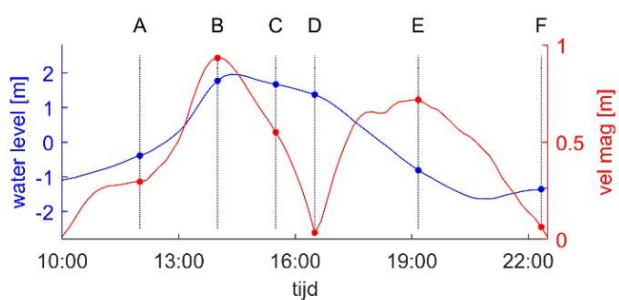
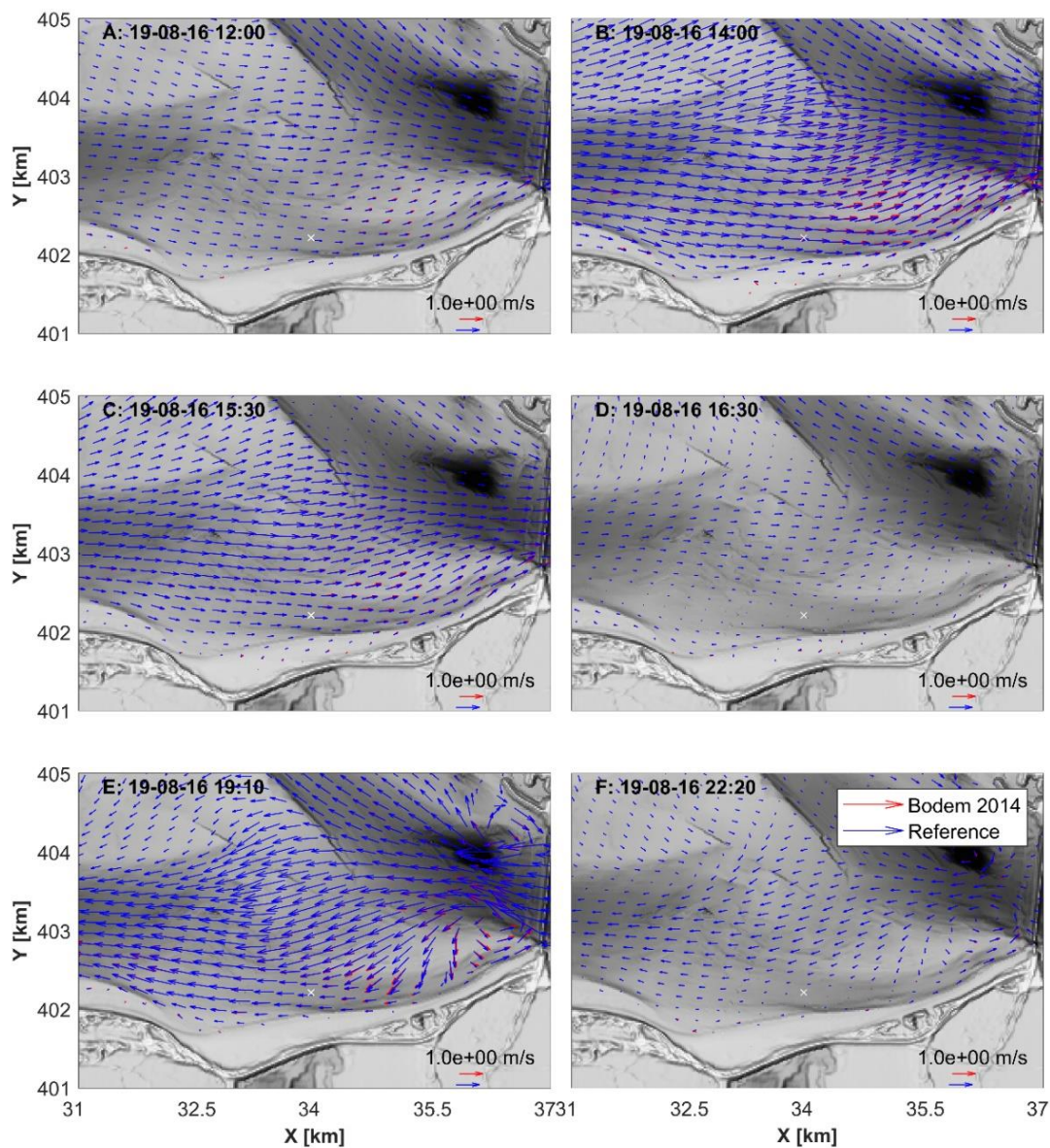
Het effect van de geulwandsuppletie in 2013 op de waterbeweging en sedimenttransporten is geëvalueerd door middel van een simulatie met de 2013 bodem (vóór aanleg van de strand- en geulwandsuppleties) en de 2014 bodem (inclusief suppleties) te vergelijken. In deze bodems is alleen het Jarkus deel van de bodem aangepast. De grootschalige waterbeweging is voor beide simulaties gelijk. De belangrijkste modelresultaten worden in deze paragraaf beschreven, zie Appendix B.2 voor aanvullende figuren.



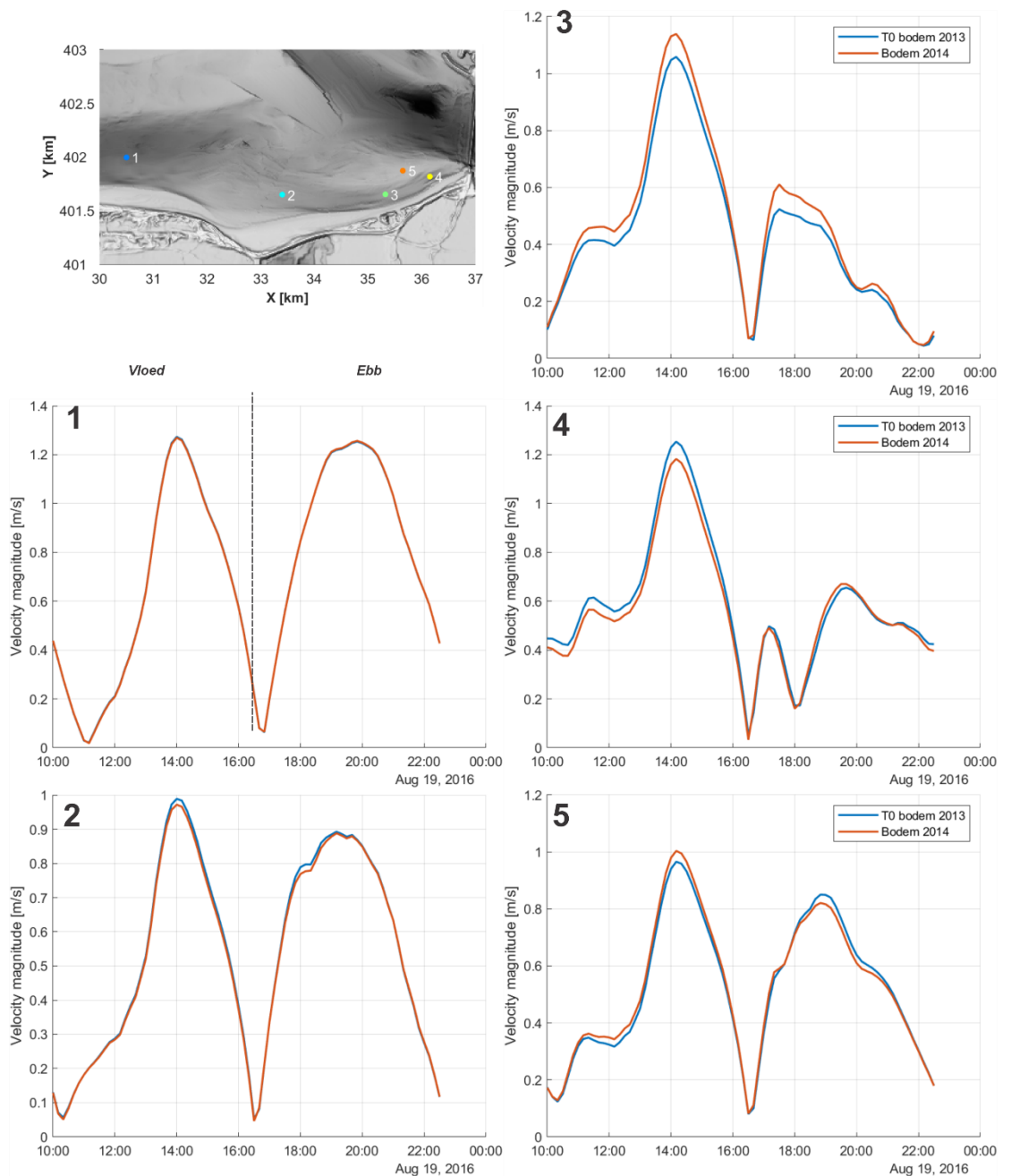
Figuur 3-10 Waterstand (links) en diepte-gemiddelde snelheid (rechts) in de Schaar van Onrust voor de 2013 bodem (blauw) en de 2014 bodem (rood). De getoonde tijdseries komen overeen met locatie 3 in Figuur 3-12 en Figuur 3-14.

Het lokale effect van de suppletie wordt duidelijk zichtbaar in de tijdserie van waterstanden en snelheden in de Schaar van Onrust (Figuur 3-10). De suppletie heeft geen direct effect op de waterstanden (Figuur 3-10, links). Dit is begrijpelijk, omdat de waterstanden gedreven worden door de grootschalige getijbeweging van de Noordzee. Een relatief kleine lokale verstoring van de bodem van de Schaar van Onrust, zoals de uitgevoerde geulwandsuppletie, heeft hier niet direct een effect op. Een effect op de snelheden is echter wel zichtbaar (Figuur 3-10, rechts). De waterstanden en dus ook de waterstandsgradiënten zijn voor en na uitvoering van de suppletie gelijk. Grootschalig bepaalt de gradiënt in waterstand de stroming die door de geul wordt gestuurd. Deze gradiënt blijft gelijk, maar het doorstroomoppervlakte van de geul is afgenomen door de suppletie. Dit zorgt voor een toename in de stroomsnelheden. Op de locatie van de suppletie is deze toename maximaal en bedraagt dan ongeveer 110% van de oorspronkelijke snelheden (Figuur 3-10, rechts).

Een overzicht van de grootschalige stroomvelden illustreert dat de beïnvloeding van de stroming vooral een lokaal effect geeft (Figuur 3-11). Beïnvloeding van de stroming is zichtbaar op de locatie van de suppletie. Tijdens vloed (Figuur 3-11B) is een klein verschil waar te nemen oostelijk van de suppletie in de geul en op de Onrust. Tijdens eb wordt een vergelijkbaar gebied beïnvloed (Figuur 3-11D,E). De lokale invloed van de suppletie is ook zichtbaar in de snelheidstijdseries voor 5 representatieve locaties (Figuur 3-12). In de meest zeewaartse locatie (locatie 1, bij Breezand) is geen verschil in stroomsnelheden waar te nemen. De verschillen ter hoogte van de Veerse Gatdam, locatie 2 buiten het suppletiegebied, zijn ook beperkt. Alleen tijdens piek vloed en eb is een klein verschil (<1%) in snelheid berekend. De verschillen worden groter in de Schaar van Onrust (locaties 3 en 4). In locatie 3 nemen de snelheden iets toe (maximaal ongeveer 10%), terwijl op locatie 4 de snelheden tijdens vloed juist iets afnemen (maximaal minder dan 10%). Opvallend is vooral dat de snelheden op de voorliggende Onrust (locatie 5) ook beïnvloed worden. Deze locatie ligt duidelijk buiten de directe invloed van de suppletie, maar toch worden de snelheden iets verhoogd tijdens vloed en iets verlaagd tijdens eb. De verandering is kleiner dan die in de Schaar van Onrust (maximaal enkele procenten).



Figuur 3-11 Snelheden van de simulatie met de T0-2013 bodem (Reference; blauwe pijlen, vóór aanleg van de strand- en geulwandsuppleties) en de 2014 bodem (rode pijlen, inclusief suppleties).



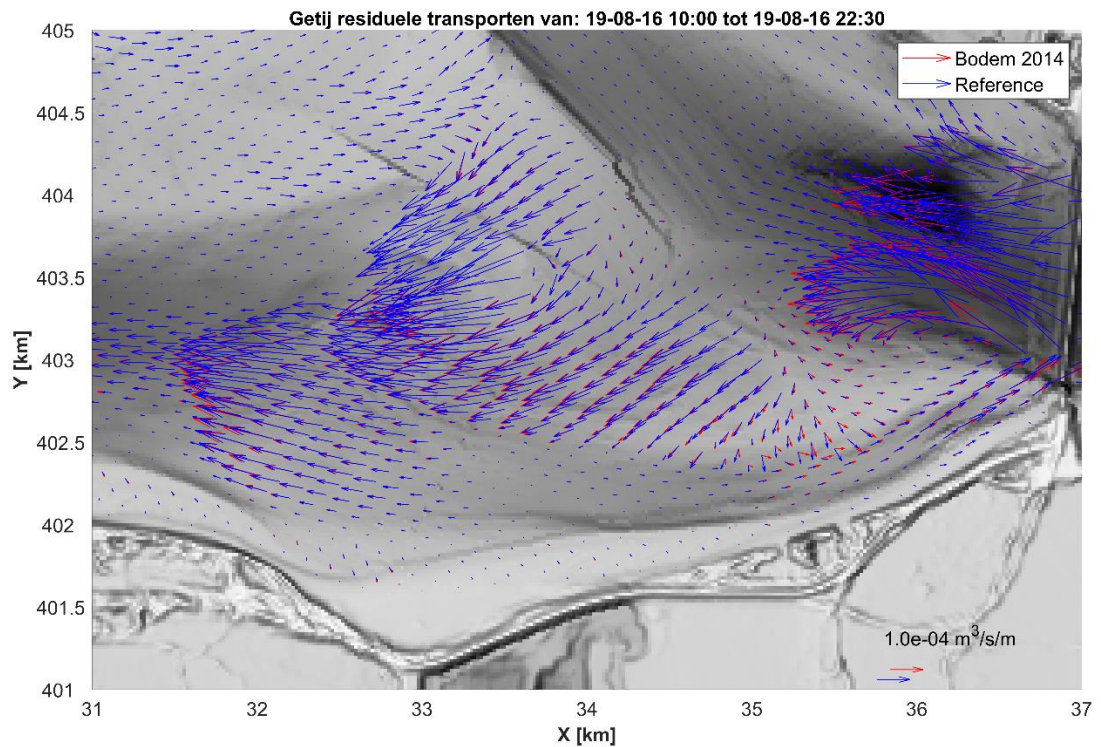
Figuur 3-12: Overzicht van de dieptegemiddelde stromingen in 5 representatieve punten voor de 2013 simulatie (zonder strand- en geulwandsuppletie) en 2014 bodem (incl. strand- en geulwandsuppletie).

Sedimenttransport wordt bij benadering gerepresenteerd met stroomsnelheid tot een macht 5 in het model. Dit zorgt ervoor dat kleine verschillen in stroomsnelheden, vooral als deze niet gelijk zijn tijdens eb en vloed, worden uitvergroot in de residuele sediment transporten (Figuur 3-13 en Figuur 3-14). Het residuele transportveld laat zien dat de grootste verschillen optreden op de Onrust en ter plaatse van de suppletie (locatie 3). Hier treedt een zichtbaar verschil op in grootte en richting van het sedimenttransport.

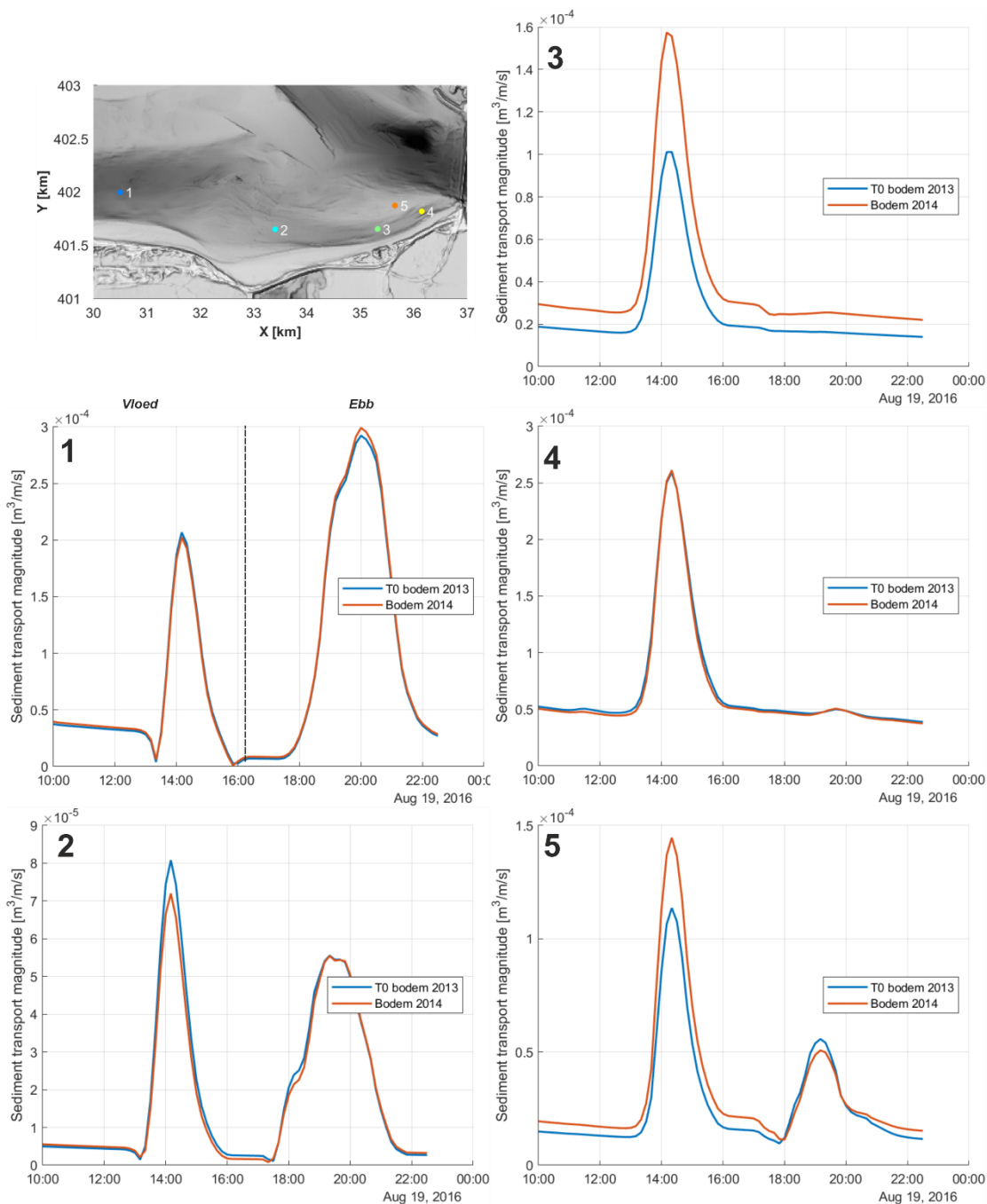
Tijdseries van het sedimenttransport op enkele specifieke locaties geven meer inzicht in de invloed van de suppletie (Figuur 3-14). De grootste verschillen zijn zichtbaar ter plaatse van de suppletie (locatie 3) en op de Onrust (locatie 5). De aanleg van de suppletie zorgt initieel dus voor een duidelijke vergroting van de transporten op de suppletielocatie. De piek vloed transporten nemen met $0,6 \text{ m}^3/\text{m/s}$ ofwel 160% toe (Figuur 3-14, locatie 3).

In de Schaar van Onrust zijn de residuele transporten en de verschillen beperkt (Figuur 3-13). De relatief grote verschillen in sedimenttransport zoals zichtbaar in de tijdserie leiden dus niet tot grote netto (residuele) transporten in de geul. Dit geeft ook gelijk een verklaring voor de geobserveerde stabiliteit van de suppletie.

Op de Onrust (locatie 5, Figuur 3-14) zorgt de suppletie ook voor een vergroting van de transporten met $0,3 \text{ m}^3/\text{m/s}$ bij piek vloed. Het residuele transportveld laat hier wel een significante verandering in grootte en richting van het netto (residueel) sedimenttransport zien op de Onrust (Figuur 3-13). Dit komt overeen met de geobserveerde morfologische verandering van de Onrust na de suppletie, de erosie en verflauwing van de geulwand aan de zijde van de Onrust (H2).



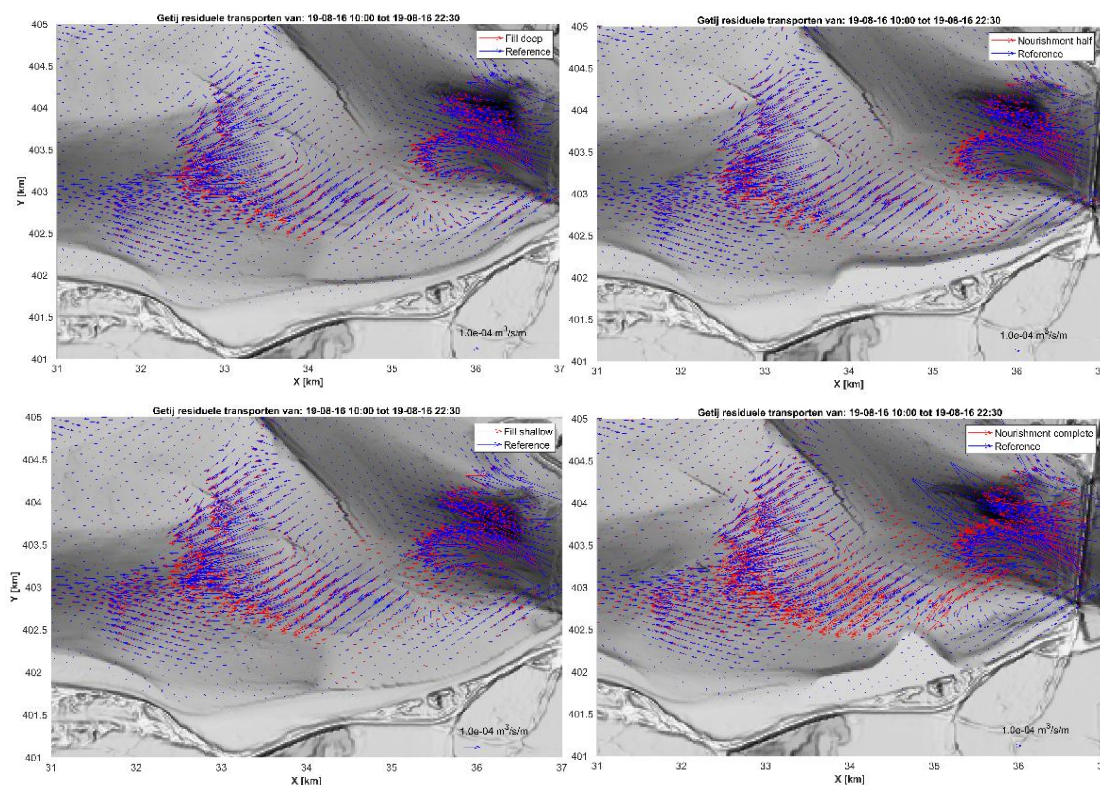
Figuur 3-13 Residuele transporten bij de Schaar van Onrust op basis van de 2014 bodem (Jarkus 2014; rode pijlen, incl. strand- en geulwandsuppletie) en de T0-2013 bodem (Reference; blauwe pijlen, zonder strand- en geulwandsuppletie).



Figur 3-14: Overzicht van de sedimenttransporten in 5 representatieve punten voor de T0-2013 simulatie (zonder strand- en geulwandsuppletie) en 2014 bodem (incl. strand- en geulwandsuppletie).

3.5 Modelresultaten voor de gevoeligheidssimulaties

De suppletievarianten doorgerekend in de gevoeligheidssimulaties zijn geen realistische suppletieontwerpen, maar bedoeld om inzicht te krijgen in de effecten van grootschalig ingrijpen (door opvullen of dichtzetten) van de Schaar van Onrust. Een belangrijke conclusie van deze gevoeligheidssimulaties is dat de grootschalige effecten voor alle varianten waarschijnlijk beperkt zijn. Er vindt vooral een lokale beïnvloeding plaats, maar of dit de grootschalige waterbeweging in de monding direct zal beïnvloeden, kan niet direct worden geconcludeerd op basis van de modelresultaten.

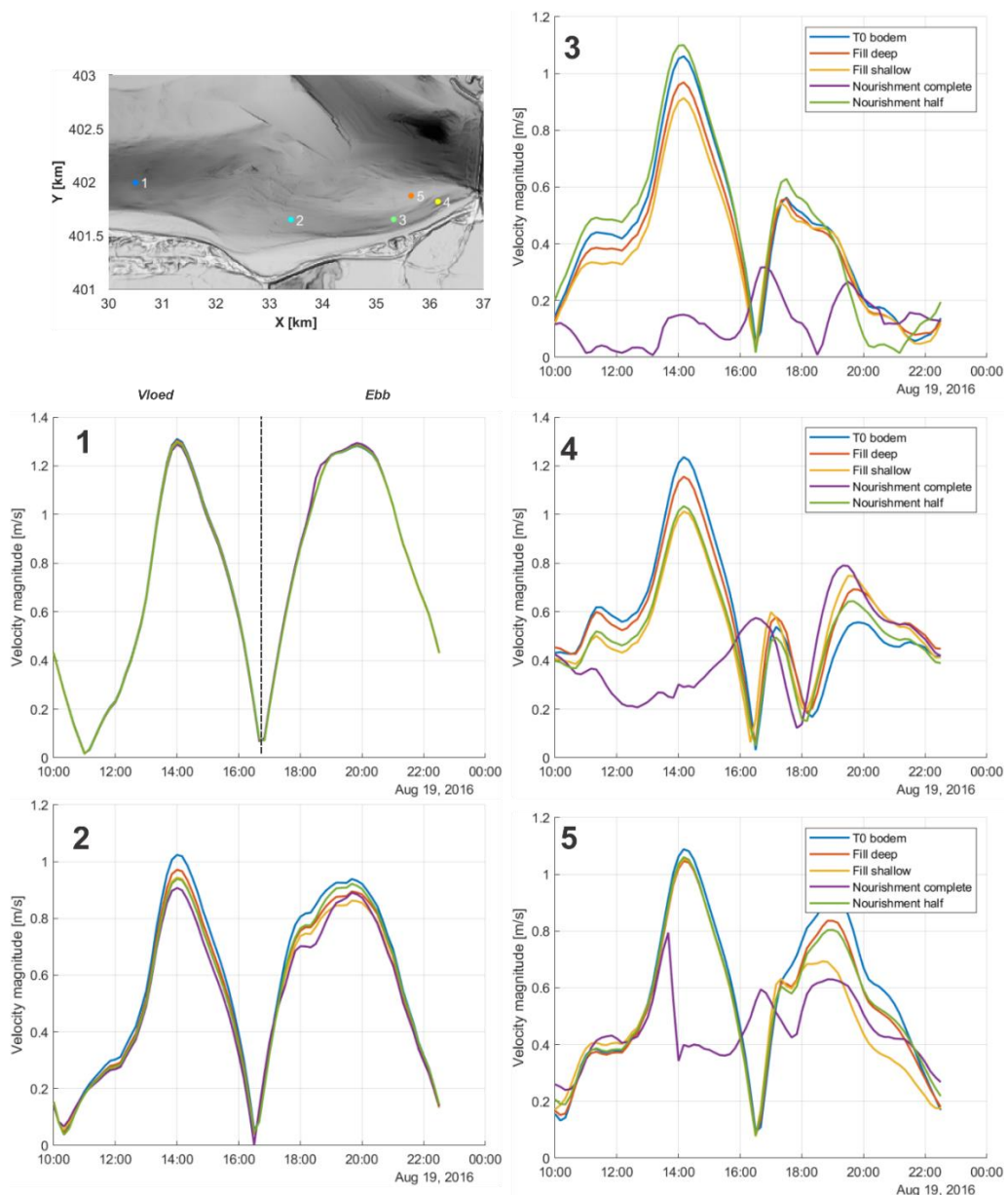


Figuur 3-15 Residuele transporten bij Schaar van Onrust voor suppletievariant: (a) Gedeeltelijke opvulling (fill deep), (b) Kustdwarse uitbouw (Nourishment half), Volledige opvulling (Fill shallow) en Volledige afsluiting (Nourishment complete). In alle figuren geven de rode vectoren de suppletievariant weer en de blauwe vectoren de referentie simulatie. (T0 - 2022) (blauwe pijlen).

Op lokale schaal zijn er wel duidelijke veranderingen in de stromingen en (residuele) transporten door suppleren van de Schaar van Onrust. De verandering in stroming wordt geïllustreerd in Appendix B.3 – B.6 en samengevat door Figuur 3-16. Alle varianten hebben nauwelijks effect in de Roompot Zuid (locatie 1). Ter hoogte van de Veerse Gatdam (locatie 2) is een kleine afname van de stroming voor alle varianten te onderscheiden. Zowel de vloed als ebstromingen reduceren, met de grootste reductie voor de volledige of gedeeltelijke geulafsluiting. Het is voor alle varianten waarschijnlijk dat de sedimentatie bij de Veerse Gatdam versnelt door de ingreep. De invloed van de suppletie is duidelijk zichtbaar in de Schaar van Onrust (locaties 3 en 4). De volledige afsluiting reduceert de stroming tot vrijwel nul. Voor de overige varianten zijn de verschillen kleiner. De gedeeltelijke geulopvulling geeft een verhoging van de stroming om de suppletie heen. De geulbodemsuppleties geven een duidelijke reductie van de stromingen. De volledige opvulling geeft daarbij de grootste reductie in stroming. In alle varianten (m.u.v. de complete afsluiting) vindt een vergelijkbare beïnvloeding van de stroming op de Onrust (locatie 5) plaats. De vloedstroming is onveranderd, maar de ebstroming reduceert sterk. Deze asymmetrische respons is een belangrijke oorzaak voor de duidelijke respons in residueel transport op locatie 5 (Figuur 3-15).

Het volledig dichtzetten van de geul geeft lokaal (in de tijdseries in Figuur 3-16), maar ook ruimtelijk (de residuele transportvelden in Figuur 3-15) de grootste impact. Of deze impact groot genoeg is om de monding als een geheel te beïnvloeden kan niet direct worden geconcludeerd op basis van de model resultaten. Het lijkt waarschijnlijk (o.b.v. expert beoordeling) dat grootschalig niet direct een grote verandering op zal treden door afsluiting van de Schaar van Onrust. Wel zal lokaal een grote verandering optreden. De kust aan weerszijden van de suppletie zal waarschijnlijk veel sneller verzanden.

Indirect kan de suppletie de stroming tussen Oude Roompot en Roompot Zuid beïnvloeden. Een rechttere kust langs Noord-Beveland geeft een efficiëntere doorstroming tussen Oude Roompot en Roompot Zuid. Het drempelgebied zou dan iets kunnen verdiepen waardoor de Oude Roompot als stroomgeul wat debiet overneemt van de Roompot. Dit zou dan gaan om een grootschaligere verdieping van de bank Onrust als geheel, in tegenstelling tot de relatief kleinschalige en lokale verdieping die de afgelopen jaren wordt geobserveerd (H2.3).



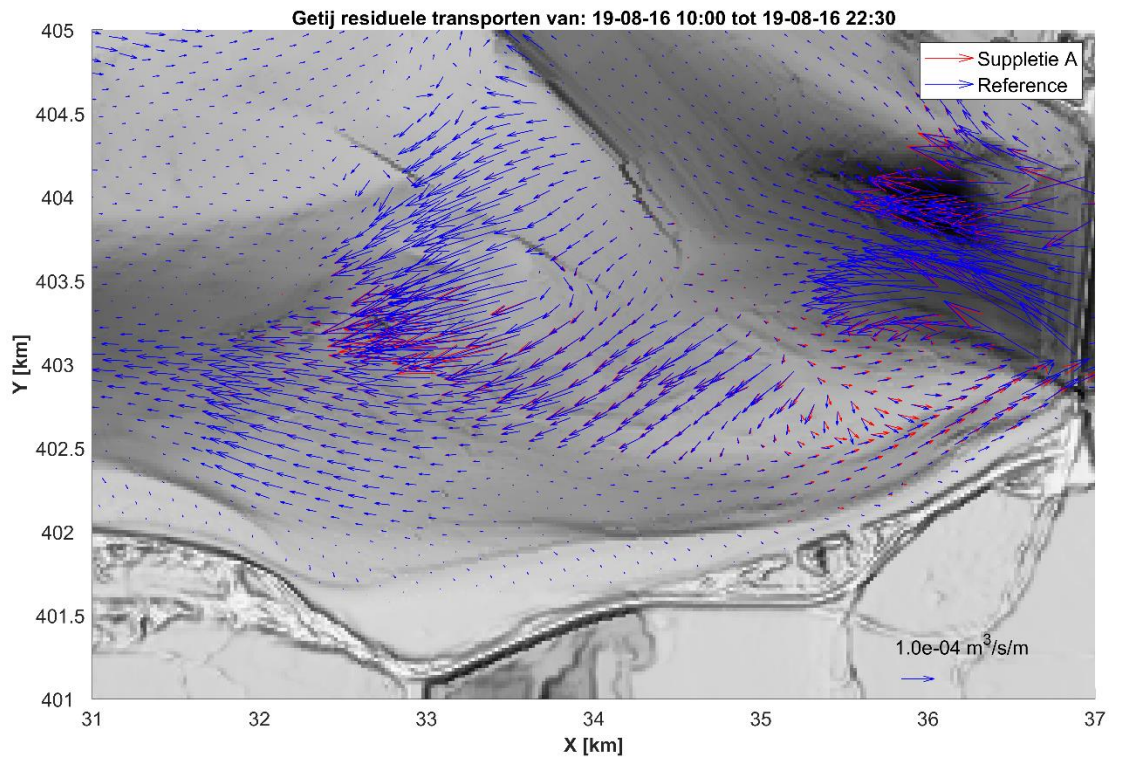
Figuur 3-16: Overzicht van de dieptegemiddelde stromingen in 5 representatieve punten voor de referentiesimulatie (T0-2022, blauw) en de suppletievarianten.

3.6 Modelresultaten voor de RWS suppletieontwerpen

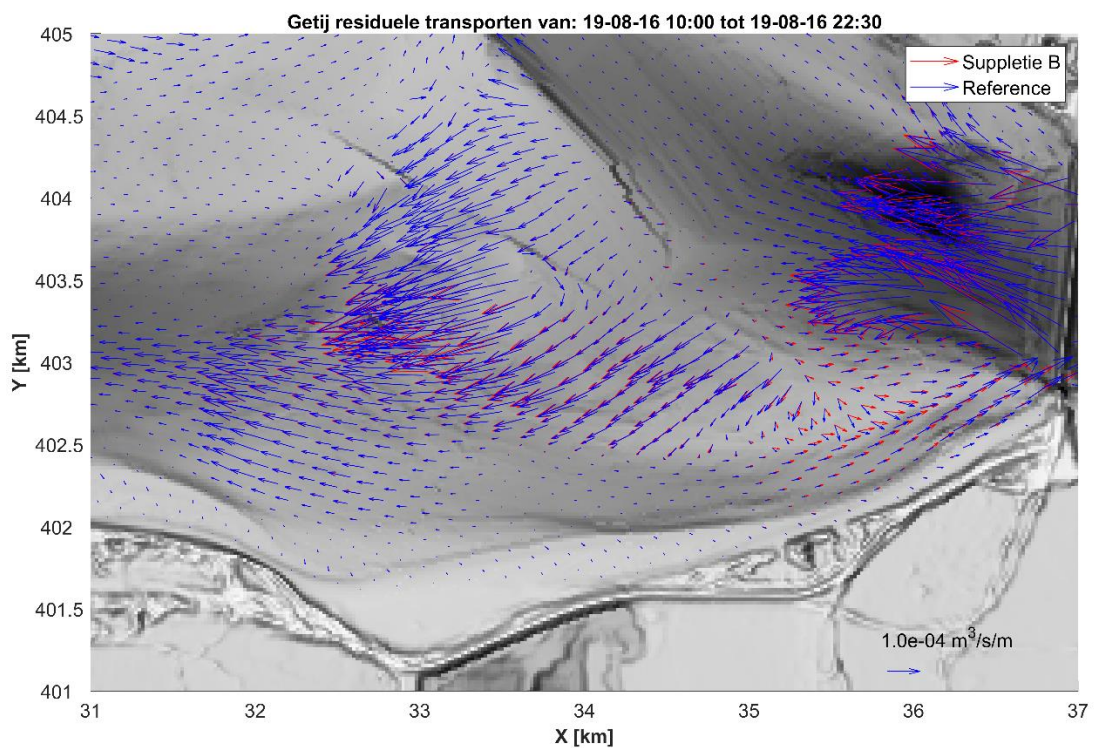
Met de suppletievarianten die RWS heeft aangeleverd, zijn de modelresultaten voor stromings- en transportpatronen vrijwel identiek aan de referentiesimulatie zoals gepresenteerd in H3.3 (Figuur 3-17 en Figuur 3-18). Voor de volledigheid worden de berekende stromingen en sedimenttransporten voor de suppletievarianten weergegeven in Appendix C. In beide varianten zijn de effecten op het (residueel) sedimenttransport beperkt. Transporten op de Onrust richting de Schaar van Onrust nemen iets toe, maar vertonen vooral een kleine oostelijke rotatie. In de Schaar van Onrust nemen de residuele transporten in oostelijke richting toe. De grootste toename vindt plaats aan de zeewaartse zijde van de geul. Soortgelijke verschillen zijn ook zichtbaar ten gevolge van de 2013 geulwandsuppletie (H3.4).

De beïnvloeding van de stroming is samengevat in Figuur 3-19 voor 5 representatieve locaties. De meest zeewaartse locatie (1) in de Roompot Zuid, nabij Breezand, zijn er geen verschillen tussen de referentiesimulatie en de suppletievarianten te onderscheiden. Ook bij de Veerse Gatdam (2) zijn de effecten nihil. Grotere effecten zijn wel zichtbaar in de Schaar van Onrust (locaties 3 en 4). Ter plaatse van de suppletie (locatie 3) worden de snelheden versterkt, waarbij de beïnvloeding tijdens de vloedperiode vrijwel identiek is in vorm en grootte voor beide varianten. Tijdens eb vertonen beide suppleties ook een verhoging van de snelheid. De maximale ebsnelheid is daarbij identiek, maar gedurende de ebperiode liggen de snelheden bij de gedeeltelijke geulopvulling (variant 2) iets hoger dan die van de geulwandsuppletie (variant 1). In oostelijke richting (locatie 4) zijn de stroomsnelheden tijdens de vloed periode juist lager in vergelijking met de referentie simulatie. De grootste verlaging wordt bereikt door de gedeeltelijke geulopvulling. Tijdens eb zijn de verschillen beperkt. Alleen de geulbodemsuppletie vertoont een kleine toename in de pieksnelheden. De verandering in snelheid ten opzichte van de T0 is ongeveer gelijk of iets kleiner dan die geobserveerd bij de 2013 geulwandsuppletie (H3.4).

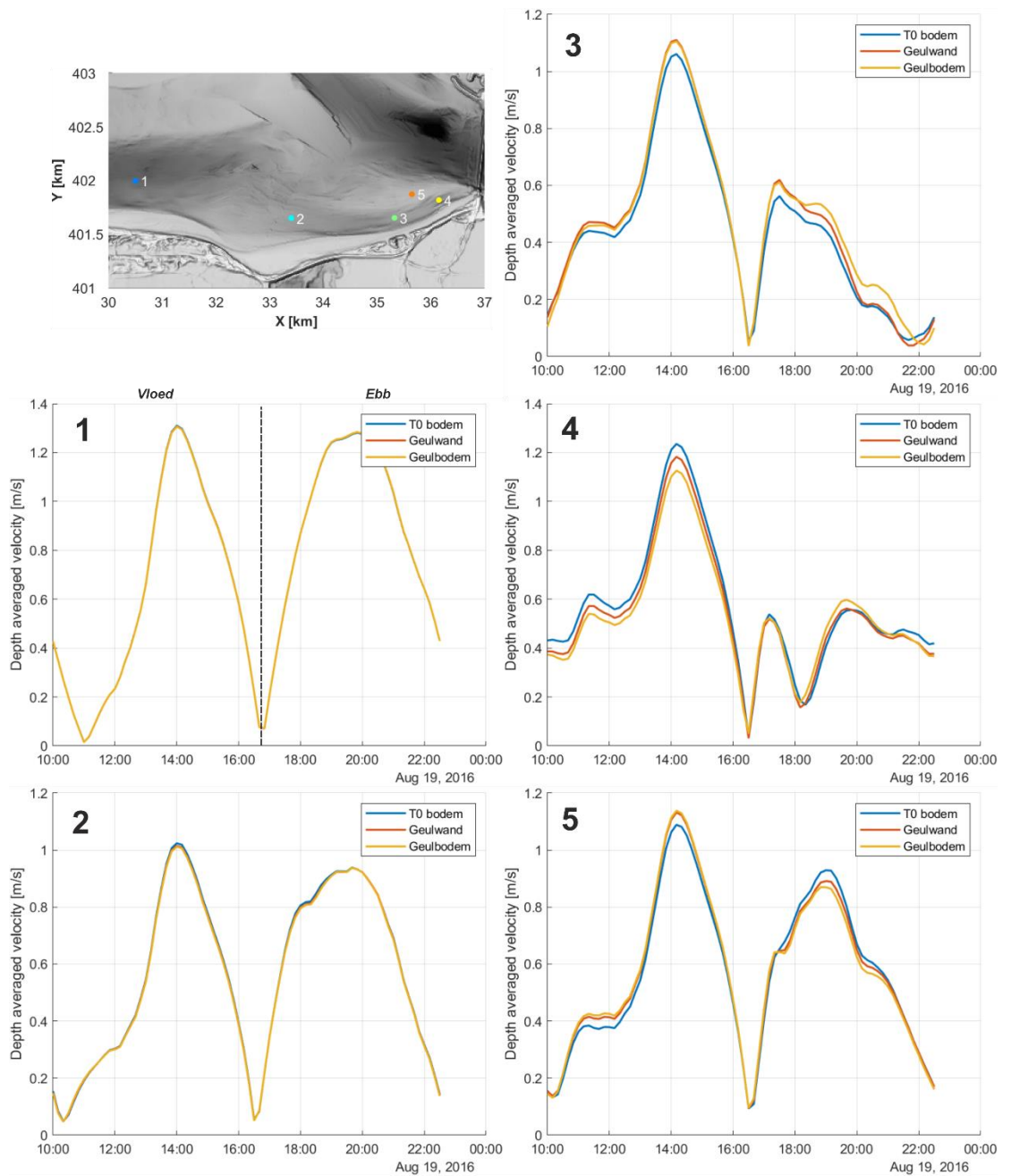
In het midden van de suppletie is ook in detail gekeken naar enkele locaties over een dwarsraai waar het zwaartepunt van de suppletievarianten ligt (tussen BKL-raai 260 en 280; Figuur 3-20). Kijkend over de geuldoorsnede dan worden de verschillen tussen de twee varianten nog iets uitvergroot. Aan de landwaartse zijde van de geul (Figuur 3-20, locatie 1) worden de ebstromingen door de geulwandsuppletie niet beïnvloed, maar de vloedstromingen reduceren sterk. De gedeeltelijke geulopvulling reduceert juist de piek vloedstroming en heeft een kleiner effect op de ebstroming. In het overige deel van de geul zijn de verschillen tussen de 2 varianten beperkt (maximaal ca. 10%). Op de iets grotere schaal lijkt dit echter geen verschil in transport te veroorzaken.



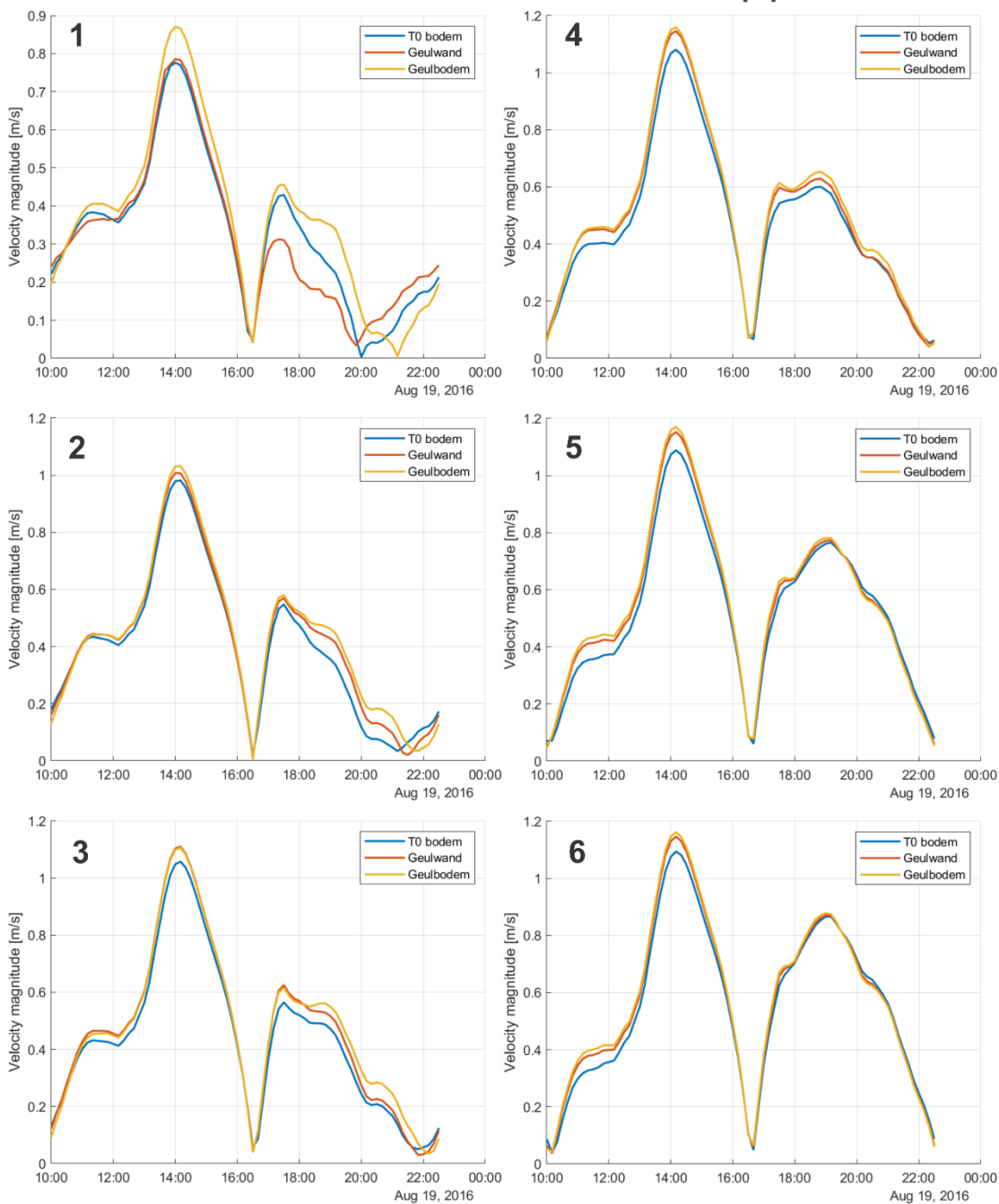
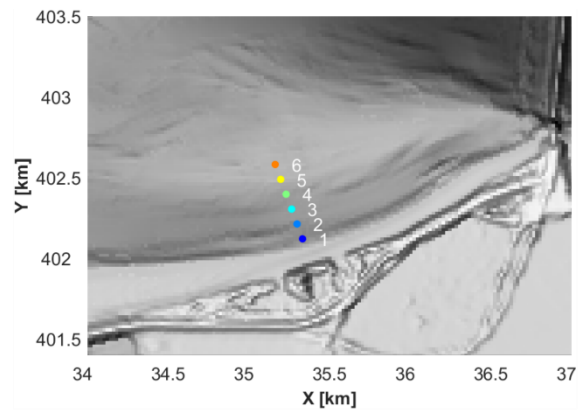
Figuur 3-17 Residueel transport bij Schaar van Onrust voor suppletievariant 1 'Geulwand' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).



Figuur 3-18 Residueel transport bij Schaar van Onrust voor suppletievariant 2 'Geulbodem' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).



Figuur 3-19: Overzicht van de dieptegemiddelde stromingen in 5 representatieve punten voor de referentiesimulatie (T0-2022, blauw) en de suppletievarianten geulwand (1; rood) en geulbodem (2; geel).



Figuur 3-20: Gedetailleerd overzicht van de dieptegemiddelde stromingen in 6 punten ter hoogte van de suppletielocatie.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Conclusies van deze rapportage worden gegeven door middel van het beantwoorden van de onderzoeksvragen:

1 Wat is het effect geweest van de geulwandsuppletie in 2013 op de kust van Noord-Beveland?

De geulwandsuppletie heeft de geulbodem gedeeltelijk opgevuld en is hier grotendeels blijven liggen tussen 2014 en 2022. Uit de modelsimulaties volgt dat door de geulopvulling de stromingen in de geul ter plekke van de suppletie iets zijn toegenomen (maximaal zo'n 10%). De verandering in stromingen resulteert in een kleine verandering van de residuele transporten in de Schaar van Onrust en op de bank Onrust. Buiten de suppletielocatie zijn de effecten op sedimenttransport en stroomsnelheden beperkt.

De geulwand- en strandsuppletie in 2013 hebben er niet voor gezorgd dat de structurele erosie van het strand en de landwaartse verplaatsing van de MKL is afgenomen. Een belangrijke reden hiervoor is dat op het strand nog onverminderd de erosieve processen plaatsvinden (opwoeling van het zand). Daarnaast heeft de geulopvulling er voor gezorgd dat de aangrenzende geulwanden verflauwen, zoals terug te zien is in de bodemontwikkeling van de Onrust tussen 2014 en 2022. De verflauwing van de geulwand aan de zijde van de bank Onrust is het sterkst en zorgt voor een afname van hoogte van de bank. Doordat de getijstromingen veranderen in de geul, kan een steile geulwand (zoals voor de suppletie) niet in stand worden gehouden. Deze twee processen (opwoeling van zand en verflauwing geulwand) samen zijn waarschijnlijk de oorzaak dat de MKL zich ook na aanleg van de geulwandsuppletie met vergelijkbare snelheid blijft terugtrekken. Op de grotere schaal van de Oosterscheldemonding zijn er echter geen directe effecten van de 2013 suppleties zichtbaar.

2 Wat zijn de te verwachten effecten op stromings- en sedimenttransporten bij verschillende suppletievarianten?

Rijkswaterstaat heeft 2 suppletievarianten aangeleverd: (1) strand-geulwandsuppletie en (2) geulopvulling. De gemodelleerde effecten van beide varianten zijn vrijwel identiek en komen overeen met de geobserveerde respons van de 2013 suppleties. De lokale snelheden in de Schaar van Onrust, ter plekke van de suppletie, nemen iets toe. Maar deze toename is beperkt (< 10%). Voor beide varianten is ook de eerder geobserveerde beïnvloeding van de residuele transporten op de Onrust zichtbaar. De morfologische veranderingen zoals geobserveerd sinds 2013 zullen zich in de toekomst dan waarschijnlijk onveranderd doorzetten voor beide varianten.

De simulaties uitgevoerd met hypothetische suppletievarianten laten zien dat alleen bij volledige dichtzetting van de Schaar van Onrust een duidelijk grotere beïnvloeding van de transporten optreedt. Ook deze variant zal de monding niet direct grootschalig beïnvloeden, maar veranderingen van de bank Onrust en het drempelgebied tussen Roompot Zuid en Oude Roompot zijn wel te verwachten. Deze veranderingen zouden op termijn de stromingen richting de kering kunnen beïnvloeden, waardoor er bijvoorbeeld veranderingen in de aanliggende ontgrondingskuilen kunnen optreden.

3 *Welke effecten en risico's kunnen we bij een geulopvulling verwachten op (eventuele versnelde erosie van) het strand?*

Het is niet de verwachting dat de geulopvulling direct een groot effect heeft op de stranderosie van het Banjaardstrand, en geen grote risico's voor het versnelde erosie van het strand en de harde elementen in de kustverdediging. De suppletie zal de huidige erosie van het strand (en in de MKL rekenschijf) ook niet wegnemen. Het is waarschijnlijk dat de trend gelijkwaardig is aan de ontwikkelingen sinds aanleg van de 2013 geulwandsuppletie. De verflauwing van de geulwand zal zich doorzetten. Op de korte termijn (komende 5 jaar) zal daardoor de erosieve trend niet veel veranderen en frequente strandsuppleties zullen benodigd blijven om de MKL te onderhouden. Echter, op langere termijn zal de verflauwing van de geulwand er voor zorgen dat de strandsuppleties gunstiger, met meer volume in het dwarsprofiel, kunnen worden aangebracht omdat er meer accommodatieruimte ontstaat. Dit zal dan een positief effect hebben op de levensduur van de strandsuppleties.

4 *Welke mogelijke risico's kunnen we bij een geulopvulling verwachten bij harde elementen in de kustverdediging, zoals (de bestortingen van) de Oosterscheldekering en de aanwezige strandhoofden bij raai 180?*

Op basis van data-analyse is er vooral uitbouw van de kust te zien bij de damaanzet van de Oosterscheldekering, ook na de geulwandsuppletie in 2013 is er geen significante verandering te zien. Op korte termijn is er dus geen risico te verwachten bij de harde elementen in de kustverdediging, zolang de Schaar van Onrust en Onrust niet wezenlijk veranderen.

Op langere termijn zouden er wel veranderingen kunnen optreden in de stroming naar de kering toe, als het grootschalige drempelgebied tussen Roompot Zuid en Oude Roompot verandert. Als de Schaar van Onrust geheel opgevuld of verlegd raakt, zal alle stroming via het huidige drempelgebied plaatsvinden, waardoor dit eventueel iets kan verdiepen. Dit zou voor een (kleine) toename van de stroming door de Roompot Zuid kunnen zorgen en een kleine afname van de debieten door de Roompot. Als dit optreedt, geeft dit grootschalig een verandering van de geulen en platen in de monding. Deze verandering zal niet de hele monding anders maken, maar kan er wel voor zorgen dat geulen net iets aanpassen, waardoor de bestortingen van de Oosterscheldekering dan net niet meer op de juiste plaats liggen. Echter, het aanpassen van de geulen kan zowel positief als negatief uitpakken voor het onderhoud van bestortingen (bijvoorbeeld, erosieve locaties kunnen minder erosief worden, waardoor onderhoud van bestortingen niet meer nodig is, of de problemen kunnen zich verplaatsen naar andere locaties waardoor nieuwe bestortingen nodig zijn).

Eventuele (toekomstige) geulwandsuppleties zijn echter niet de directe oorzaak van de (potentiële) lange-termijn verandering, maar kunnen er wel voor zorgen dat het opvullen/verleggen van de Schaar van Onrust sneller plaatsvindt. Er is immers meer sediment beschikbaar. Echter blijft de grootschalige natuurlijke dynamiek ook een belangrijke rol spelen in de toekomstige morfologische ontwikkelingen.

4.2 Aanbevelingen

1 Aanbeveling voor het uitvoeren van de suppletie-ontwerpen

Beide voorgestelde suppletieontwerpen (geulwand en geulbodem) kunnen worden uitgevoerd. Er zijn geen grote risico's voor de versnelde erosie van het strand en de harde elementen in de kustverdediging.

2 Toekomstige suppletiestrategie bij Noord-Beveland

De huidige erosie van het strand (en dus regelmatige BKL-overschrijdingen, ook als de BKL wordt herzien) zal blijven bestaan bij voortzetten van de huidige suppletie inspanning.

Een mogelijke oplossing is het in meerdere fases de Schaar van Onrust opvullen met geulwand- of geulopvulling suppleties. Zodoende kan op lange termijn een brede kustzone worden opgebouwd. Er is wel een kans dat de stroming in Roompot Zuid en Oude Roompot wat zal veranderen (zie conclusie bij onderzoeksvraag 4). Dit versnellen van het opvullen van de Schaar van Onrust kan alleen als dit geen risico geeft voor de bestortingen van de Oosterscheldekering. Daarom is een lange-termijn analyse nodig van mogelijke gevolgen van het verdwijnen van de Schaar van Onrust. Dit kan door hypothetische kustliggingen te creëren en de effecten hiervan door te rekenen met een numeriek model. Met deze relatief eenvoudige simulaties kan in kaart gebracht worden of het opvullen van de Schaar van Onrust een relevant effect heeft op de stroming bij de Oosterscheldekering.

3 Aanvullend onderzoek op lange termijn en metingen

Het is de aanbeveling om de komende geulwandsuppletie na aanleg goed en frequent (meerdere keren per jaar) te monitoren. Een mogelijkheid is het gebied waarin de huidige (hoge resolutie) bodemopnamen van de bestortingen worden gemaakt, uit te breiden door de Schaar van Onrust ook mee te nemen. Een actualisering van dit onderzoek, enkele jaren na aanleg van de geulwandsuppletie, zal aanvullend inzicht verschaffen in de effecten van opvulling van de Schaar van Onrust.

5 Referenties

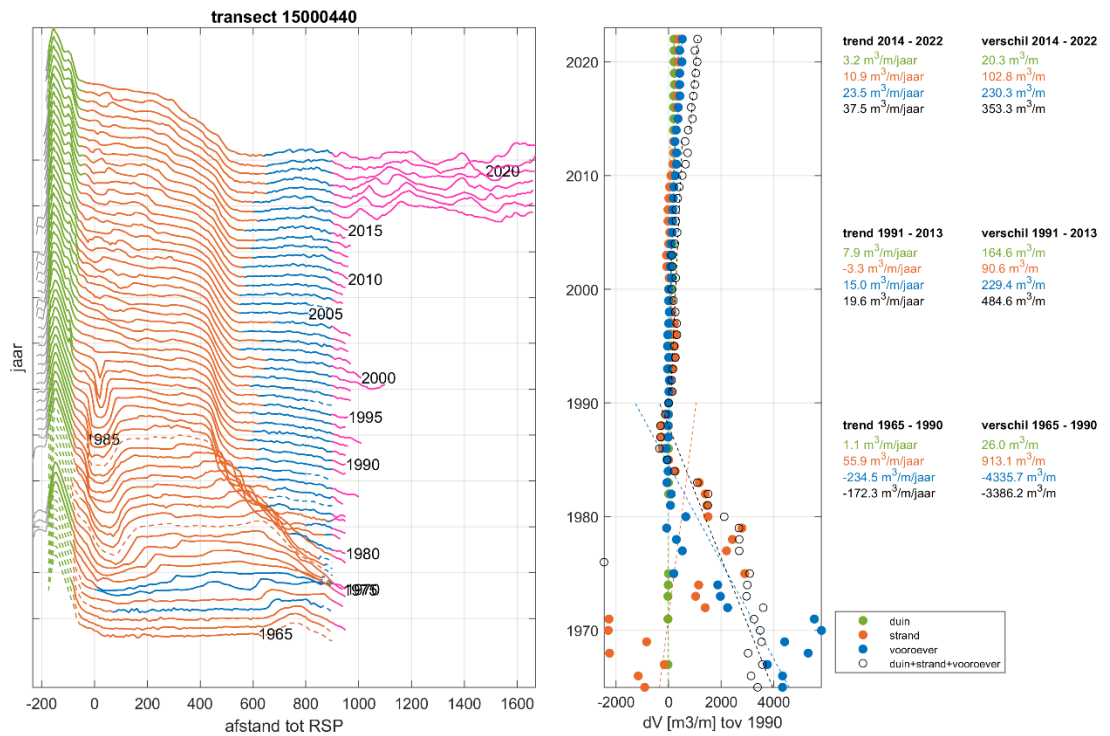
- De Groot, A.V. (2002). Kustlijnhandhaving Onrustpolder, Evaluatie van de effecten van morfologisch baggeren en strandsuppleties. Stageverslag, Universiteit Utrecht, Nederland.
- Dekker, L. (2006). Getijvolumes Roompot-Hompels (concept). Memo, Rijkswaterstaat Dienst Zeeland.
- Dekker, L. (2009). Monitoring morfologisch baggeren Roompot Hompels 2008. Memo, Rijkswaterstaat Dienst Zeeland.
- Dekker, L. (2010). Monitoring morfologisch baggeren Roompot Hompels 2008. Memo, Rijkswaterstaat Dienst Zeeland.
- Eelkema, M., (2013). Eastern Scheldt Inlet Morphodynamics. Proefschrift TU Delft.
- Elias, E., Quataert, E. 2021. Morfologische ontwikkeling Noord-Beveland en Breezand: regio advies kusterosie Banjaardstrand en Breezand. Deltares rapport 11206794-001-ZKS-0002. https://puc.overheid.nl/doc/PUC_636897_31/1/
- Elias, E.P.L., Roelvink, F., Schrijvershof, R., Pearson, S., (2021) Morfologische analyse effecten doorlaat Brouwersdam. Rapport 11206580-004-ZKS-004, Deltares, Delft, 158 p.
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F., (2015). Grootschalige morfologische veranderingen in de Voordelta 1964 – 2013, WERKDOCUMENT. Report 1207724-001, Deltares, Delft. (in Dutch).
- Elias, E.P.L., van der Spek, A.J.F. van der, 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 <https://doi.org/10.1017/njg.2016.37>
- Elias, E.P.L., Van der Spek, (2017). Dynamic preservation of Texel Inlet, the Netherlands: understanding the interaction of an ebb-tidal delta with its adjacent coast. Netherlands Journal of Geosciences, 96 (4), p. 293-317.
- Krikke, L. (2022). Sediment transport pathways at the mouth of the Eastern Scheldt. Graduation report, Delft University of Technology, The Netherlands.
- Schrijvershof, R. (2017). Evaluatie geulwandsuppletie Onrust. Memo 11200538-004-ZKS-0004, Deltares, Delft.
- Tiessen, M., Plieger, R., Groenenboom, J., Winter, G., & Sumihar, J. (2019). Modelontwikkeling D-Hydro Oosterschelde en Veerse meer: twee zesde generatie Rijkswaterstaat modellen. Delft: Deltares.
- Van den Berg, J.H., (1984). Morphological changes of the ebb-tidal delta of the Eastern Scheldt during recent decades. Geologie en Mijnbouw, 63: 363-375.
- Van der Werf, J.J., Doornenbal, P.J., McCall, R.T., 2010. Verkenning van strategieën voor het kustonderhoud bij de Onrustpolder, Zeeland. Rapport 1202349-000, Deltares, Nederland.
- van Rijn, L.C., 1993. Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Amsterdam: Aqua Publications, 700p.

Verhagen, H.J., Maranus, J.W., (1987). Zandgolven en kustverdediging in Zeeland, PT/Civiele techniek, 42 (2), 1987

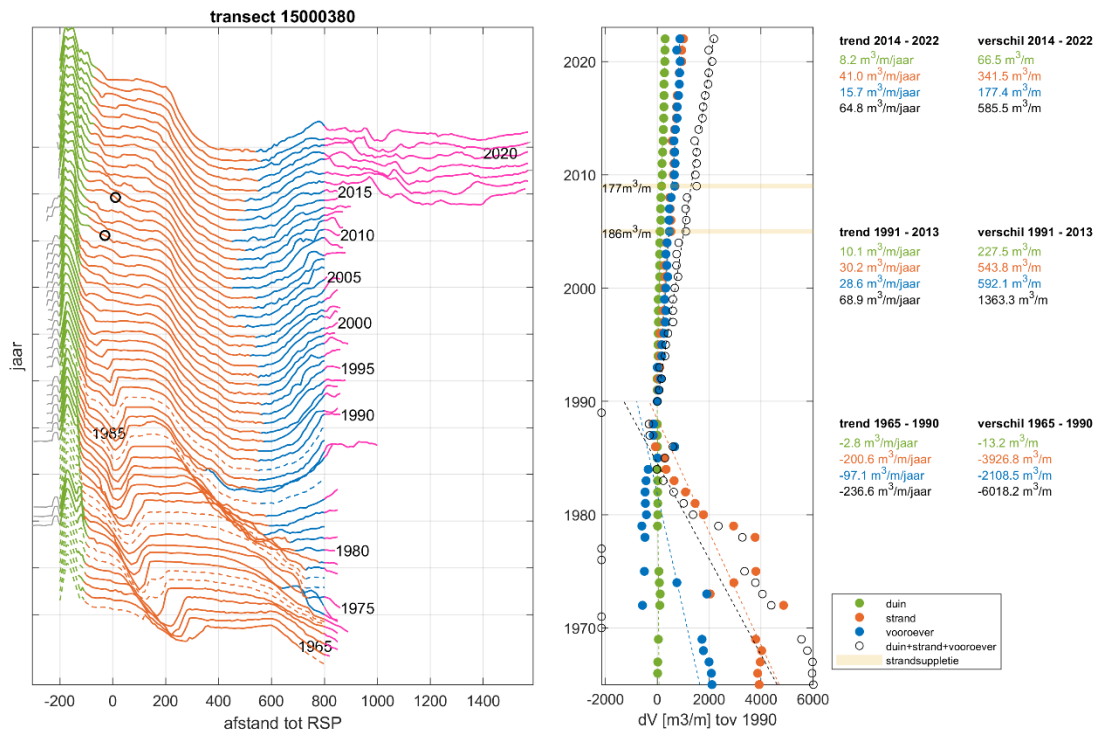
Bijlagen

A Volumebalans Noord-Beveland

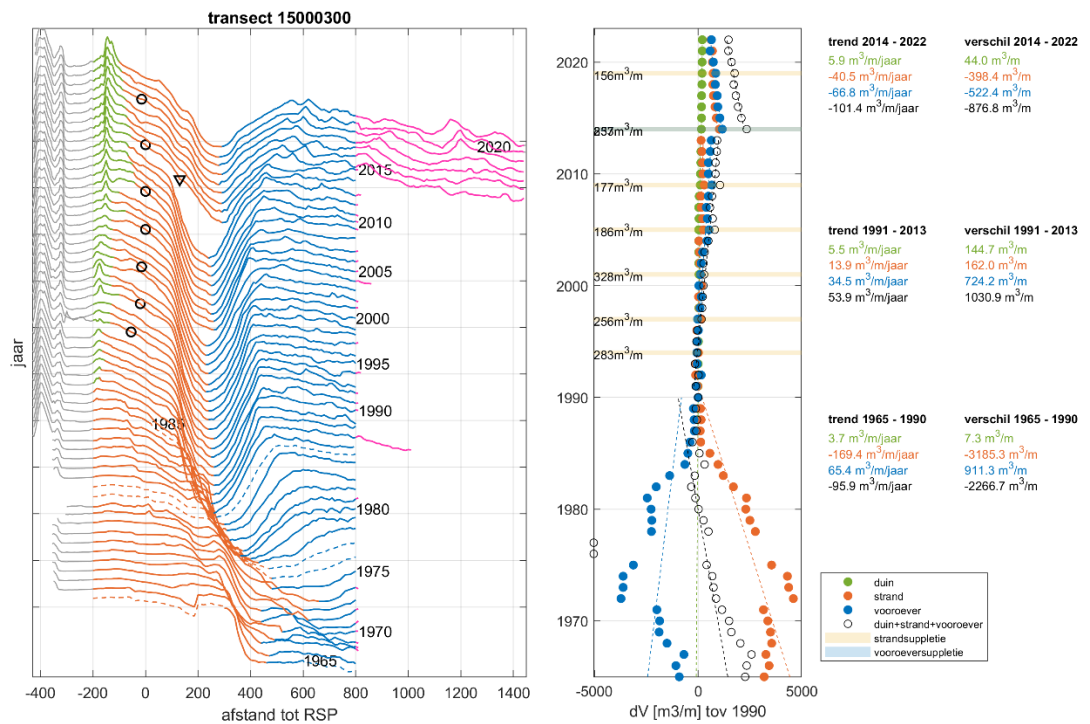
A.1 Volumeontwikkeling per raai



Figuur A-1 Methode voor het bepalen van de volumeontwikkeling bij Jarkusraai 440 bij Noord-Beveland. Links: timestack geeft de dwarsdoorsnedes per jaar gestapeld weer. Het duin is groen, het strand oranje en de vooroever blauw. Rechts: volumeontwikkeling over de tijd voor elke zone, op basis van de gekleurde profielen links. De suppleties zijn weergegeven met de gele (strand) en blauwe (vooroever) vlakken inclusief volume in m³/m.

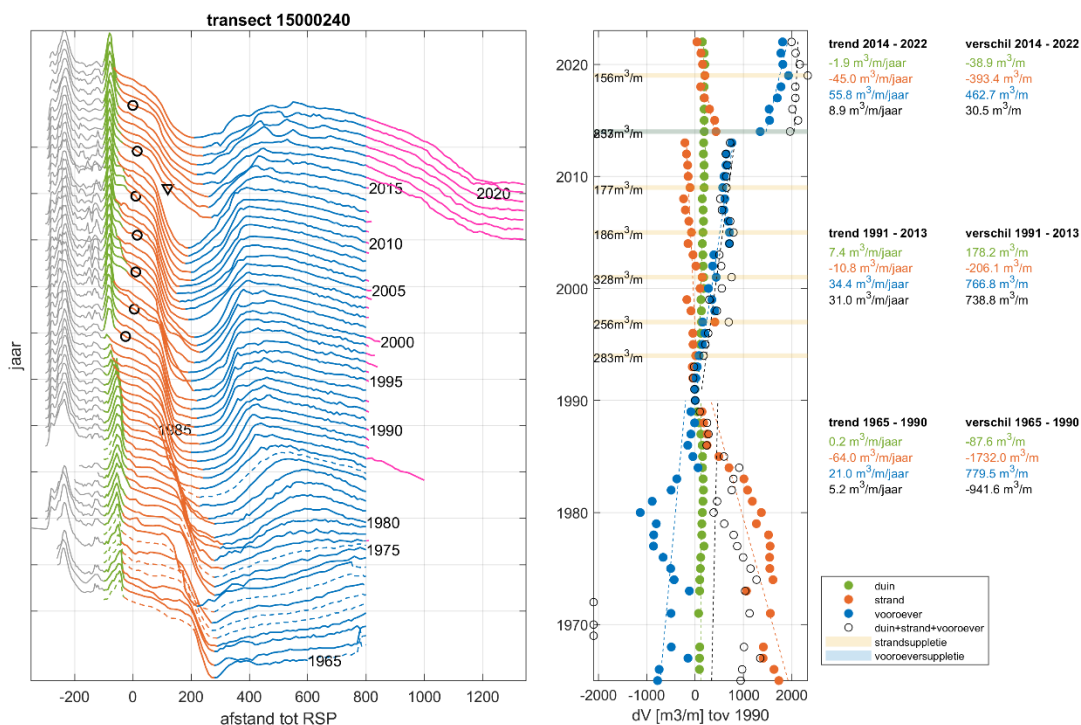


Figuur A-2 Methode voor het bepalen van de volumeontwikkeling bij Jarkusraai 380 bij Noord-Beveland. Links: timestack geeft de dwarsdoorsnedes per jaar gestapeld weer. Het duin is groen, het strand oranje en de vooroever blauw. Rechts: volumeontwikkeling over de tijd voor elke zone, op basis van de gekleurde profielen links. De suppleties zijn weergegeven met de gele (strand) en blauwe (vooroever) vlakken inclusief volume in m³/m.

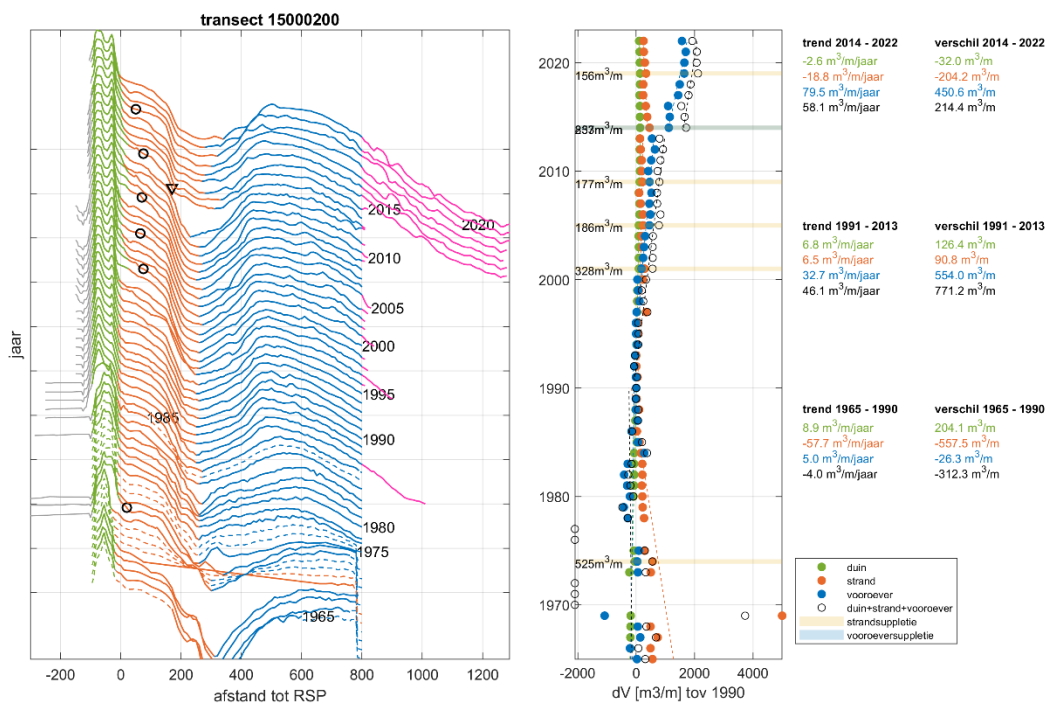


Figuur A-3 Methode voor het bepalen van de volumeontwikkeling bij Jarkusraai 300 bij Noord-Beveland. Links: timestack geeft de dwarsdoorsnedes per jaar gestapeld weer. Het duin is groen, het strand oranje en de vooroever blauw.

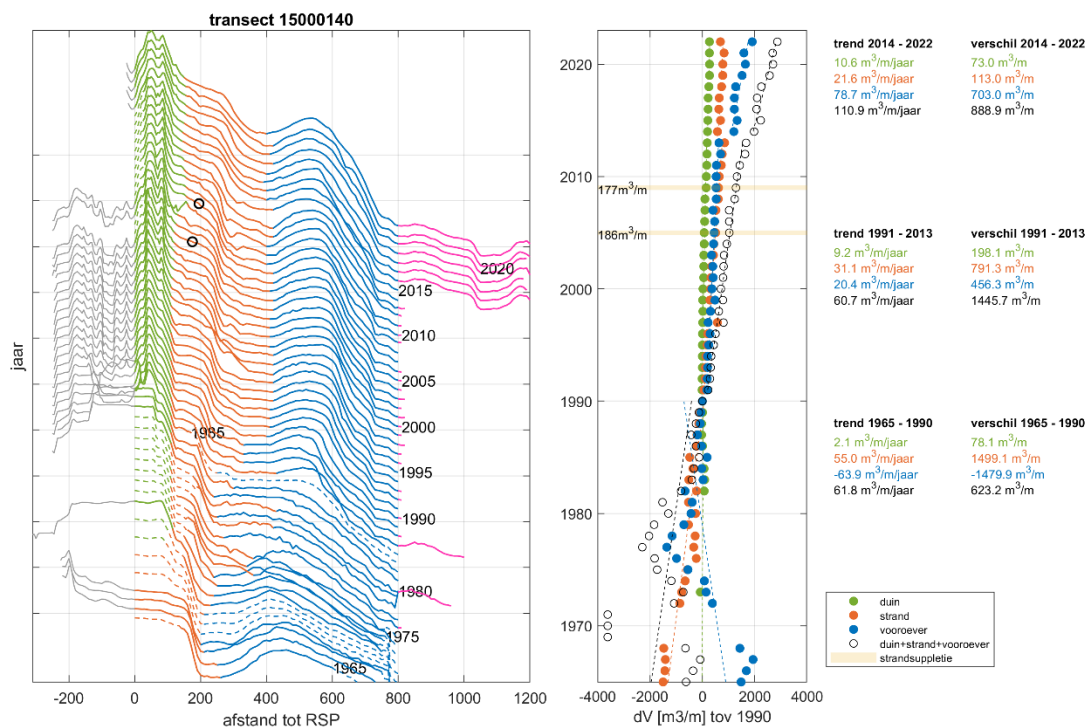
Rechts: volumeontwikkeling over de tijd voor elke zone, op basis van de gekleurde profieellinks. De suppleties zijn weergegeven met de gele (strand) en blauwe (vooroever) vlakken inclusief volume in m³/m.



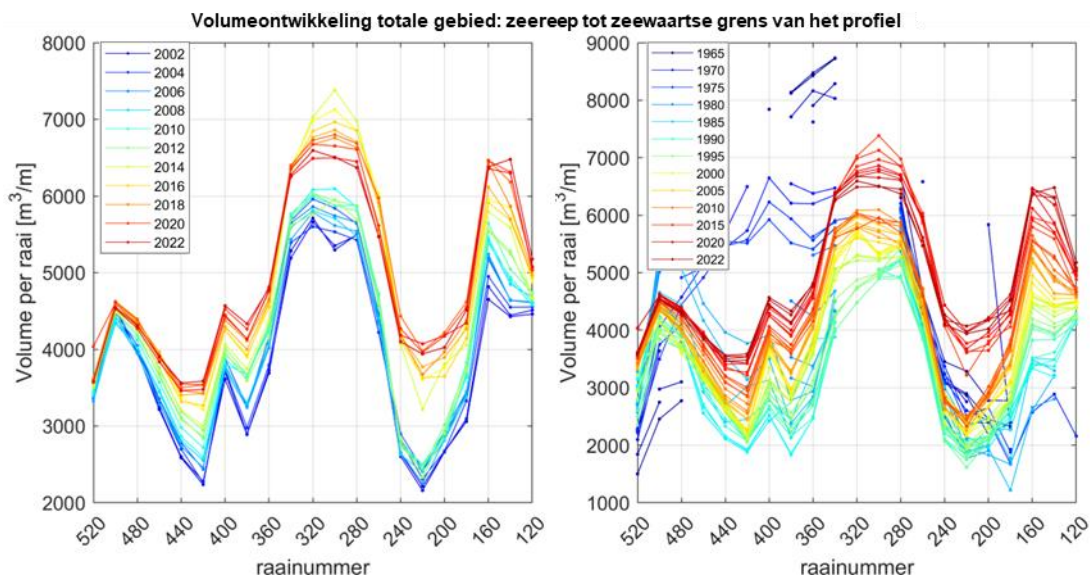
Figuur A-4 Methode voor het bepalen van de volumeontwikkeling bij Jarkusraai 240 bij Noord-Beveland. Links: timestack geeft de dwarsdoorsnedes per jaar gestapeld weer. Het duin is groen, het strand oranje en de vooroever blauw. Rechts: volumeontwikkeling over de tijd voor elke zone, op basis van de gekleurde profielen links. De suppleties zijn weergegeven met de gele (strand) en blauwe (vooroever) vlakken inclusief volume in m³/m.



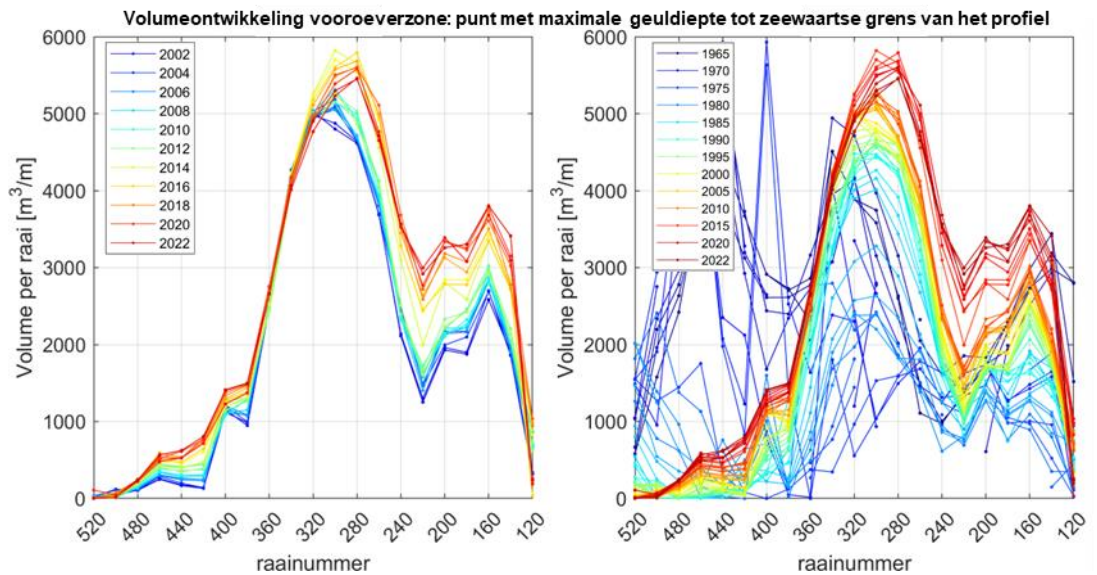
Figuur A-5 Methode voor het bepalen van de volumeontwikkeling bij Jarkusraai 200 bij Noord-Beveland. Links: timestack geeft de dwarsdoorsnedes per jaar gestapeld weer. Het duin is groen, het strand oranje en de vooroever blauw. Rechts: volumeontwikkeling over de tijd voor elke zone, op basis van de gekleurde profielen links. De suppleties zijn weergegeven met de gele (strand) en blauwe (vooroever) vlakken inclusief volume in m^3/m .



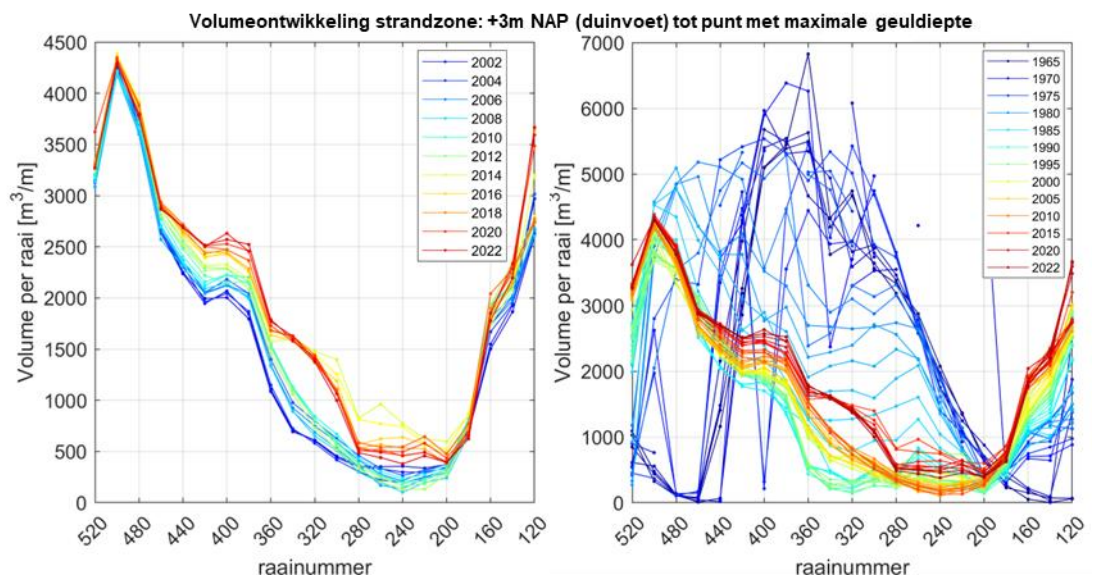
Figuur A-6 Methode voor het bepalen van de volumeontwikkeling bij Jarkusraai 180 bij Noord-Beveland. Links: timestack geeft de dwarsdoorsnedes per jaar gestapeld weer. Het duin is groen, het strand oranje en de vooroever blauw. Rechts: volumeontwikkeling over de tijd voor elke zone, op basis van de gekleurde profielen links. De suppleties zijn weergegeven met de gele (strand) en blauwe (vooroever) vlakken inclusief volume in m^3/m .



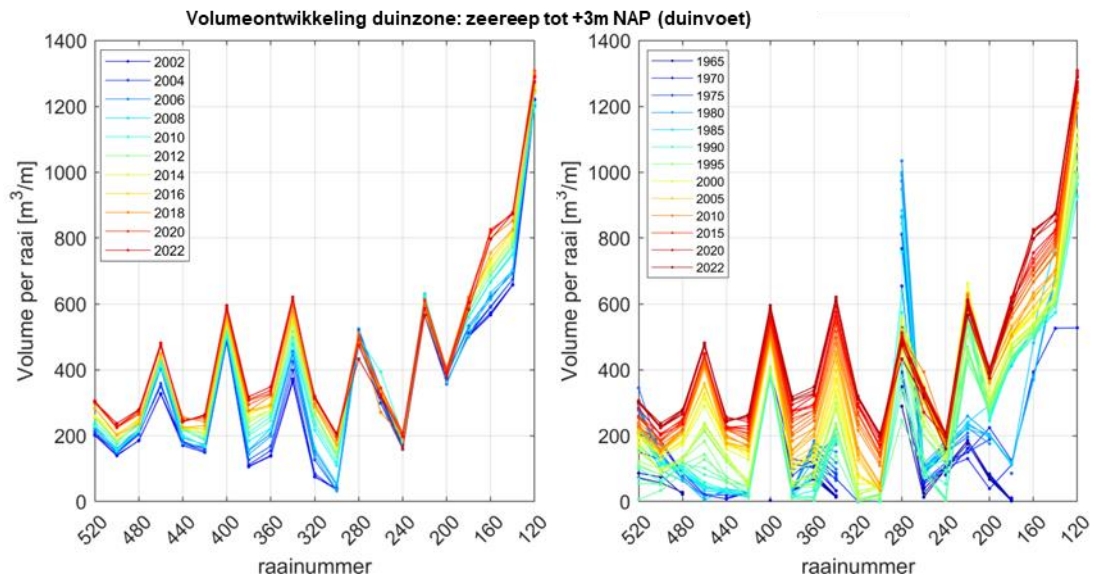
Figuur A-7 volumeveranderingen per raai (in m^3/m) kustlangs, voor het totale kustzone van de duin tot de zeewaartse grens van het Jarkusprofiel. Laatste 20 jaar (links) en van 1965 tot 2022 (rechts).



Figuur A-8 volumeveranderingen per raai (in m³/m) kustlangs, voor vooroeverzone van de punt met maximale geuldiepte tot de zeewaartse grens van het Jarkusprofiel. Laatste 20 jaar (links) en van 1965 tot 2022 (rechts).

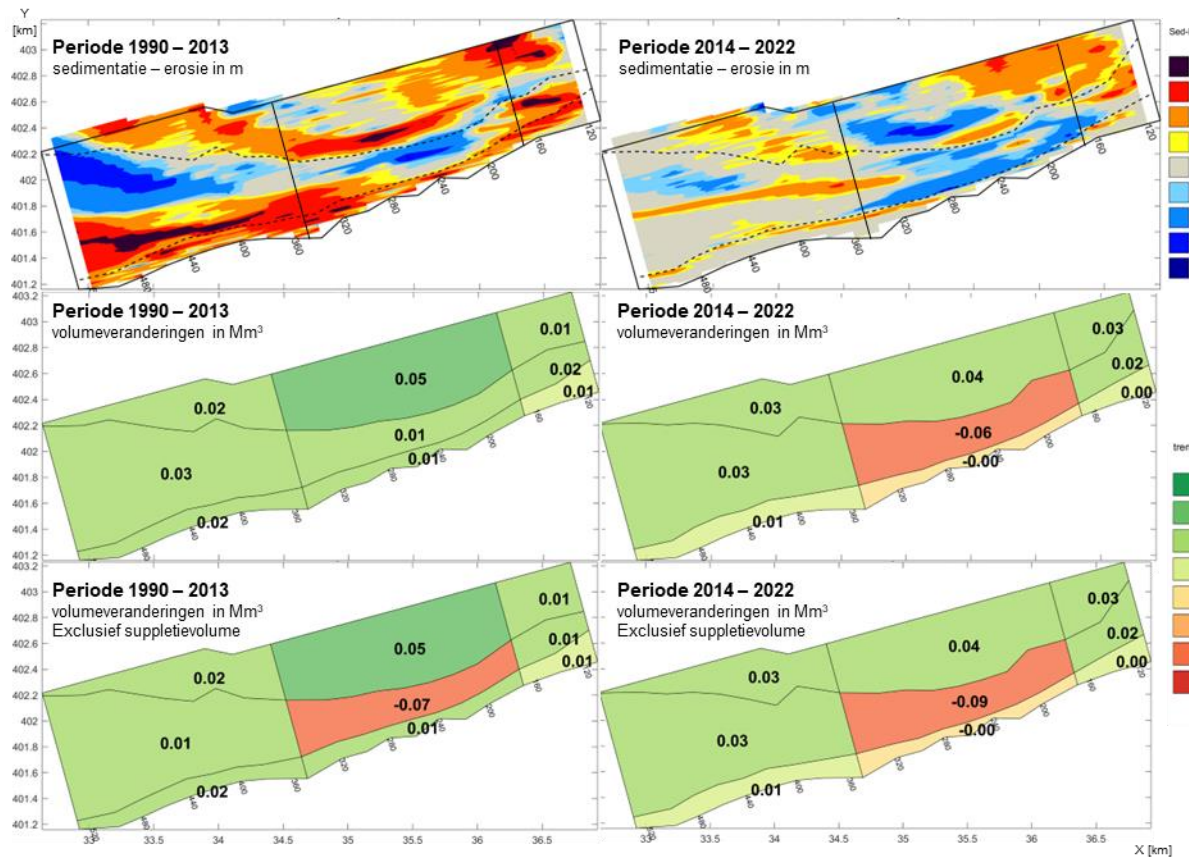


Figuur A-9 volumeveranderingen per raai (in m³/m) kustlangs, voor strandzone van de duinvoet (+3m tov NAP) tot het punt met maximale geuldiepte van het Jarkusprofiel. Laatste 20 jaar (links) en van 1965 tot 2022 (rechts).

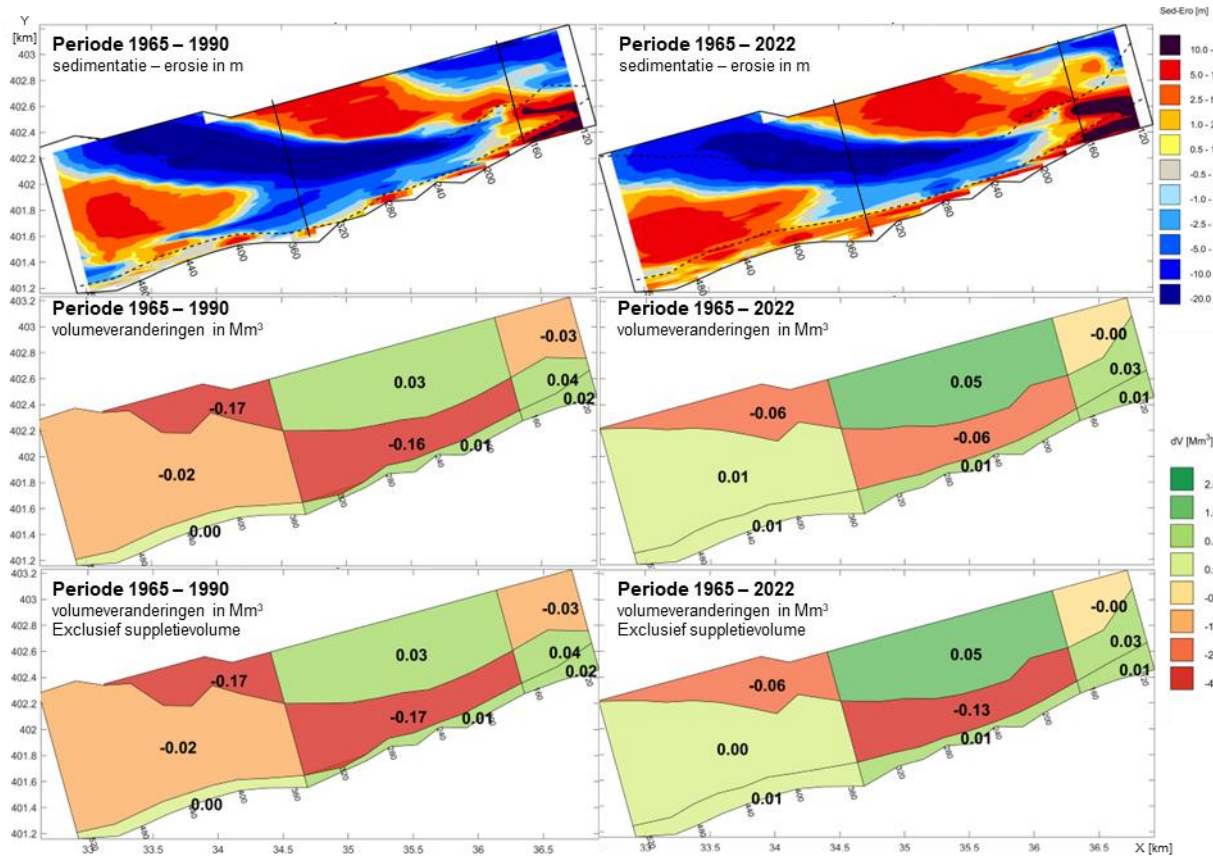


Figuur A-10 volumeveranderingen per raai (in m³/m) kustlangs, voor duinzone alles boven de duinvoet (+3m tov NAP) van het Jarkusprofiel. Laatste 20 jaar (links) en van 1965 tot 2022 (rechts).

A.2 Volumebalans Noord-Beveland: trends in miljoen m³ per jaar



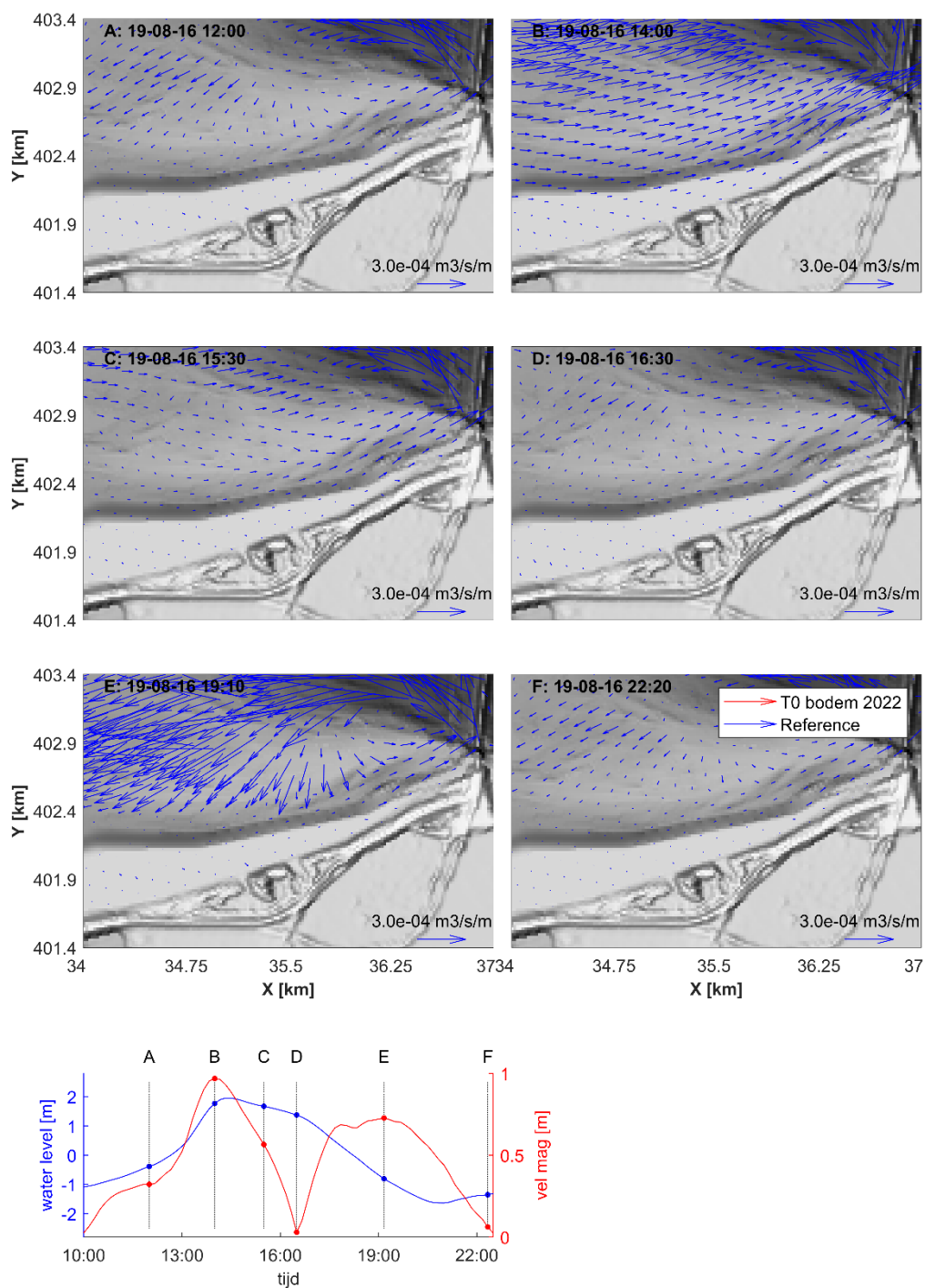
Figuur A-11 Volumeveranderingen bij Noord-Beveland op basis van de Jarkus-data over periode 1990 – 2013 (links) en 2014 – 2022 (rechts). Het totale kustvak is opgedeeld in box Veerse Gatdam (raai 360 – 520), Banjaardstrand (raai 180 – 340) en Oosterscheldekering (120 – 160). Polygonen maken onderscheid tussen duin (> +3m tov NAP), strand (+3m tot punt met maximale geuldiepte) en vooroever (vanaf punt met maximale geuldiepte tot zeewaartse grens van de raai). De getallen geven de trend in volumeveranderingen aan in Mm³/jaar (midden) en de trend in volumeveranderingen gecorrigeerd voor het gesuppleerde volume aangebracht in de periode (onder).



Figuur A-12 Volumeveranderingen bij Noord-Beveland op basis van de Jarkus-data over periode 1965 – 1990 (links) en 1965 – 2022 (rechts). Het totale kustvak is opgedeeld in box Veerse Gatdam (raai 360 – 520), Banjaardstrand (raai 180 – 340) en Oosterscheldekering (120 – 160). Polygonen maken onderscheid tussen duin (> +3m tov NAP), strand (+3m tot punt met maximale gulddiepte) en vooroever (vanaf punt met maximale gulddiepte tot zeewaartse grens van de raai). De getallen geven de trend in volumeveranderingen aan in Mm³/jaar (midden) en de trend in volumeveranderingen gecorrigeerd voor het gesuppleerde volume aangebracht in de periode (onder).

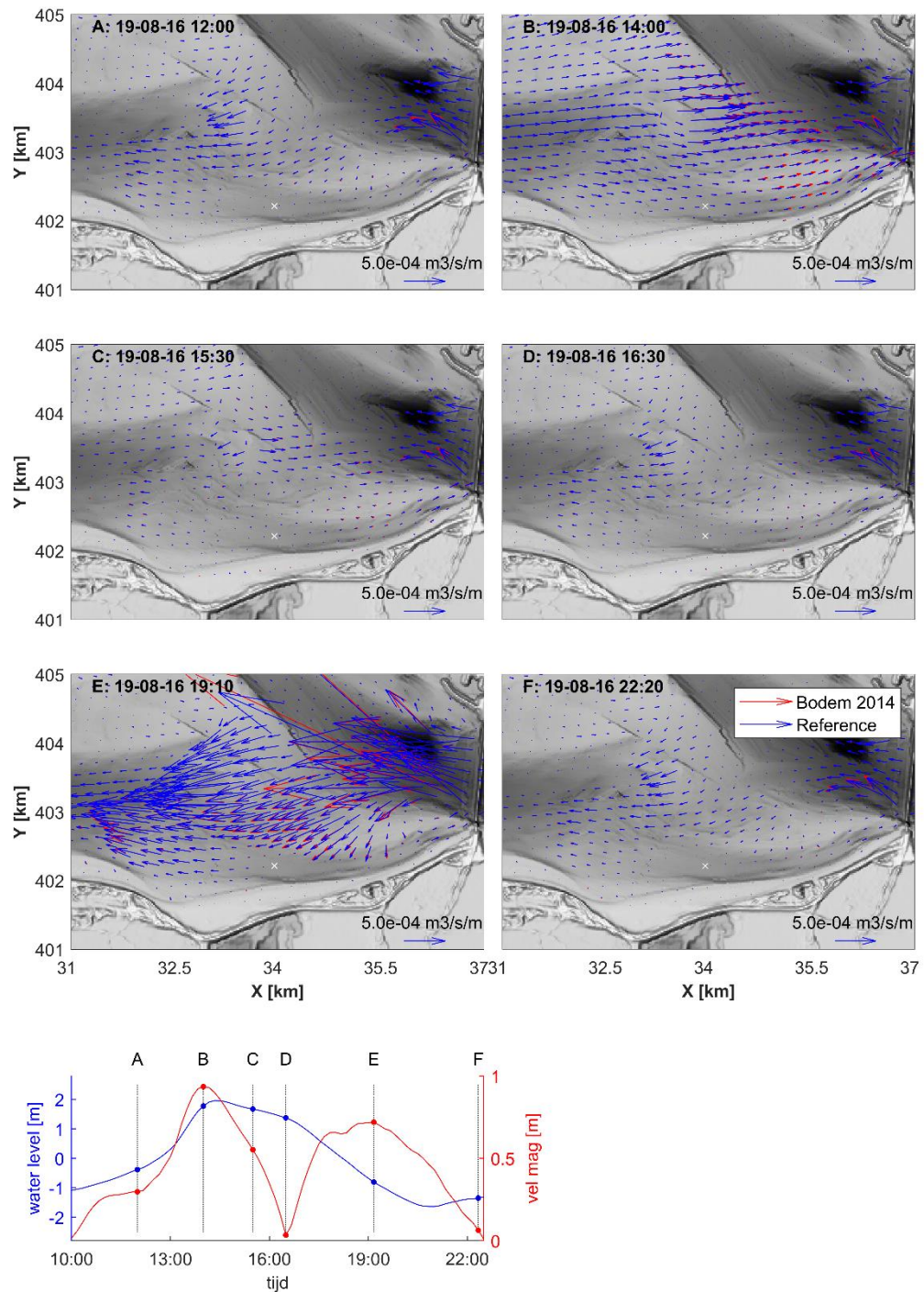
B Gevoeligheidssimulaties

B.1 Referentie simulatie (2022 bodem)

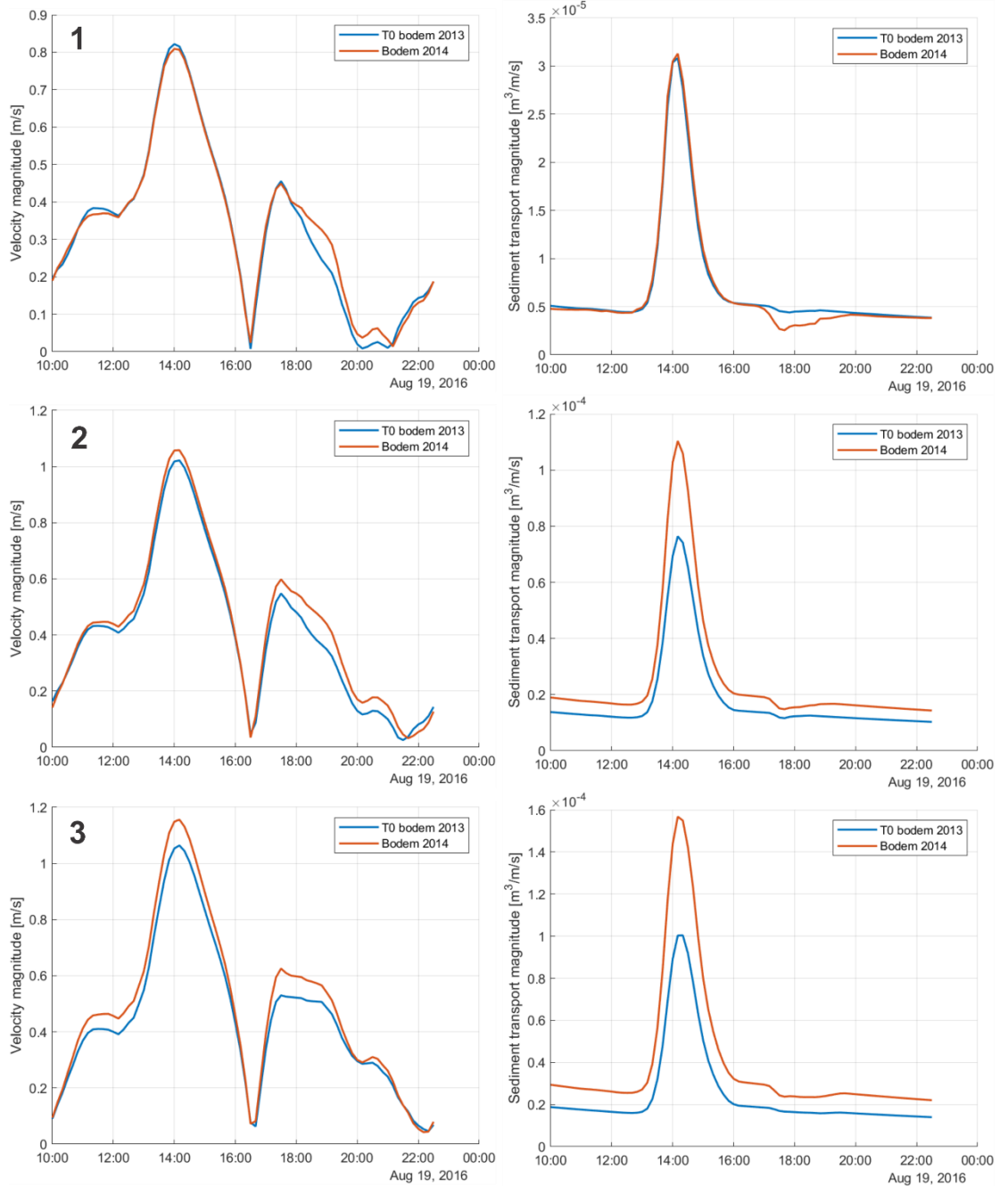
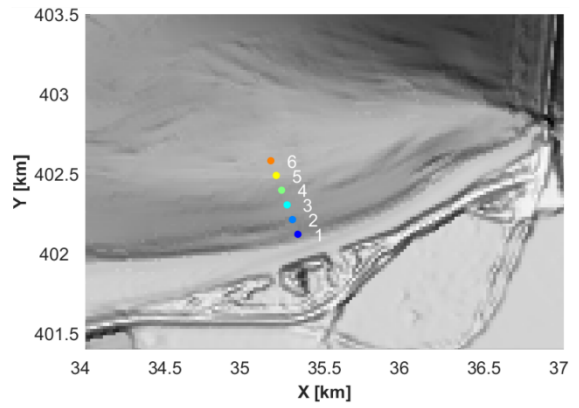


Figuur B- 1 Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Onrust op basis van de gemeten 2022 bodem (T0-simulatie).

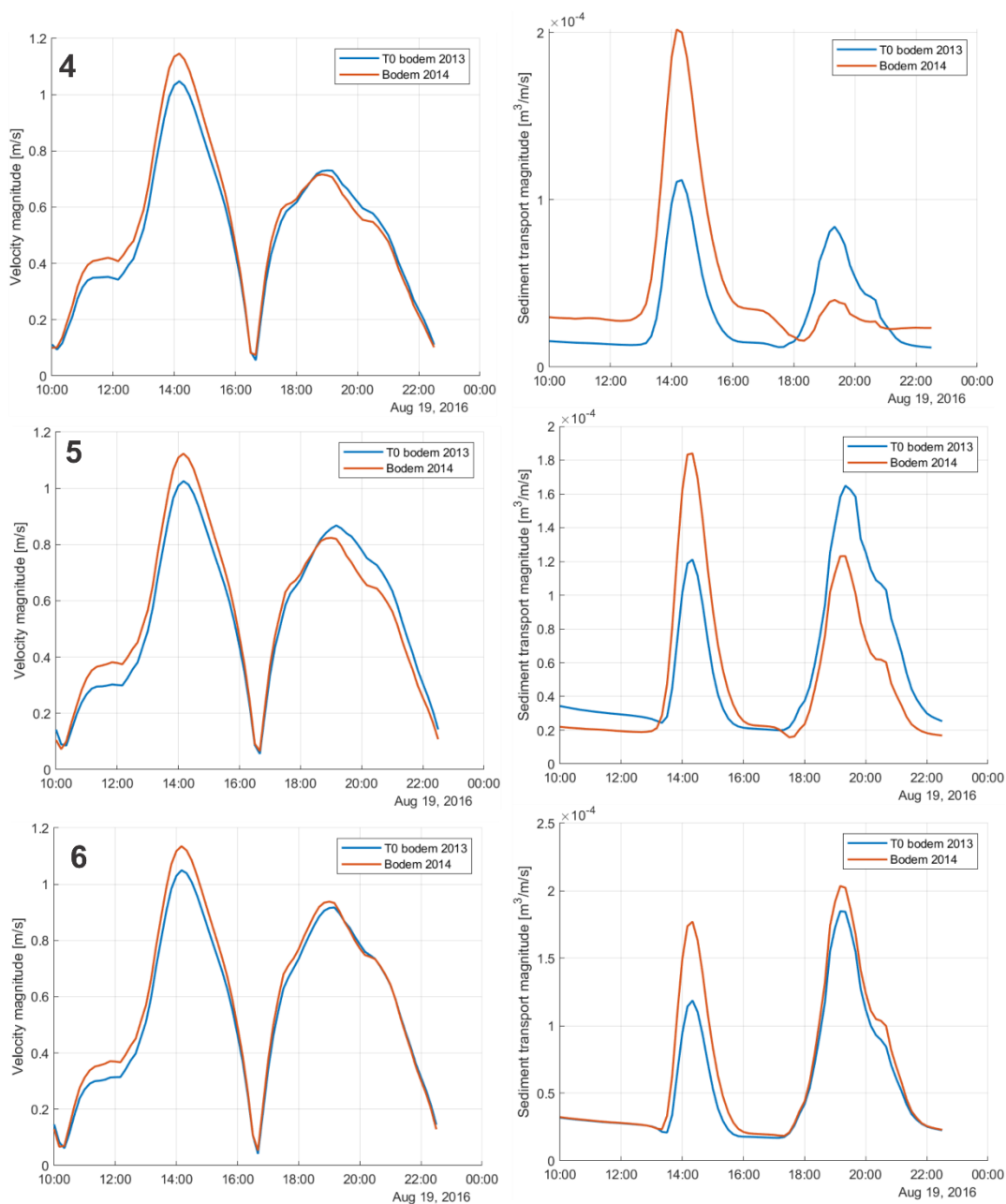
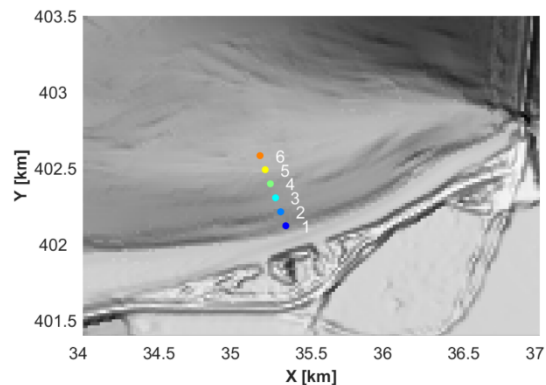
B.2 Evaluatie 2013 suppleties



Figuur B-2 Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Onrust op basis van de gemeten 2014 bodem (rode pijlen) en 2013 bodem (blauwe pijlen).

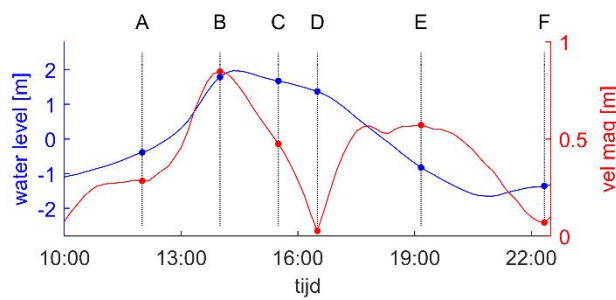
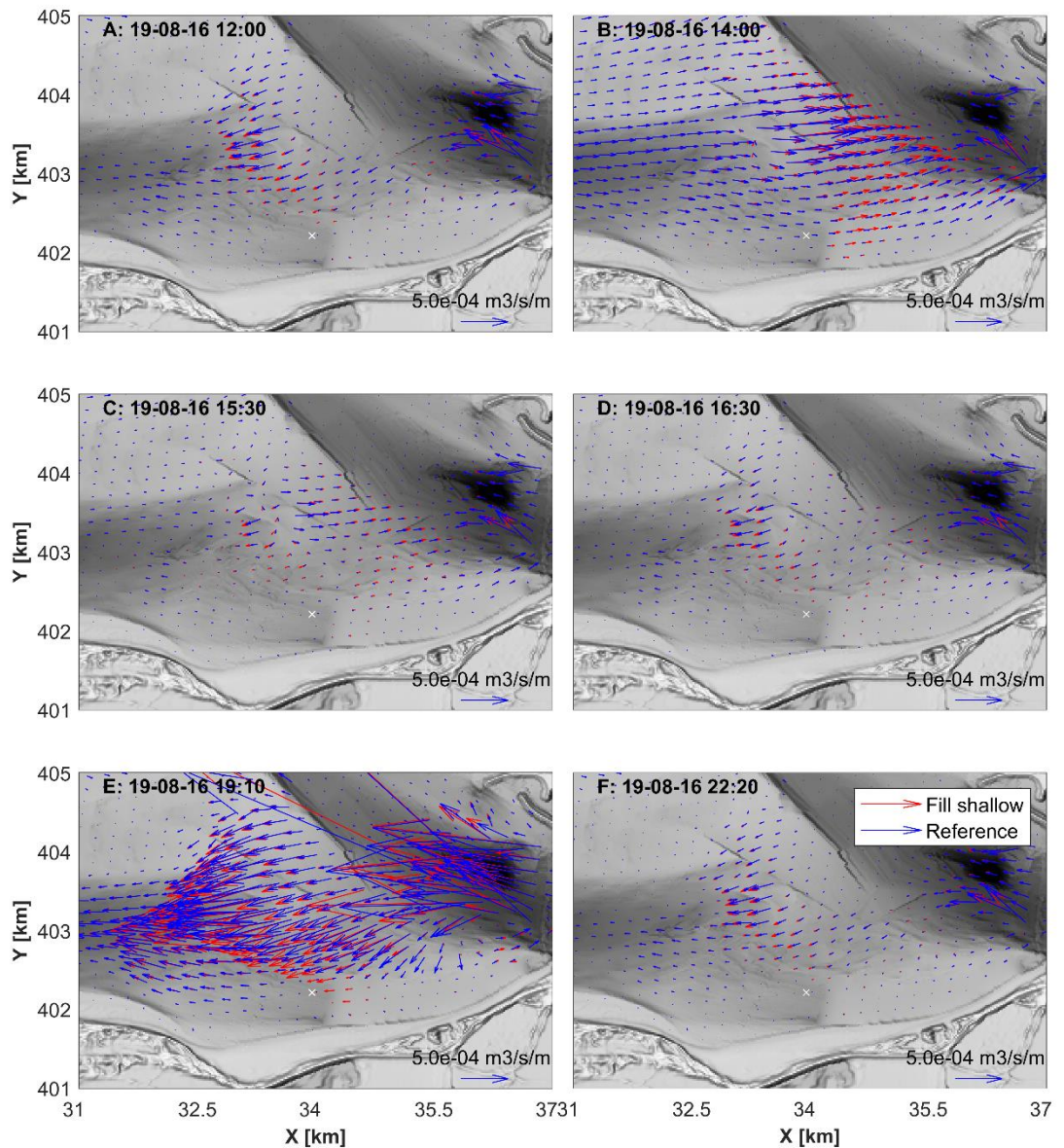


Figuur B- 3: Overzicht van de dieptegemiddelde stromingen (links) en sedimenttransport (rechts) in 3 punten ter hoogte van de suppletielocatie.

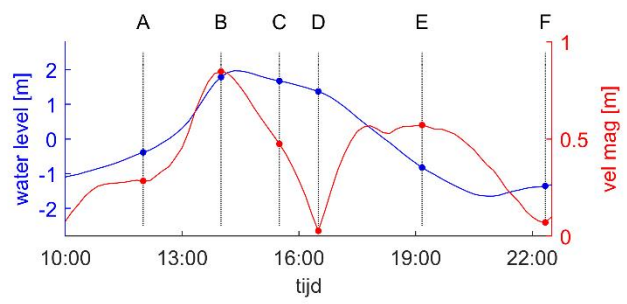
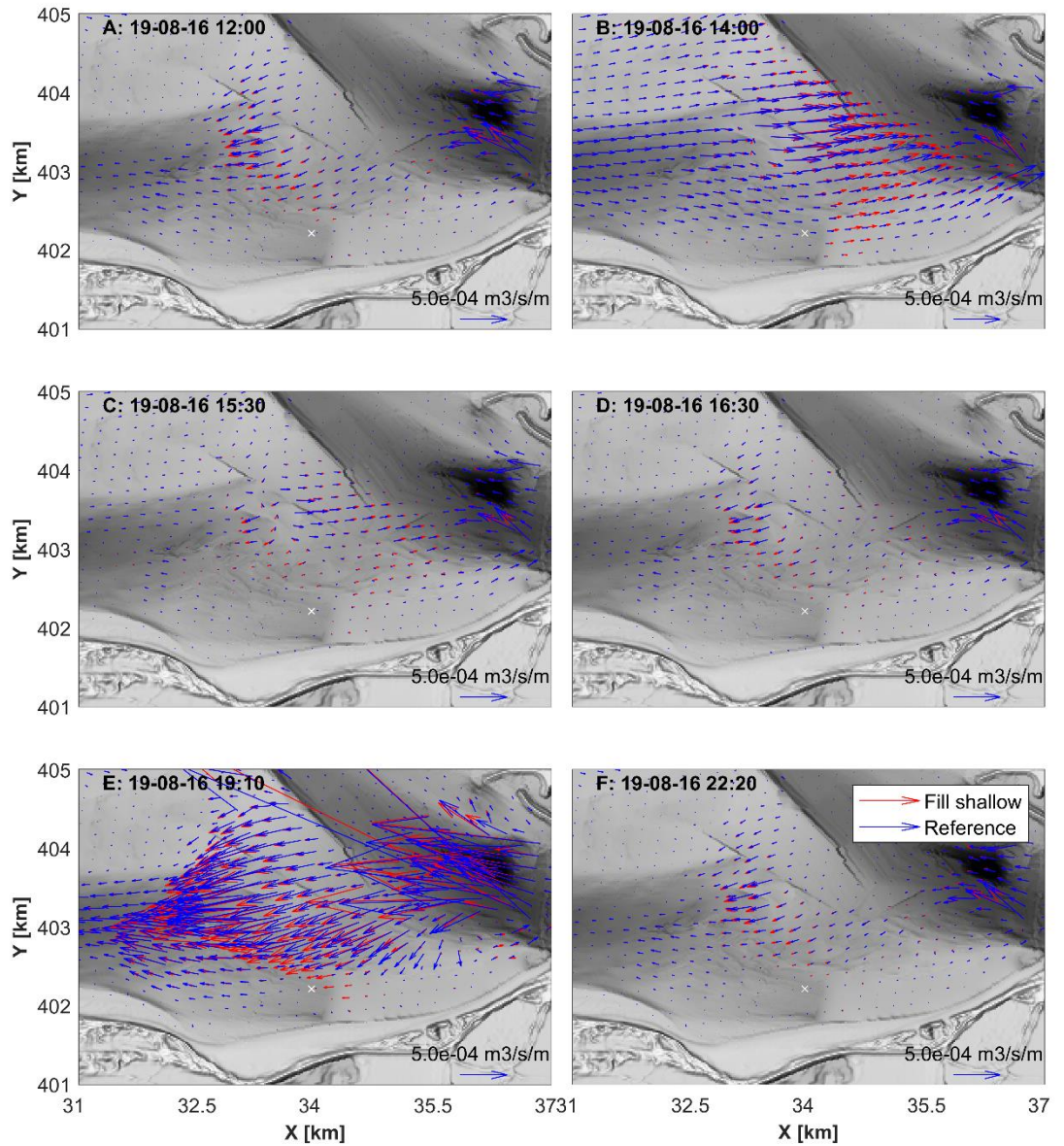


Figur B- 4: Overzicht van de dieptegemiddelde stromingen (links) en sedimenttransport (rechts) in 3 punten ter hoogte van de suppletielocatie.

B.3 Gedeeltelijke opvulling Schaar v Onrust

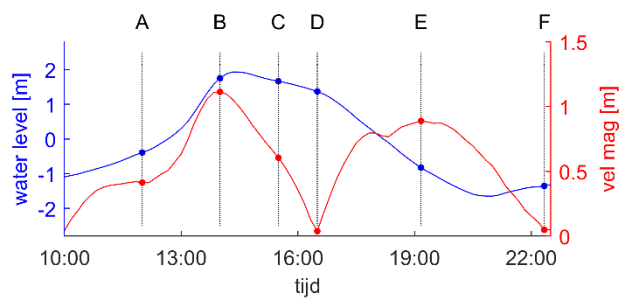
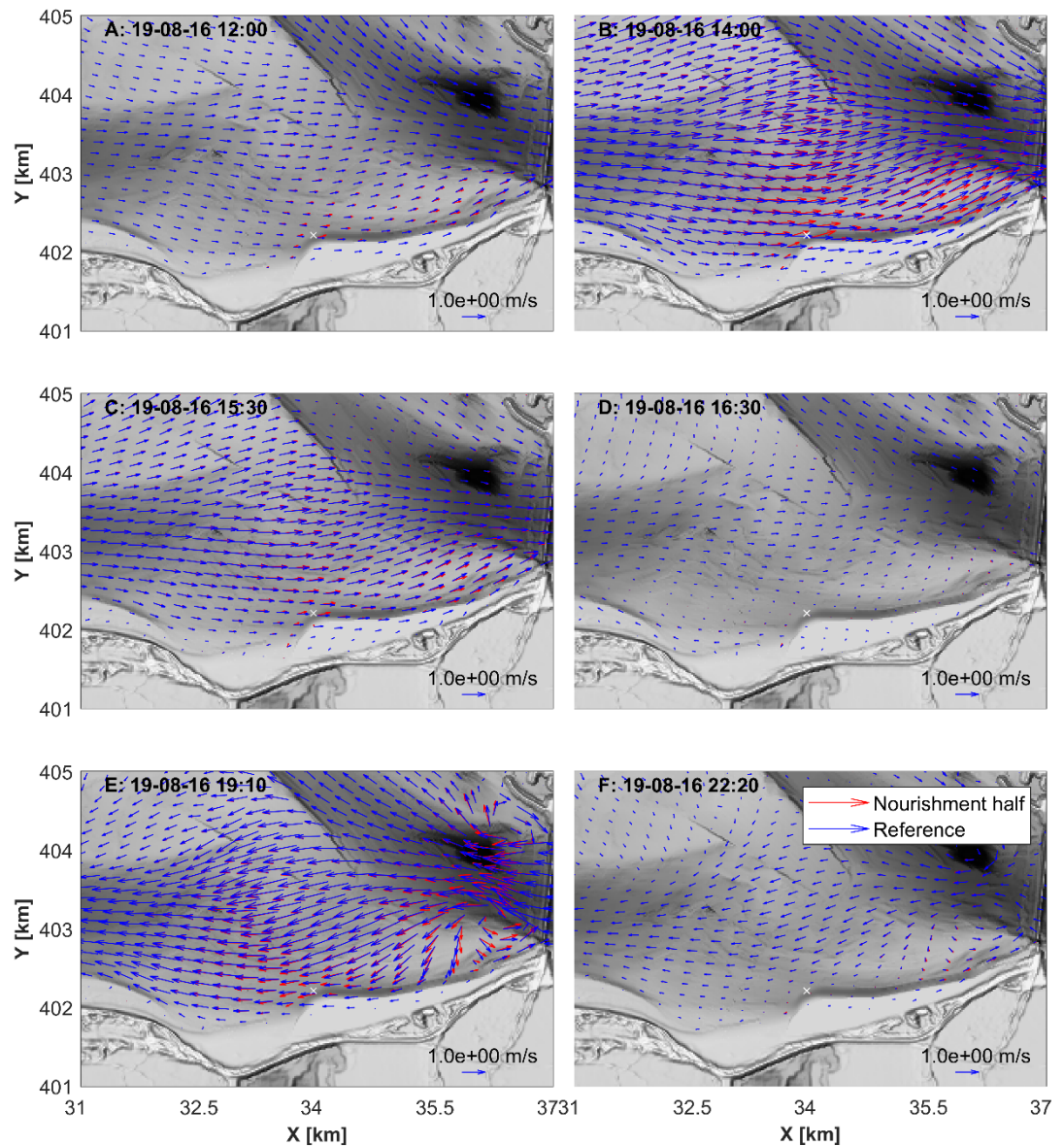


Figuur B- 5: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust voor de suppletievariant 'Gedeeltelijke opvulling' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

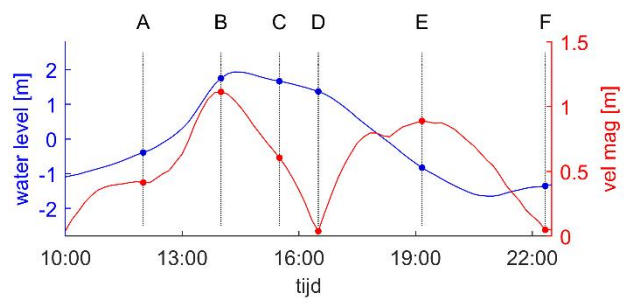
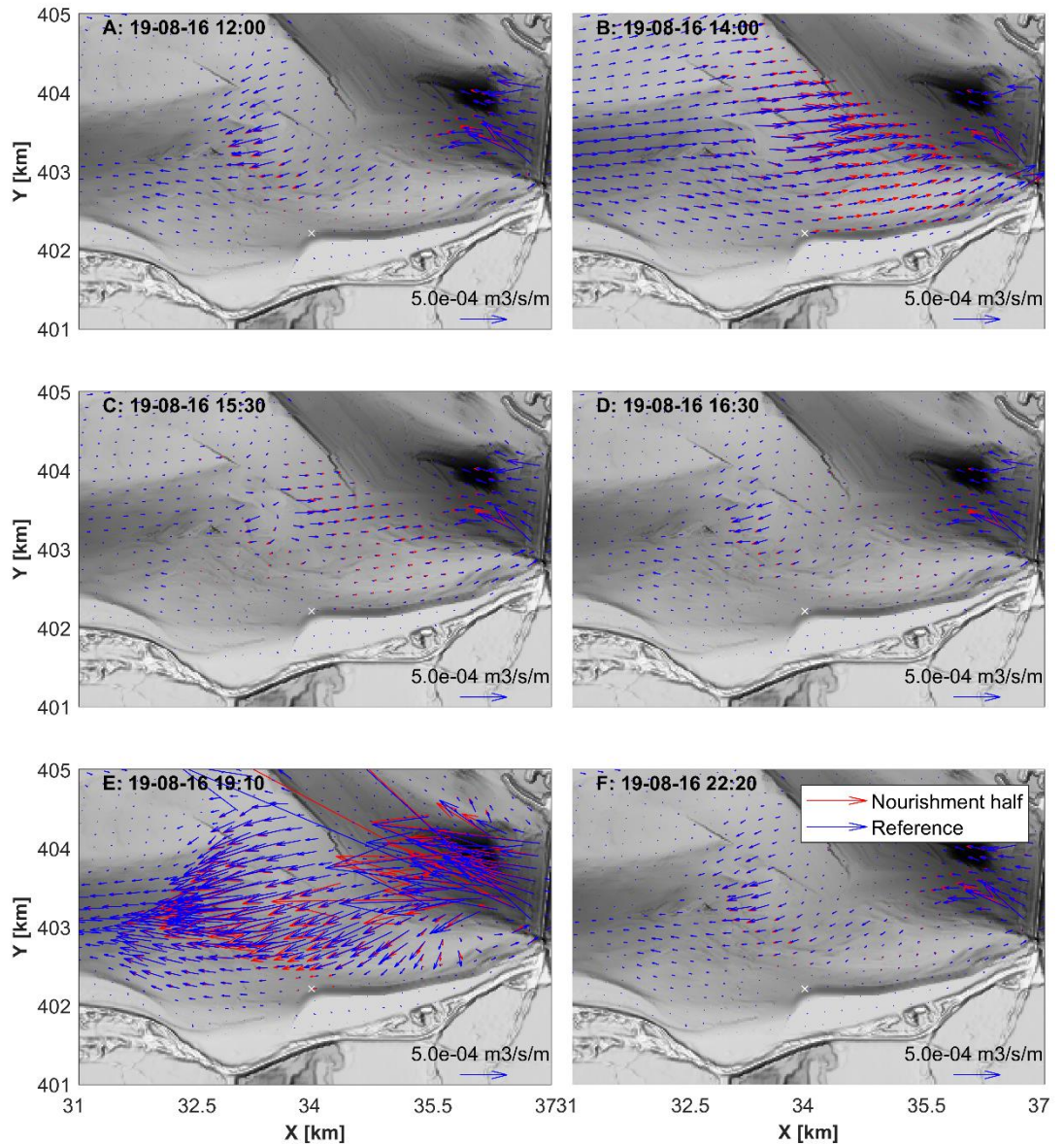


Figuur B- 6: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Onrust voor de suppletievariant 'Gedeeltelijke opvulling' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

B.4 Gedeeltelijke afsluiting (ofwel kustdwarse uitbouw)

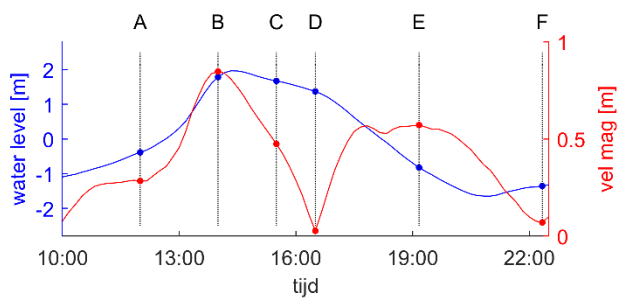
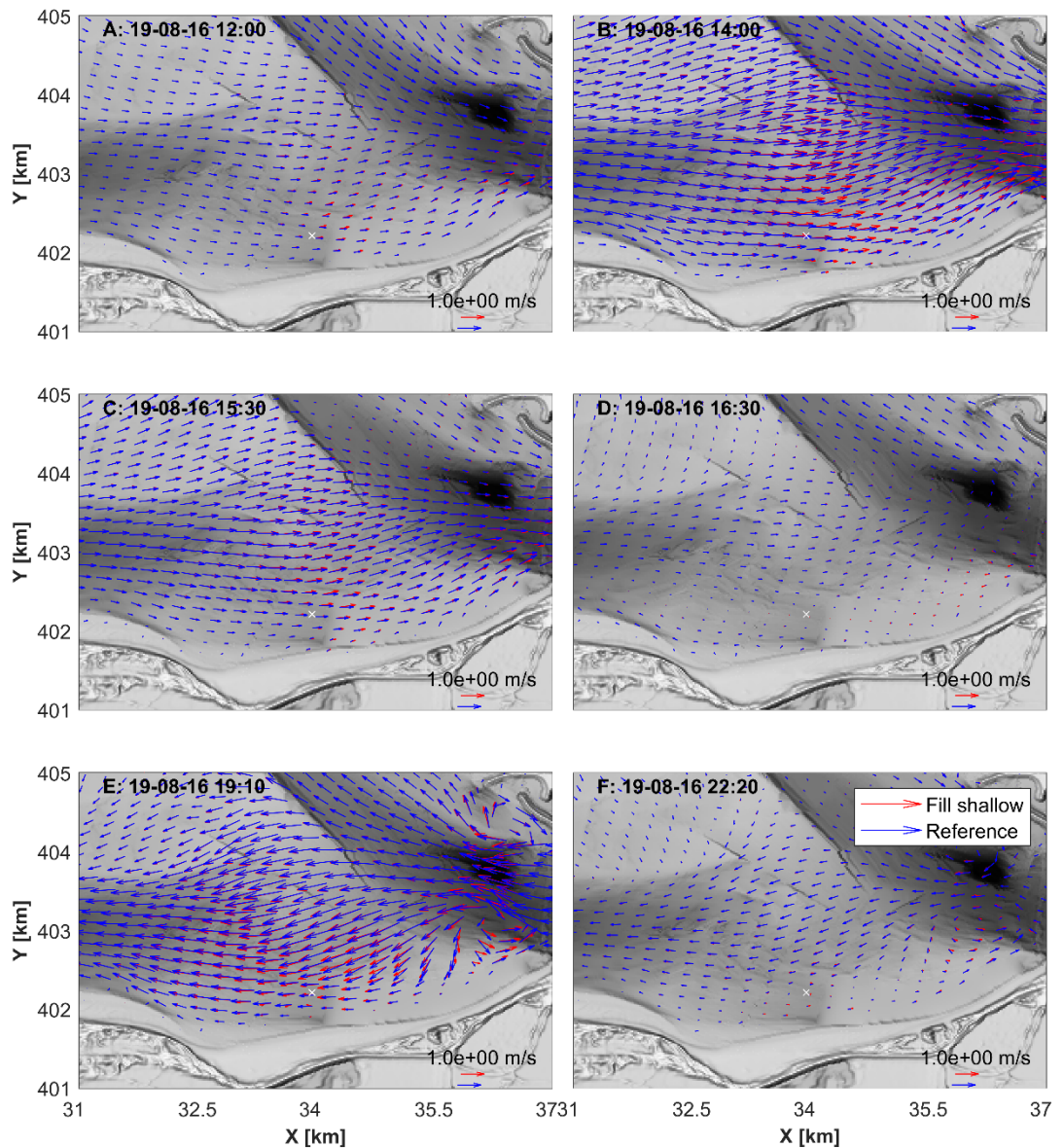


Figuur B- 7: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust voor de suppletievariant 'Gedeeltelijke opvulling' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

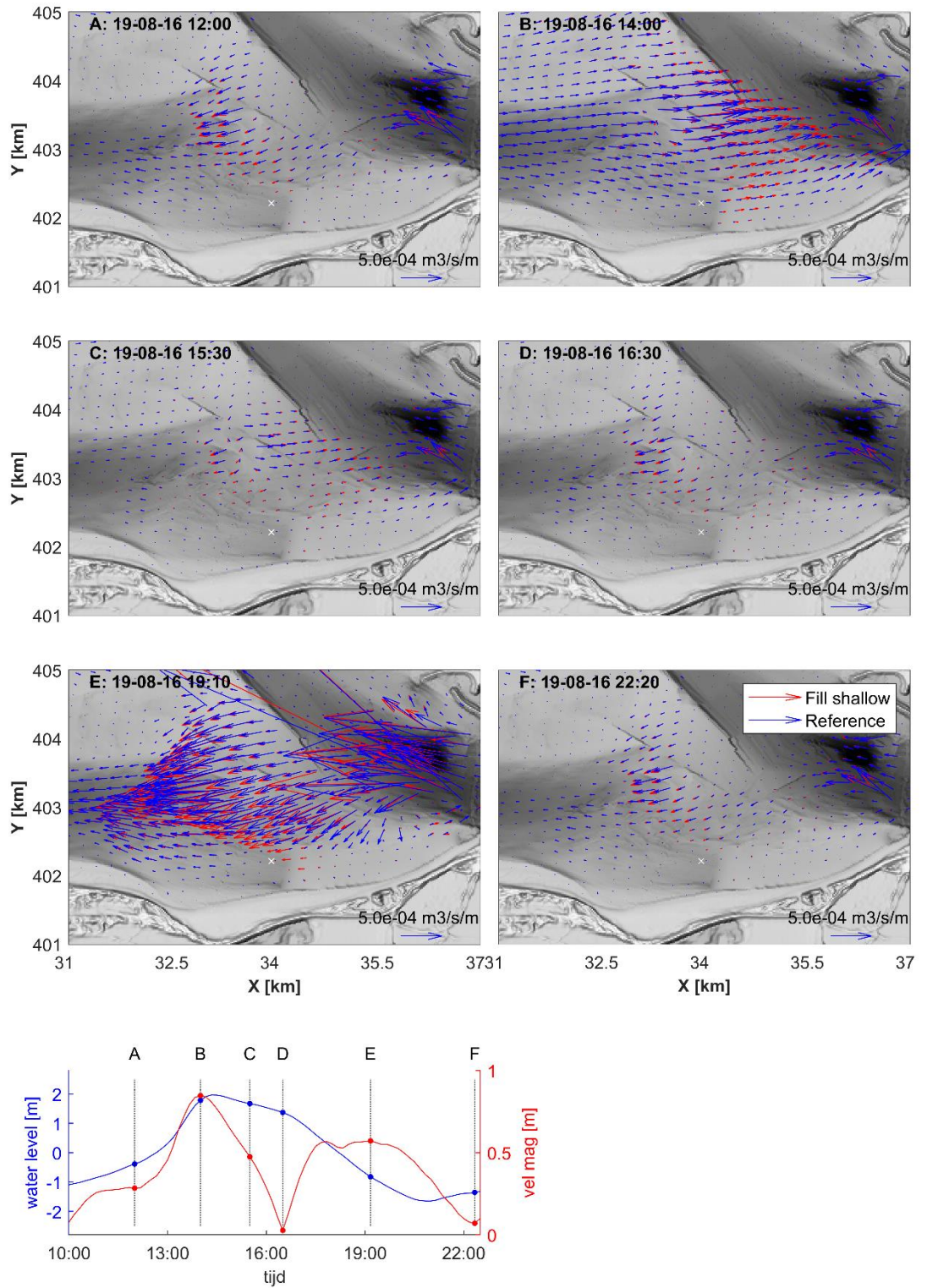


Figuur B- 8: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Onrust voor de suppletievariant 'Gedeeltelijke opvulling' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

B.5 Volledige opvulling Schaar v Onrust

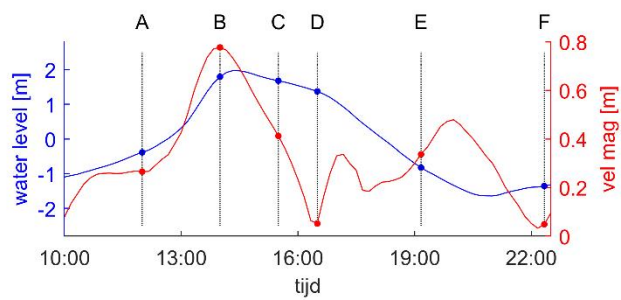
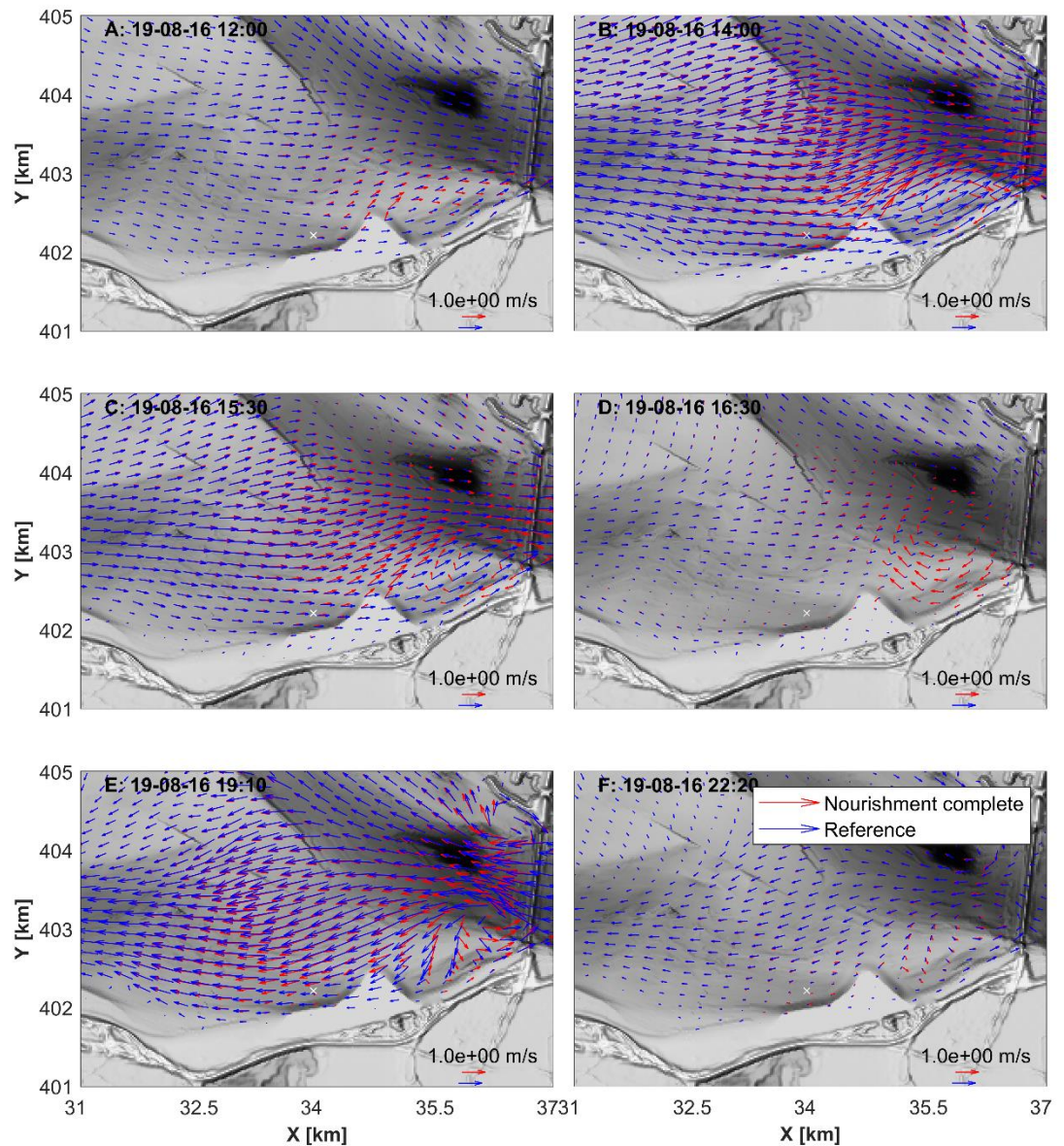


Figuur B- 9: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust voor de suppletievariant 'Gedeeltelijke opvulling' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

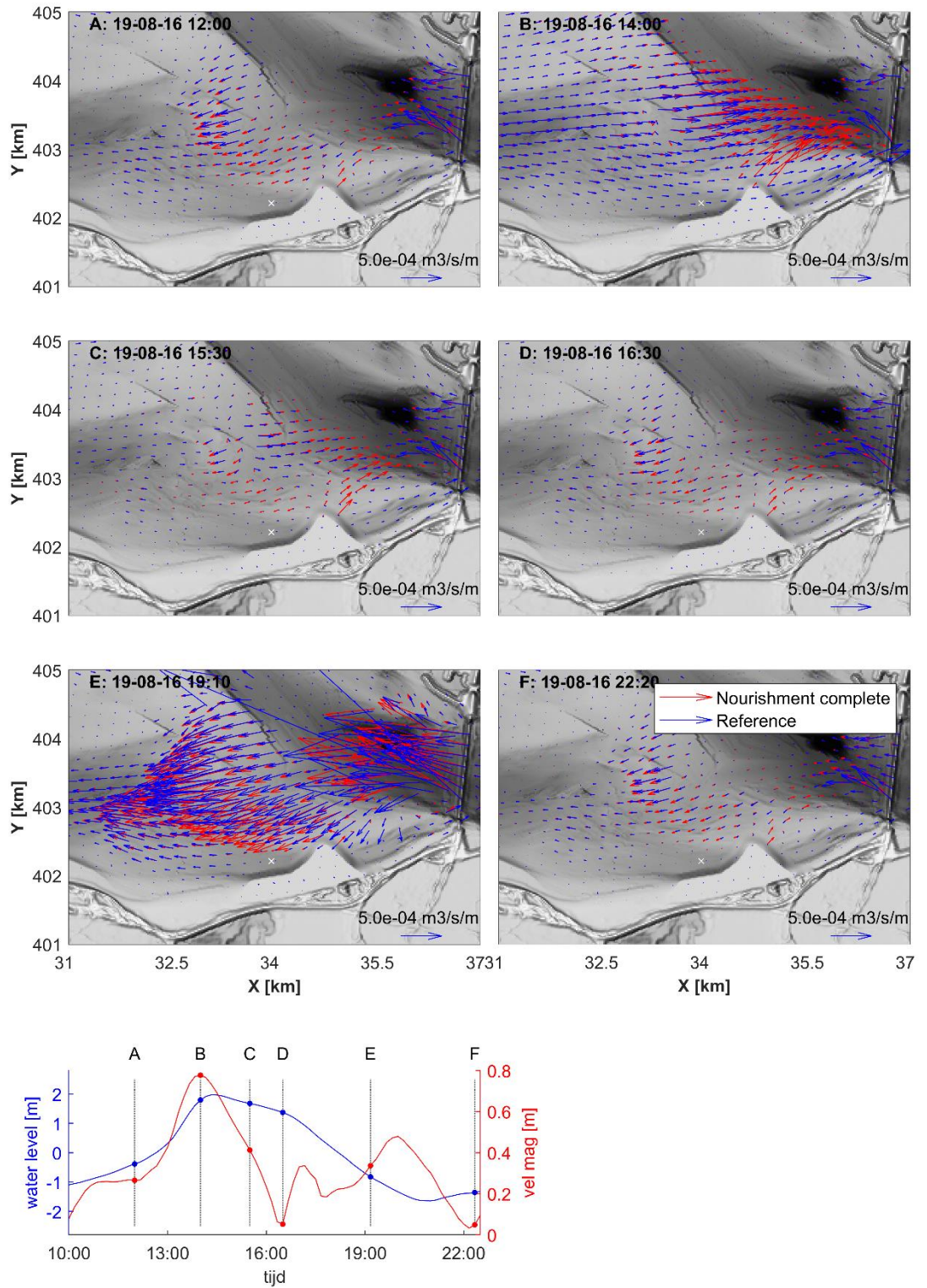


Figuur B- 10: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Orrust voor de suppletievariant 'Gedeeltelijke opvulling' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

B.6 Volledige afsluiting



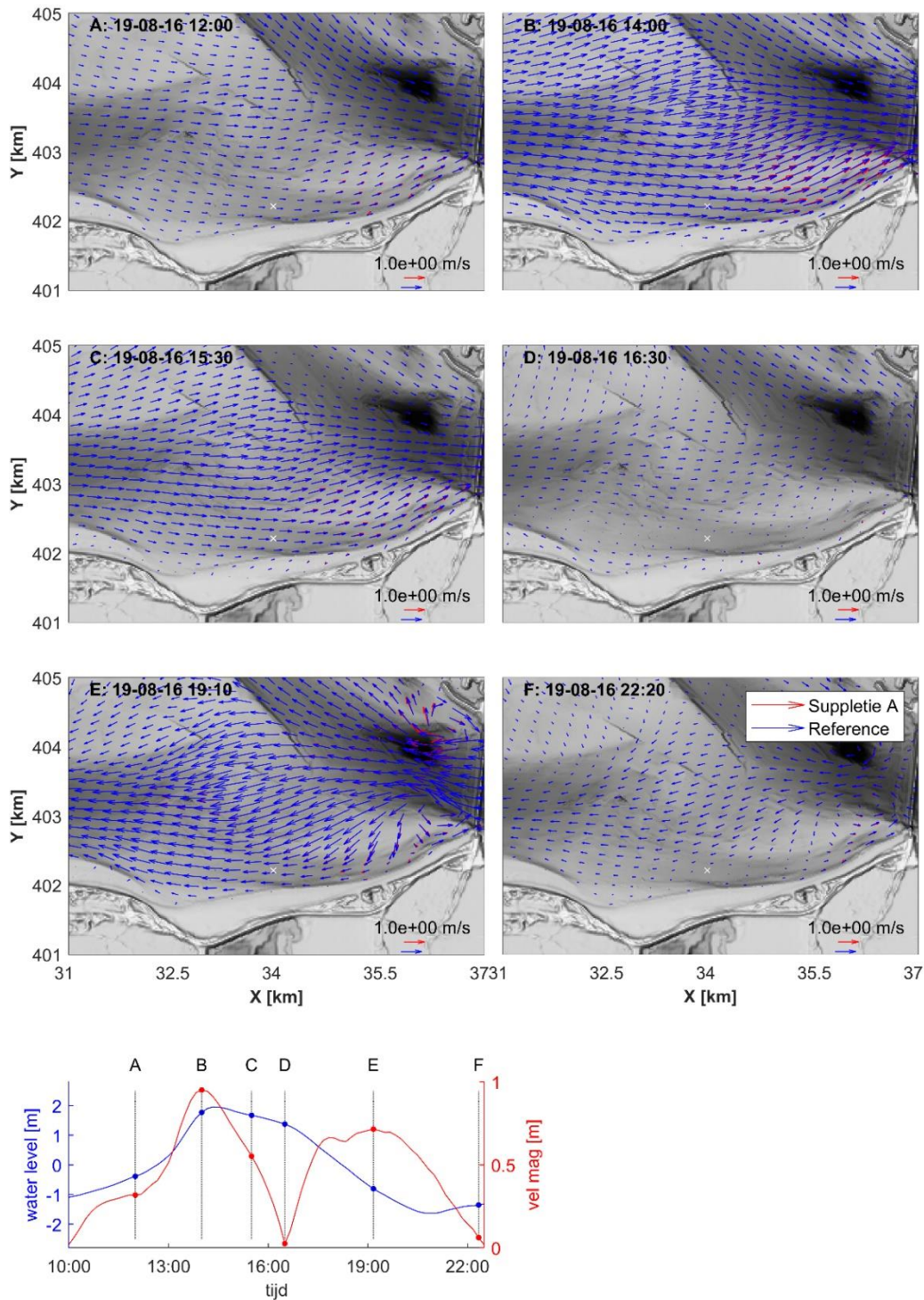
Figuur B- 11: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust voor de suppletievariant 'Gedeeltelijke opvulling' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).



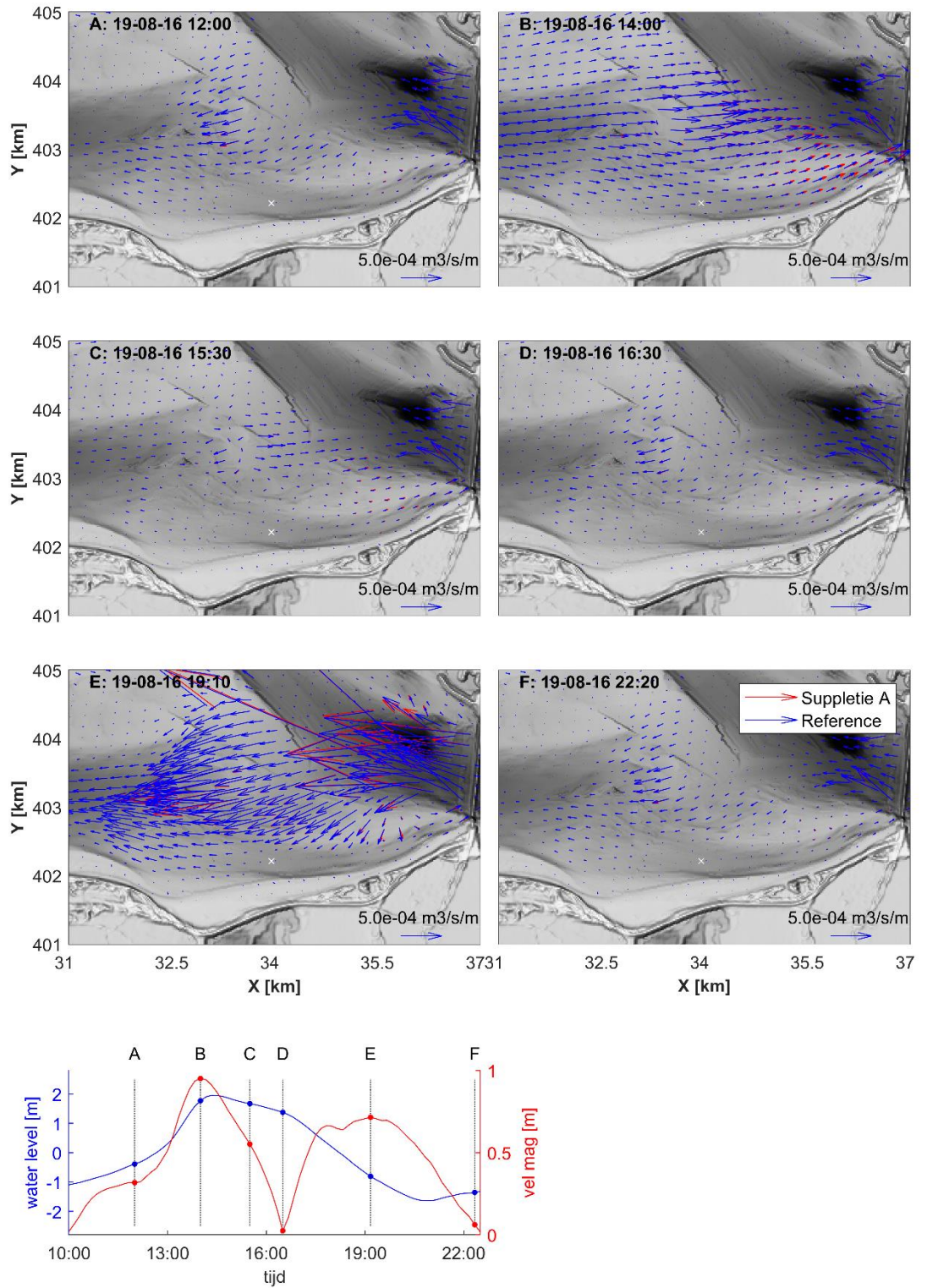
Figuur B- 12: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Orrust voor de suppletievariant 'Gedeeltelijke opvulling' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

C Snelheden en transporten voor de RWS suppletievarianten

C.1 Geulwandsuppletie

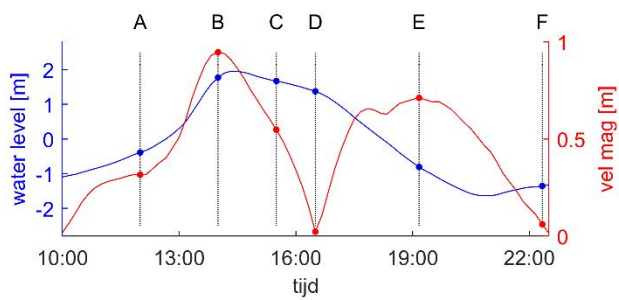
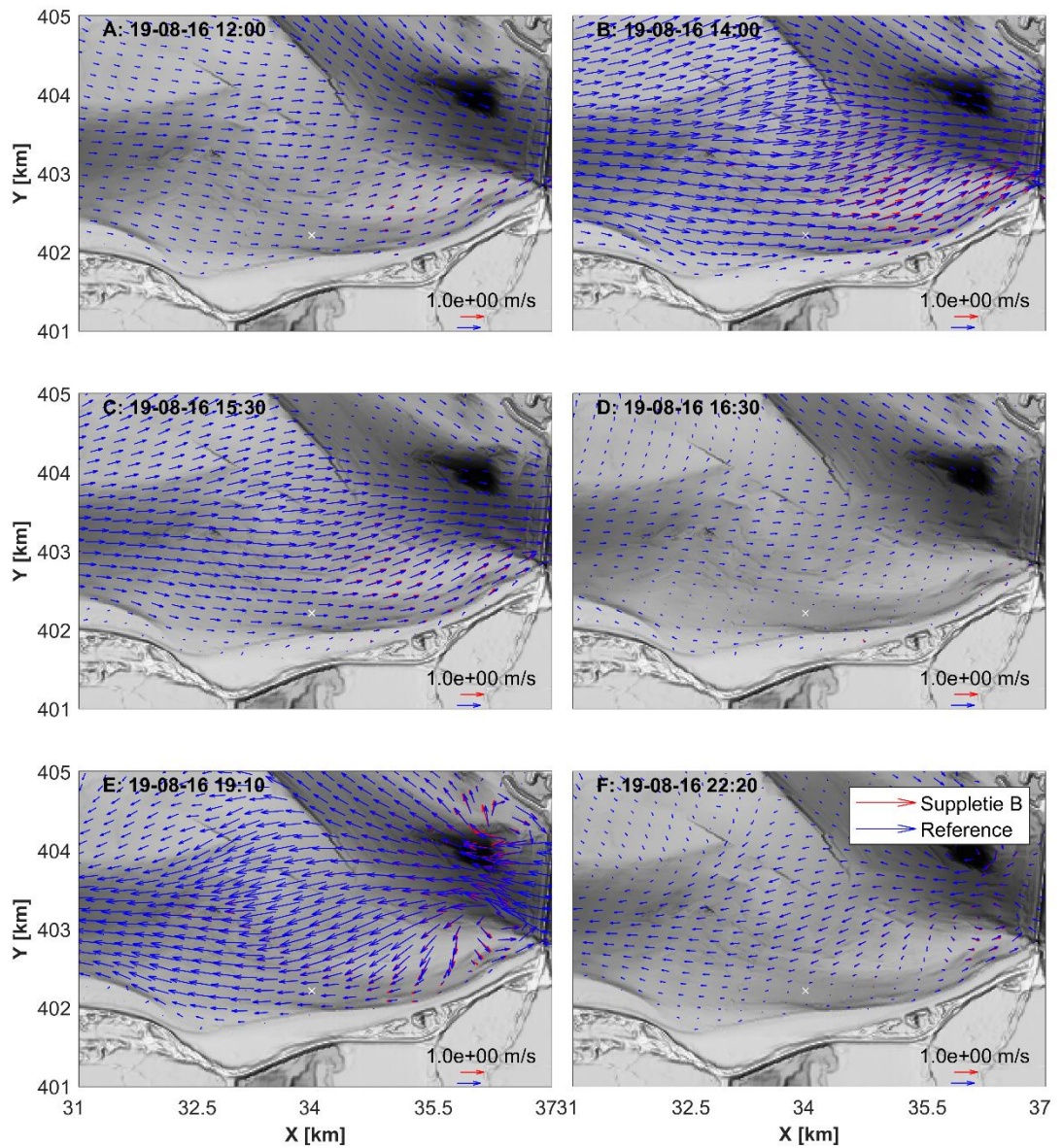


Figuur C-1: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust van de geulwandsuppletie (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

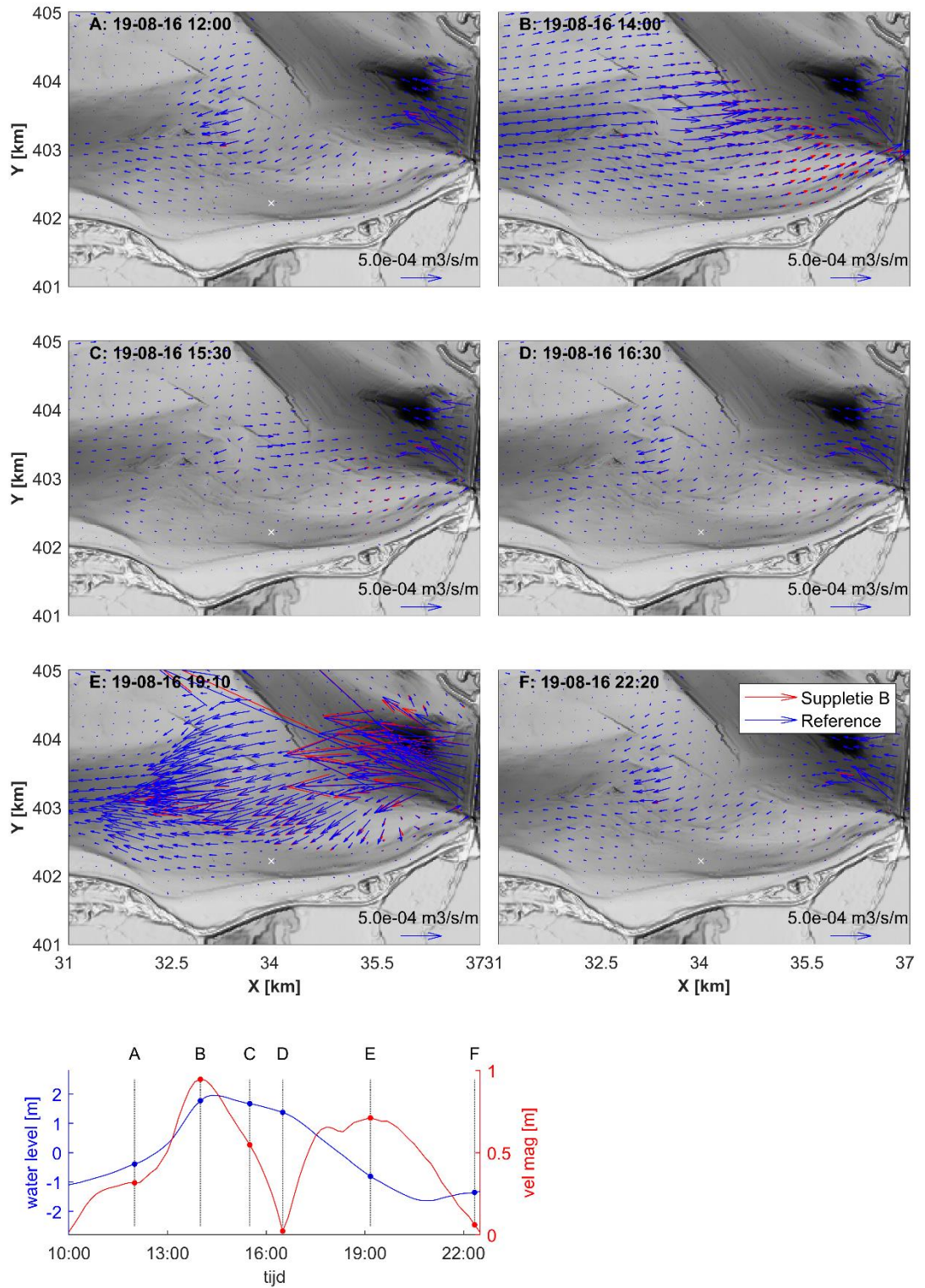


Figuur C-2: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Onrust van de geulwandsuppletie (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

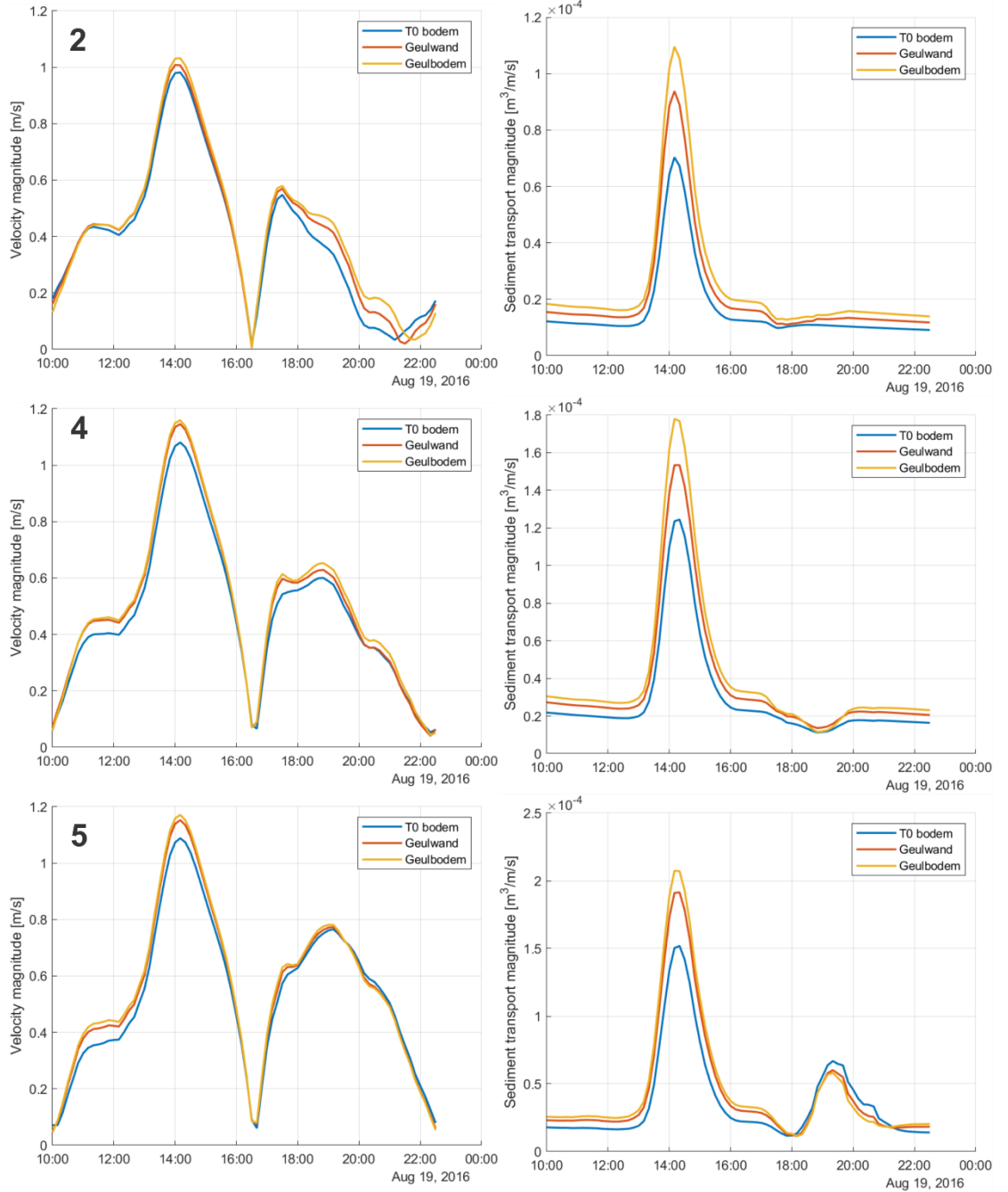
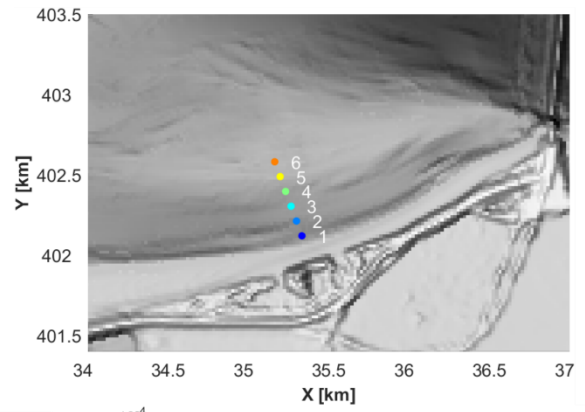
C.2 Geulbodem



Figuur C-3: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust voor de geulopvulling (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).



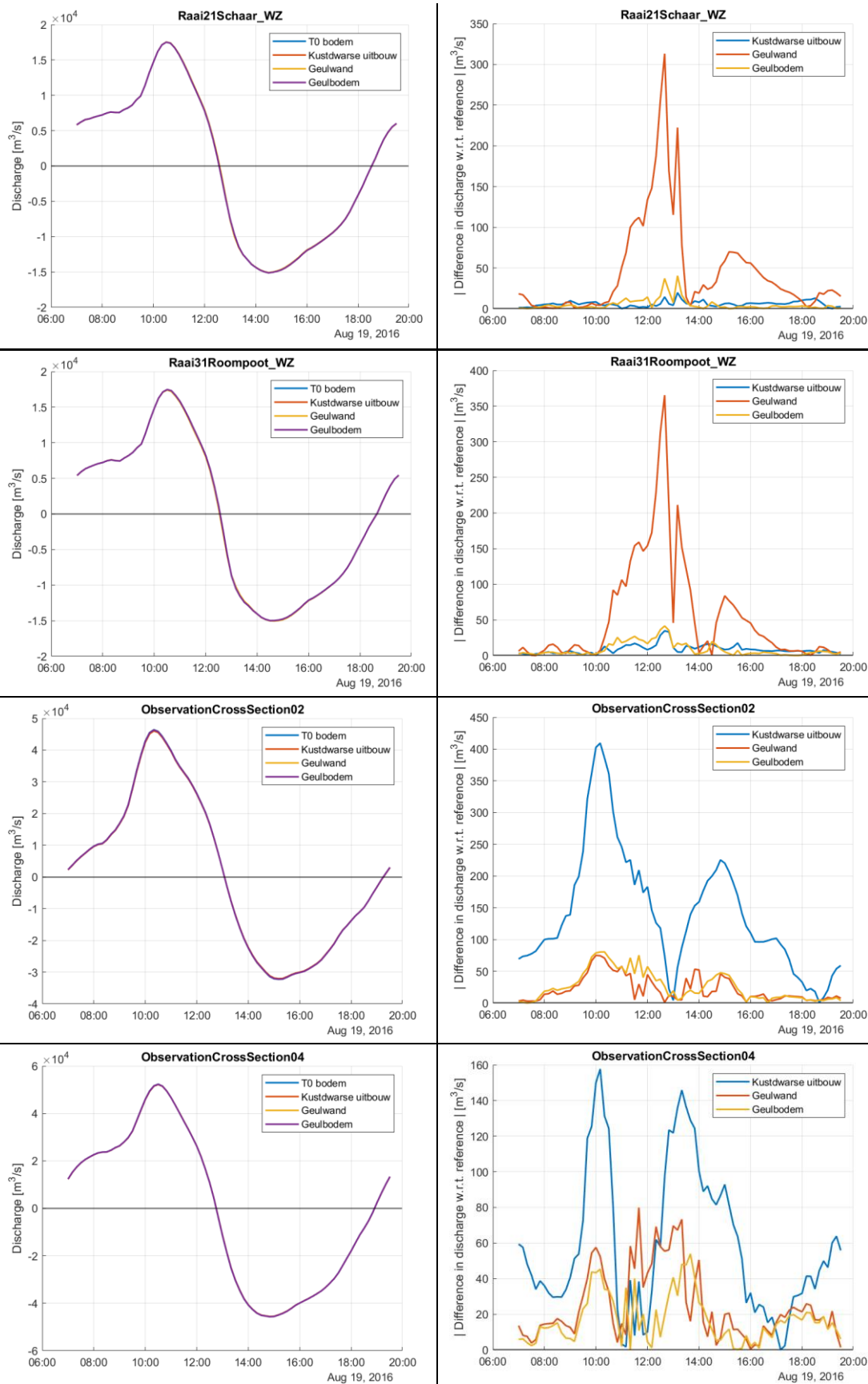
Figuur C-4: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Orrust voor de geulopvulling (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).



Figuur C-5: Overzicht van de dieptegemiddelde stromingen (links) en sedimenttransport (rechts) in 3 punten ter hoogte van de suppletielocatie.

D Debieten door dwarsdoorsnedes

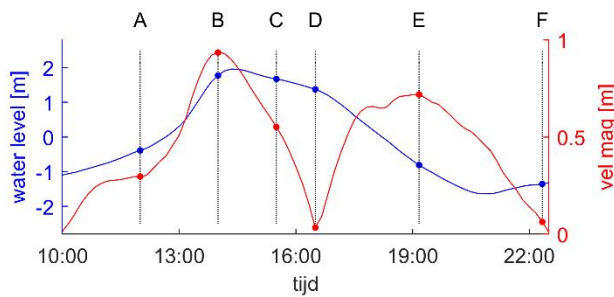
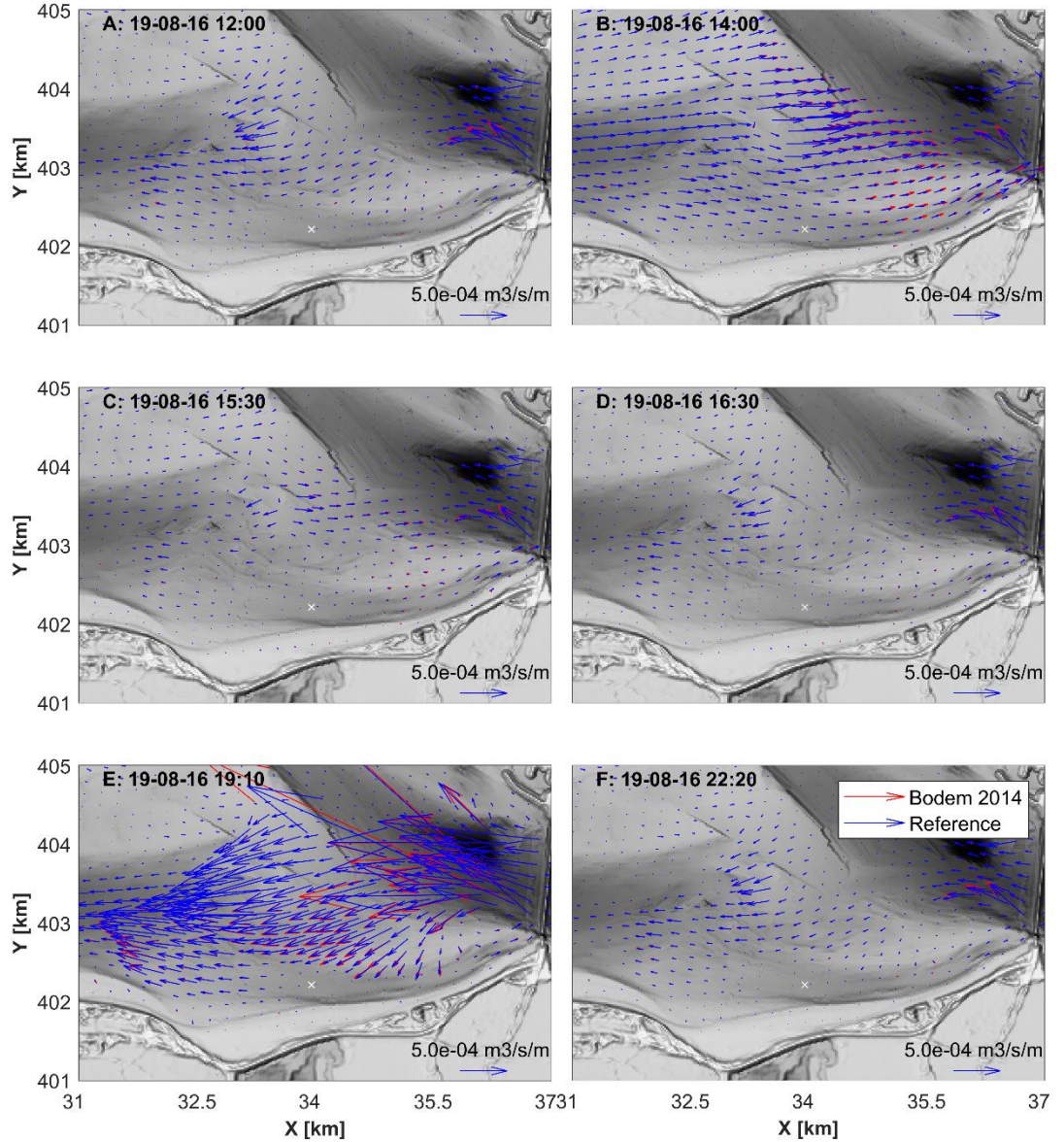
Hieronder zijn de debieten te vinden voor de verschillende dwarsdoorsnedes die in het verslag worden benoemd.



Figur D-6: Debieten door dwarsdoorsnedes voor de verschillende suppletievarianten.

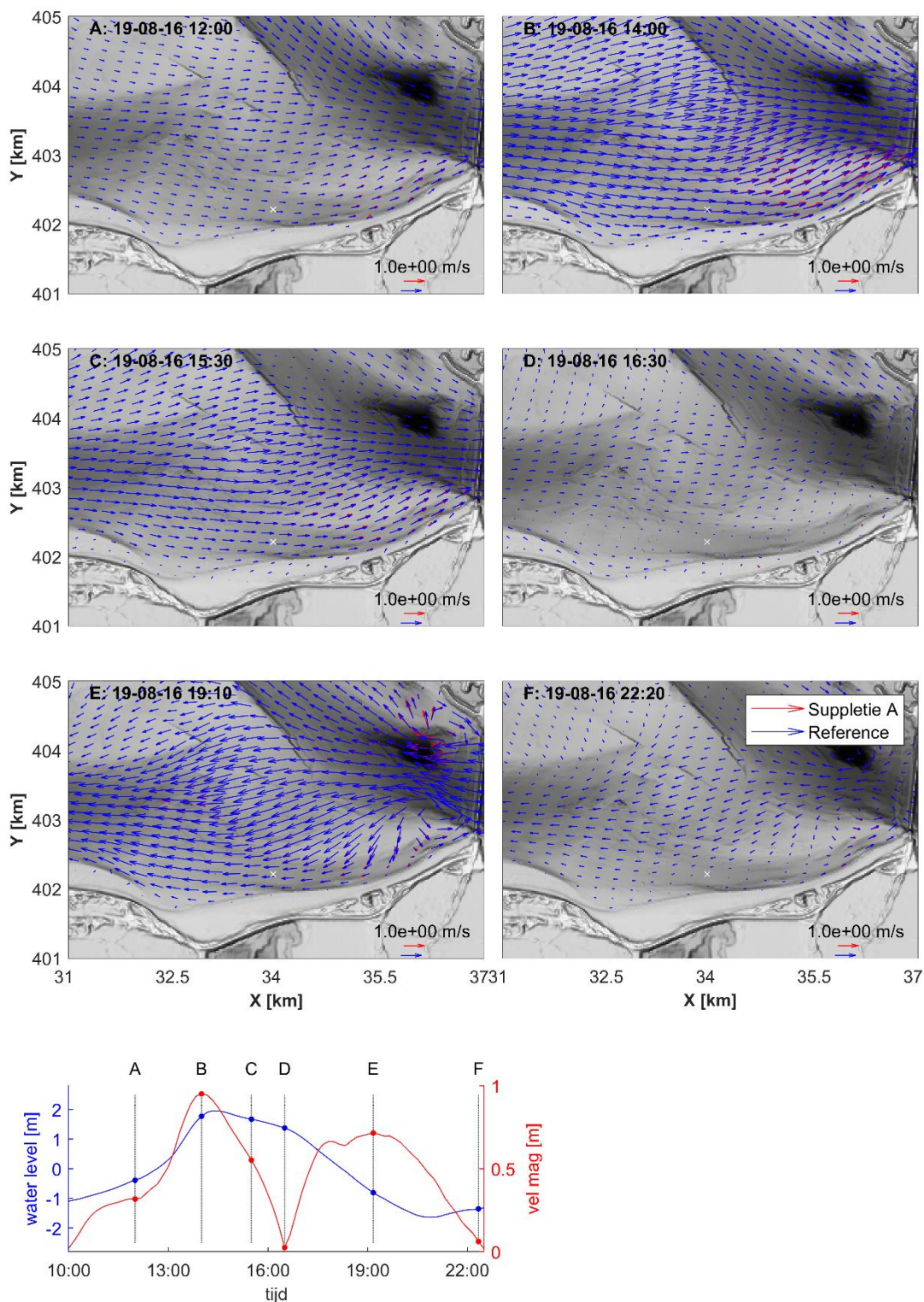
E Snelheden en transporten voor de suppletievarianten

E.1 2013 suppleties

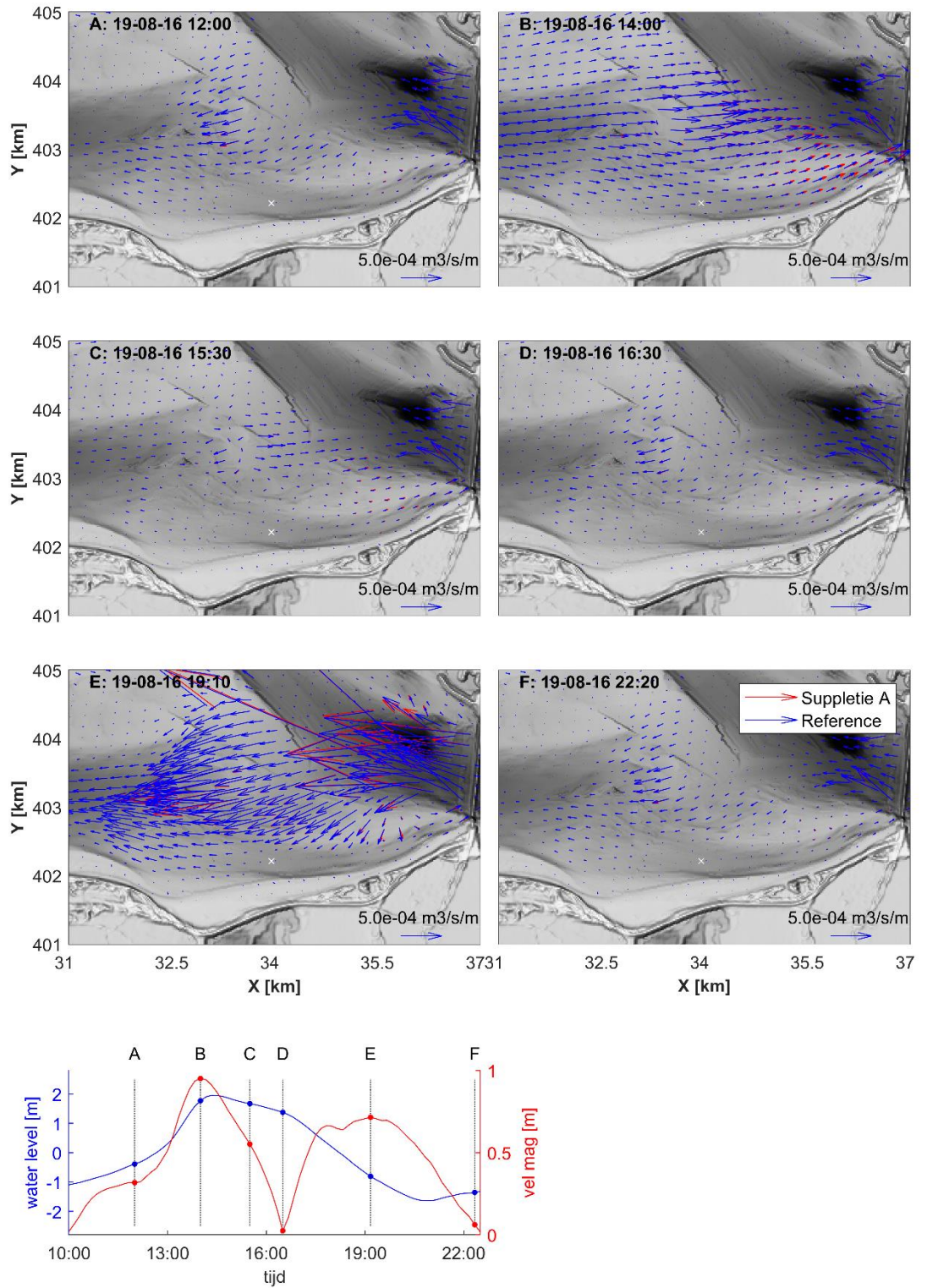


Figuur E-1: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Onrust op basis van de 2014 bodem (rode pijlen) en 2013 bodem (blauwe pijlen).

E.2 Geulwand

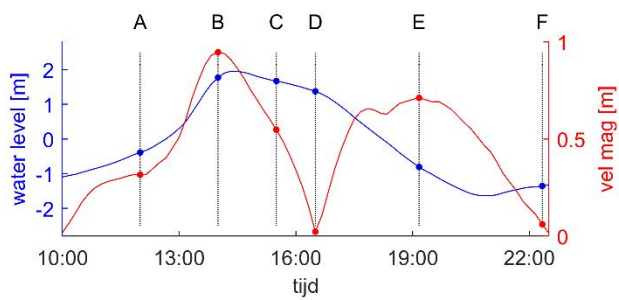
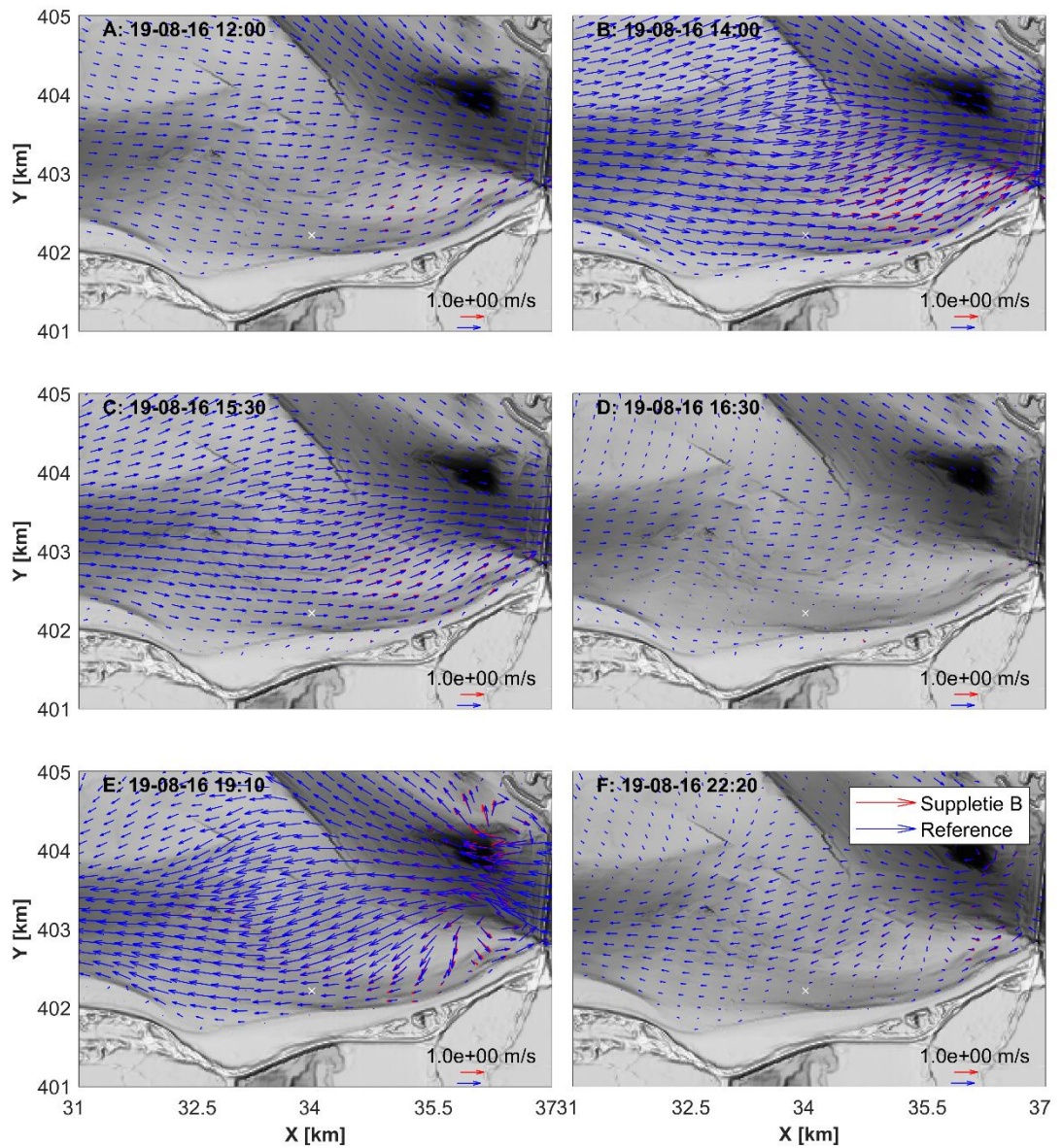


Figuur E-2: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust van de suppletievariant 'Geulwand' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

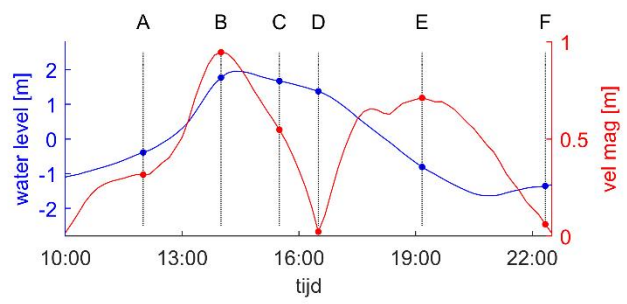
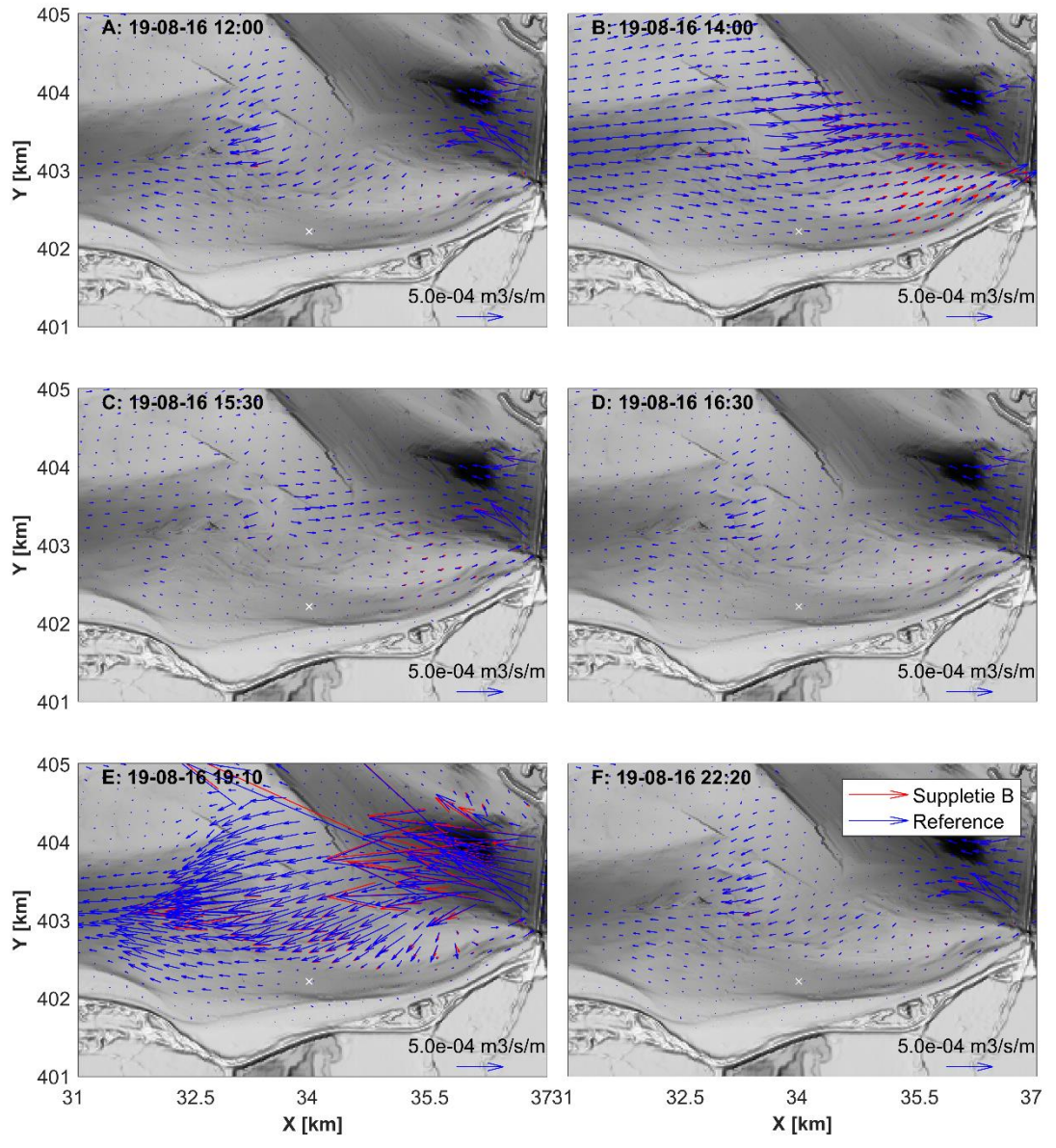


Figuur 5-1: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Onrust van de suppletievariant 'Geulwand' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

E.3 Geulbodem

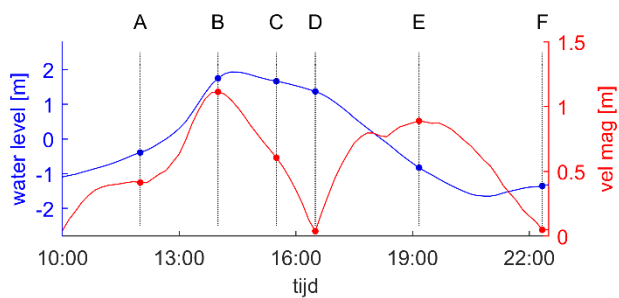
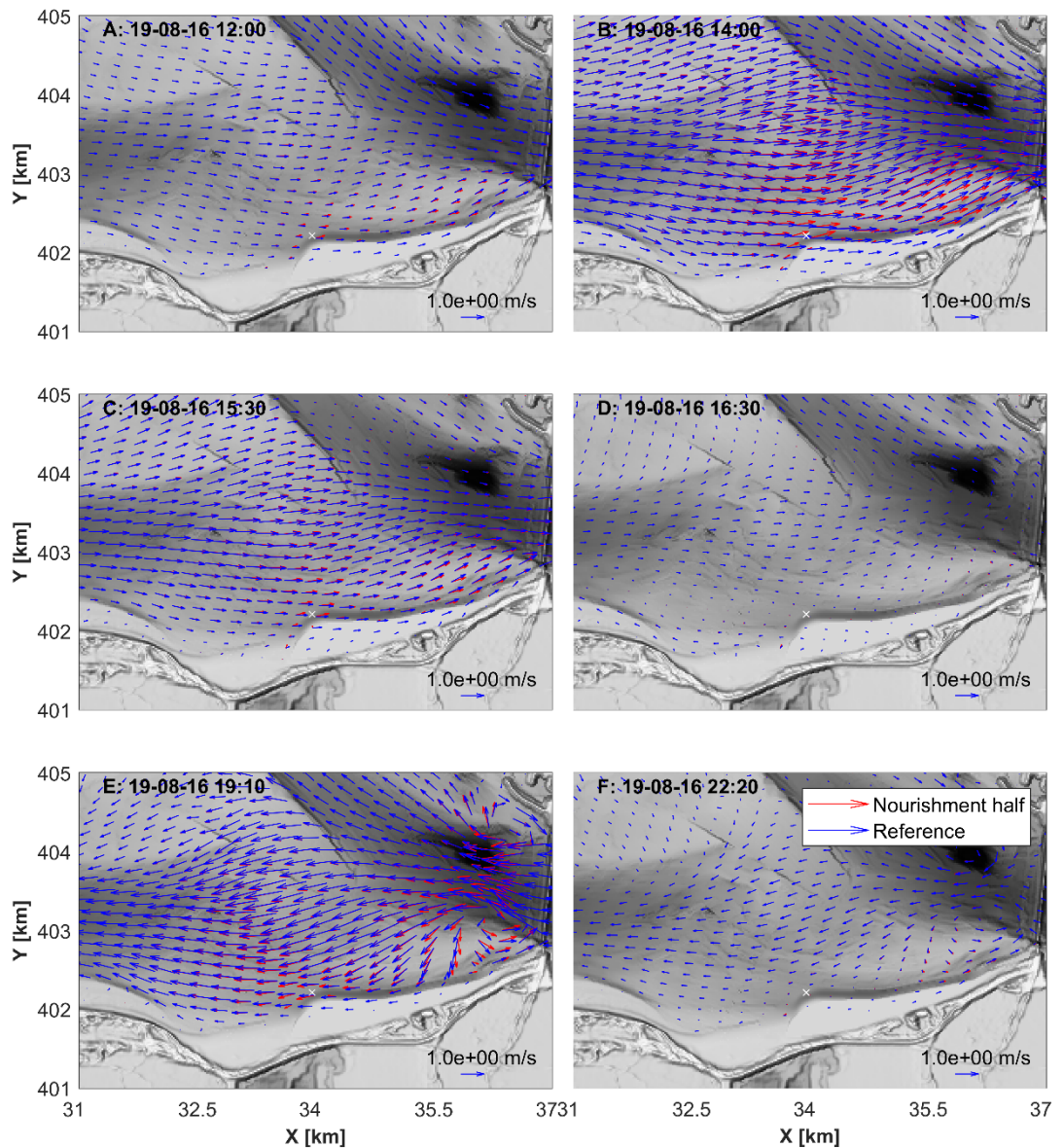


Figuur 5-2: Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust van de suppletievariant 'Geulbodem (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

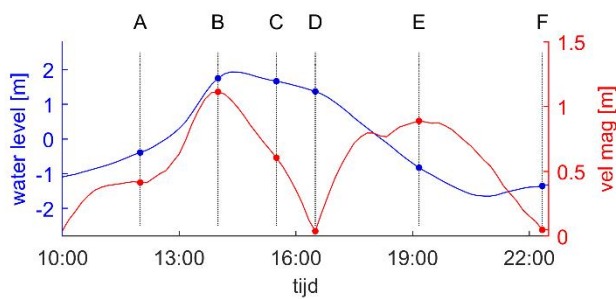
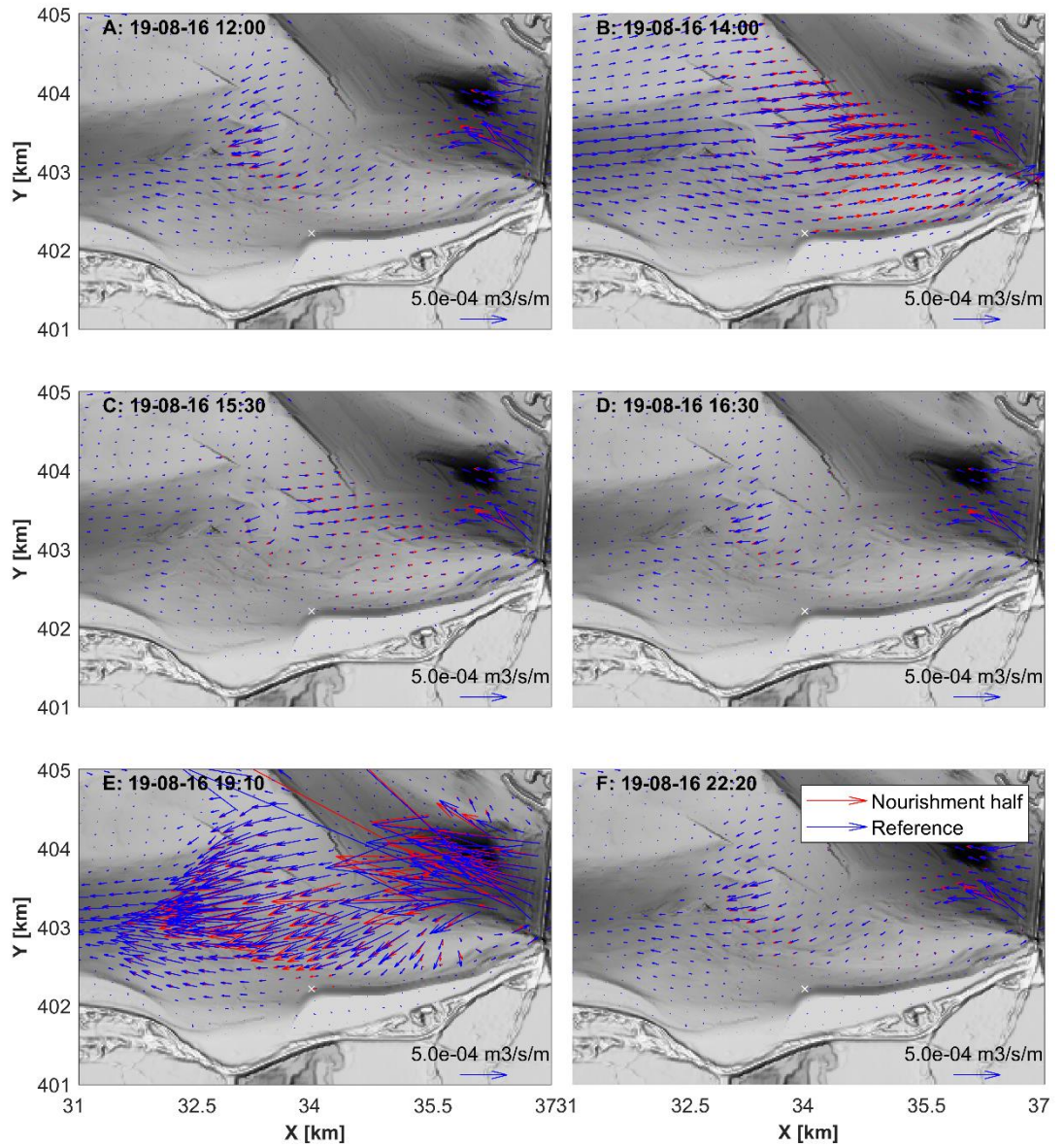


Figuur 5-3: Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Orrust van de suppletievariant 'Geulbodem' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

E.4 Kustdwarse uitbouw

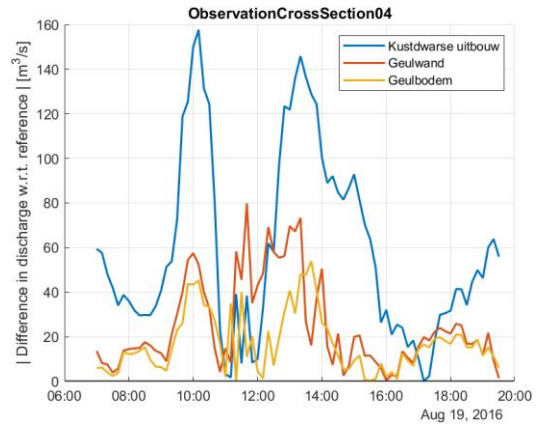
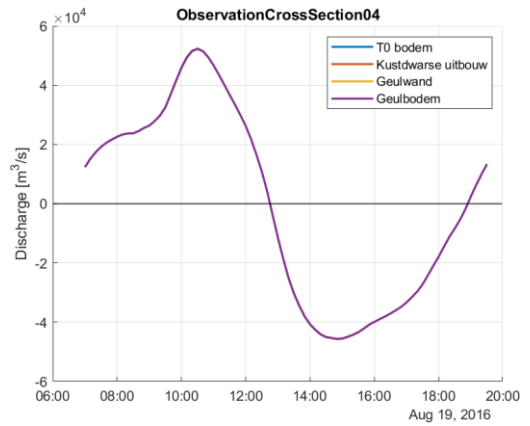
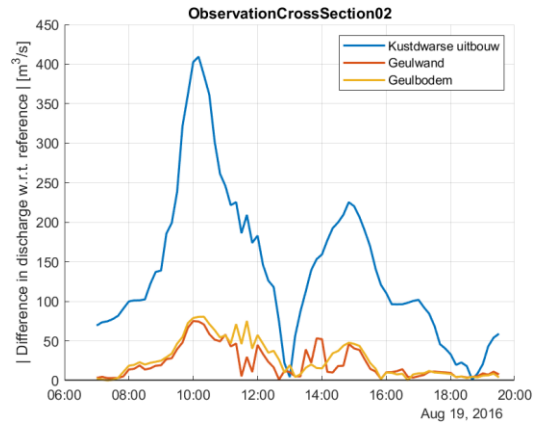
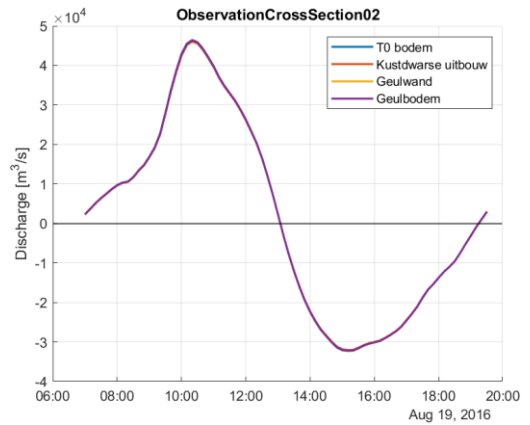
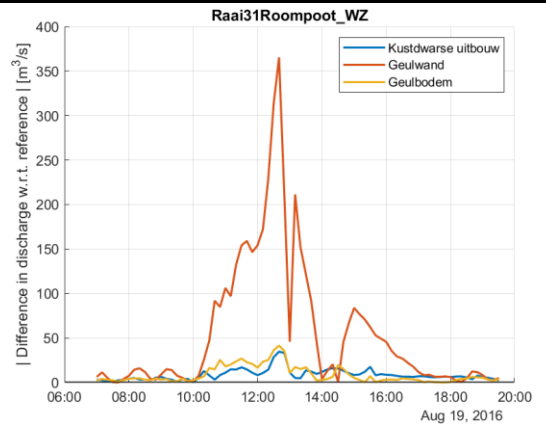
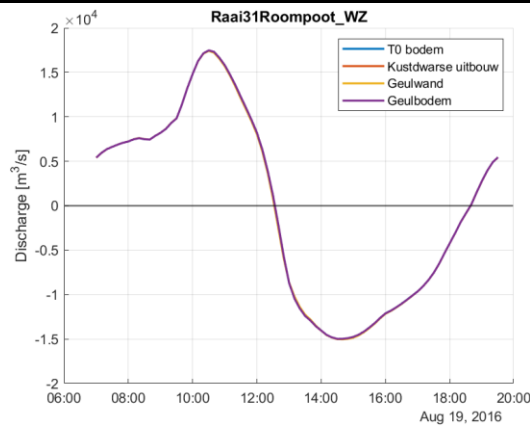
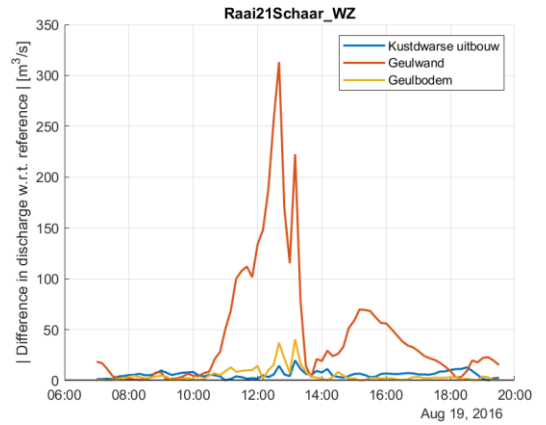
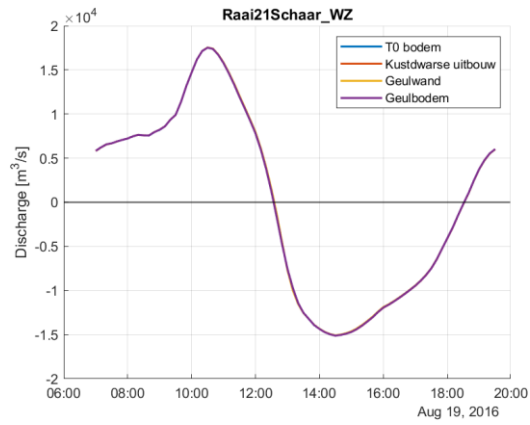


Figuur 5-4 Dieptegemiddelde stroming over de getijperiode bij de Schaar van Onrust van de suppletievariant 'Kustdwarse uitbouw' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).



Figuur 5-5 Sedimenttransporten over de getijperiode bij de Schaar van Orrust van de suppletievariant 'Kustdwarse uitbouw' (rode pijlen) en de T0 bodem 2022 (blauwe pijlen).

F Debieten door dwarsdoorsnedes



Figur 5-6 Debieten door dwarsdoorsnedes voor de verschillende suppletievarianten.

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