

Analyse Geulwandsuppletie Ameland Zuidwest



Analyse Geulwandsuppletie Ameland Zuidwest

Auteur(s)

Erik van Onselen
Tommer Vermaas

Analyse Geulwandsuppletie Ameland Zuidwest




Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	Evelien Brand
Referenties	-
Trefwoorden	Geulwandsuppletie, suppletie, Ameland zuidwest

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	22-07-2020
Projectnummer	11205236-002
Document ID	11205236-002-ZKS-0003
Pagina's	38
Status	definitief

Auteur(s)

	Erik van Onselen	
	Tommer Vermaas	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	 Erik van Onselen	 Roeland Nieboer	 Toon Segeren	
	Tommer Vermaas			

Samenvatting

Tussen mei 2017 en januari 2018 is aan de zuidwest kant van Ameland een geulwandsuppletie uitgevoerd. Het voorliggende rapport beschrijft aan de hand van vragen die vanuit Rijkswaterstaat gesteld zijn een tussentijdse evaluatie van de (morfologische) ontwikkeling van de suppletie. De hoofdvraag die in dit rapport wordt beantwoord luidt: *“Wat is de morfologische ontwikkeling van de suppletie?”*

De suppletie was ontworpen om onder een helling van 1:13 te worden aangelegd tot een hoogte van NAP -8 m en NAP -10 m, afhankelijk van de locatie. De suppletie is over het algemeen lager en onder een flauwere helling aangelegd dan vooraf gespecificeerd. Het totaal netto aangebrachte volume bedroeg 2.600.000 m³ en is daarmee vergelijkbaar met het ontworpen volume van 2.500.000 m³.

Tussen eind januari 2018 en begin maart 2020 is ruim driekwart van het netto suppletievolume uit het suppletievak verdwenen. In totaal verdween er 2.100.000 m³ uit het suppletievak, waarvan ongeveer 1.000.000 m³ nog binnen 400 m van de kust en binnen 2 km ten noordwesten van het suppletievak ligt. Het sediment lijkt grotendeels naar het noorden getransporteerd te zijn en relatief weinig naar de Waddenzee.

Er lijkt niet direct reden om (sterke) invloed van deze suppletie op de naastliggende plaat/kwelder de Feugelpôle te verwachten. Het is niet helemaal duidelijk waar de schelpen op de Feugelpôle precies vandaan komen, maar er zijn geen schelpenbanken aangetroffen in de boringen, die eventueel bedekt zouden zijn geraakt met suppletiezand. Een verstoring van de geulwand-plaat interactie is niet waarschijnlijk.

In de MKL- of duinvoet-positie is geen effect van de geulwandsuppletie waarneembaar tot 2019, het is onwaarschijnlijk dat er sediment van de geulwandsuppletie in deze zone terecht is gekomen.

De geulwandsuppletie is in mindere mate geschikt gebleken voor het beschermen van de bestorte geulwand en vertragen van kustwaartse geulmigratie. de zeer hoge erosiesnelheden, en met name het snel verdwijnen van sediment vanaf de bestorte geulwand, geven aan dat de suppletie-frequentie nog hoger zal liggen dan in vooraf kon worden ingeschat. Een volledig zandige oplossing om de kustveiligheid te garanderen lijkt daarom een erg grote inspanning te zullen vergen.

In relatie tot de hoofdvraag: *“Wat is de morfologische ontwikkeling van de suppletie?”* concluderen we het volgende: het sediment heeft zich zeer snel verspreid langs de kust. Ruim de helft van het suppletievolume lag eind 2019 langs de zuid- en zuidwestkust van Ameland, in het suppletievak en ten noorden daarvan. Iets minder dan de helft van het gesuppleerde volume is hoogstwaarschijnlijk richting de buitendelta verplaatst, het is niet duidelijk waar het precies terecht is gekomen. Met de vermoedelijke verplaatsing in noordelijke richting komt het zand in het kustfundament terecht, waar het bijdraagt aan het hoofddoel van de suppletie: *“het laten meegroeien van het kustfundament”*. Mogelijk transport richting de Waddenzee – geen onderdeel van het kustfundament – draagt mogelijk indirect bij aan het kustfundament, doordat er minder sediment vanaf de buitendelta's richting de Waddenzee gaat.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	6
1.1	Introductie	6
1.2	Onderzoeksvragen	6
1.3	Leeswijzer	6
2	Achtergrond	7
2.1	Het Zeegat van Ameland	7
2.2	Geologie	8
2.3	Kustverdediging	9
3	Data en methoden	10
3.1	Multibeam data en afgeleide rasterdata	10
3.2	Dwarsprofielen	11
3.3	Volumeverschillen	11
3.4	Momentane kustlijn en duinvoet	11
4	De geulwandsuppletie	13
4.1	Ontwerp	13
4.2	Aanleg	14
4.3	Ontwikkeling binnen het suppletievak	19
5	Morfologische ontwikkeling	25
5.1	Morfologie en volumes	25
5.2	Momentane kustlijn en duinvoet	33
6	Conclusies	35
6.1	Hoofdvraag	35
6.2	Deelvragen	35
7	Referenties	37

1 Inleiding

1.1 Introductie

Tussen mei 2017 en januari 2018 is aan de zuidwest kust van Ameland, ter hoogte van waar de Waddenzeedijk overgaat in de duinenkust, een geulwandsuppletie aangelegd. Deze suppletie is onderdeel geweest van de preconsultatie van de kustfundamentsuppleties in 2015. Het hoofddoel van de suppletie is om voor kustveiligheid op de lange termijn te zorgen door het laten meegroeien van het kustfundament. Een secundair doel was de bescherming van de onder water aanwezige bestorting (vanaf Jarkusraai 4700) en het tegengaan van landwaartse migratie van de geul (tussen 4620 en 4700). Alhoewel het geen oorspronkelijk doel was, is de analyse van deze suppletie tevens waardevol om meer inzicht te geven in het natuurlijk sturen van geulen in de Waddenzee. In het voorliggende rapport worden twee jaar na de aanleg van de geulwandsuppletie vragen beantwoord ten aanzien van de aanleg, ontwikkeling en effecten op nabijgelegen gebieden.

1.2 Onderzoeksvragen

Dit rapport is een tussentijdse evaluatie van de geulwandsuppletie en wordt gedreven door vragen van Rijkswaterstaat die voor en na aanleg van de suppletie zijn ontstaan. De hoofdvraag luidt:

“Wat is de morfologische ontwikkeling van de suppletie?”

Hiervoor worden de volgende deelvragen beantwoord:

1. Hoe is de suppletie ontworpen en hoe is deze daadwerkelijk uitgevoerd? Hoeveel zand is er uiteindelijk precies waar aangebracht? Waarom is er eventueel een verschil tussen het ontwerp en de uitvoering: was het ontwerp niet uitvoerbaar?
2. Verandert de hydrodynamiek door aanleg van de suppletie?
3. Hoe en hoe snel heeft het aangebrachte zand zich verspreid? Waar is het aangebracht zand gebleven: heeft het bijgedragen aan de MKL-zone? Heeft de duinvoet zich ontwikkeld? Is het zand de Waddenzee in gegaan?
4. Hoe ontwikkelt de helling van de onderwateroever zich? Is de steile onderwateroever te verklaren; komen hier bijvoorbeeld schelpen- of kleibanken voor?
5. Wat was het effect van de suppletie op de Feugelpôle? Leidt de verharding van deze geulwand tot verstoring van de geulwand-plaat interactie en daarmee tot verstoring van de aanvoer van zand/schelpen naar de plaat en de Feugelpôle?

1.3 Leeswijzer

In het volgende hoofdstuk wordt achtergrondinformatie over de morfologie, geologie en ingrepen gegeven. De gebruikte methodiek wordt uitgelegd in hoofdstuk 3. Hoofdstuk 4 gaat in op het ontwerp en de uiteindelijke aanleg van de geulwandsuppletie, alsmede de morfologische ontwikkeling na aanleg binnen het suppletievak. Hierin komen de eerste twee deelvragen aan bod. In hoofdstuk 5 wordt gekeken naar de morfologische ontwikkeling en rondom het suppletiegebied. Dit hoofdstuk heeft betrekking op deelvragen 3, 4 en 5. In de conclusies aan het eind van dit rapport worden de deelvragen beantwoord.

2 Achtergrond

2.1 Het Zeegat van Ameland

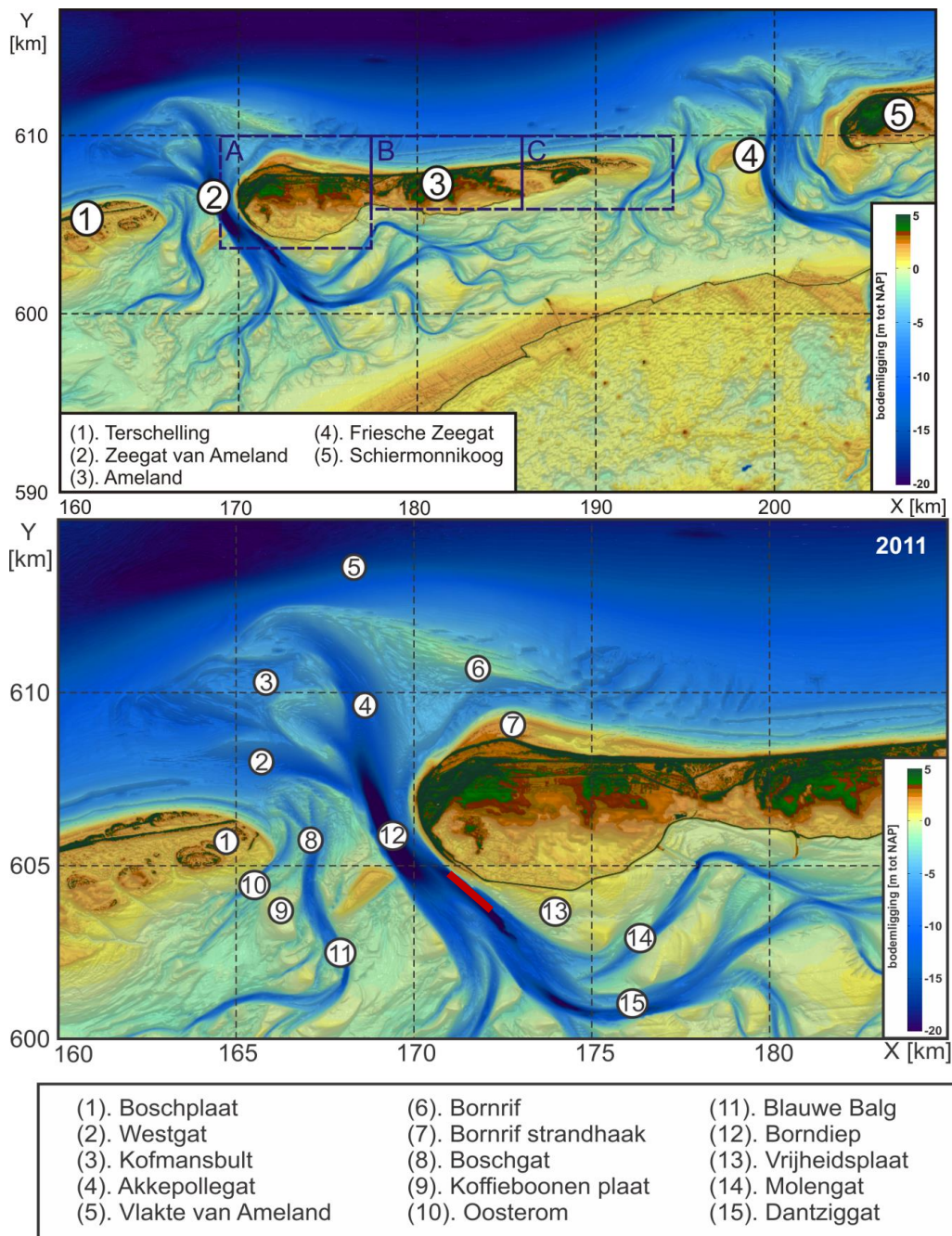
Het onderzoeksgebied maakt deel uit van het Zeegat van Ameland. Dit is het zeegat tussen Terschelling en Ameland (Figuur 1). De morfologische ontwikkeling van de getijdengeulen en de buitendelta is het gevolg van de complexe interactie tussen getij en golfwerking. Het zeegat is onderhevig aan een natuurlijke cyclus van 40-60 jaar (Cleveringa et al., 2005; Cheung et al., 2007), waarin een systeem met een enkele getijdegeul en twee getijdegeulen elkaar afwisselen. Op dit moment zijn er twee getijdegeulen actief: het Borndiep langs de kust van Ameland en het Boschgat nabij de oostkust van Terschelling.

Het suppletievak ligt in het Borndiep, dat momenteel qua waterdoorvoer de meest actieve getijdegeul in het Zeegat van Ameland is en vlak langs de west- en zuidwestkust van Ameland loopt. Ter hoogte van het suppletievak is het Borndiep historisch gezien oostwaarts richting de kust van Ameland gemigreerd, waardoor de geul sinds het begin van deze eeuw zeer dicht langs het strand is komen te liggen en is om die reden vrijwel volledig van steenbestorting voorzien. De oostelijke geulwand heeft hier op veel plekken een helling van 1:3 en soms zelfs steiler gekregen. De steile vooroever en lokale schade aan de bestorting zijn de belangrijkste oorzaken van het regelmatig optreden van strandvallen, waarbij een deel van de vooroever en het strand naar de bodem van de geul wegzakt en afgevoerd wordt (Vermaas et al., 2019). Dergelijke strandvallen zijn afgelopen jaren meerdere keren voorgekomen: zo werden er in 2017 drie strandvallen gemeld¹, waarvan twee tijdens de aanleg van de geulwandsuppletie. Recenter zijn er strandvallen geweest in januari, maart en augustus 2019 en vond de laatste plaats in januari 2020.

Richting de Noordzee gaat het Borndiep over in twee belangrijke geulen waardoor een groot deel van de getijdestroom van en naar de buitendelta wordt geleid: het Westgat en het Akkepollegat. De dominante ebstroom wisselt periodiek af tussen de twee gaten. Momenteel gaat het grootste gedeelte van het getijdeprisma door het Akkepollegat, maar is er een transitie gaande waarin het Westgat wederom een belangrijkere rol krijgt (Elias et al., 2019).

Verder zeewaarts op de buitendelta migreren zandplaten door golfwerking en kustlangse stroming richting het oosten. Dit is geen continu proces, maar vindt plaats in relatief korte perioden waarbij een zandplaat vanuit het ebschild met snelheden tot ruim 200 m/jaar richting de noordoostkop van Ameland migreert en daar voor een uitbouw van de kust zorgt (Israël & Dunsbergen, 1999; Ridderinkhof et al., 2016). Het uitbouwen van de kust door zandplaten vond tot zover bekend plaats rond het begin van de 20^e eeuw, eind jaren '70/begin jaren '80 en rond 2017 (Elias et al., 2019). De plek waar de meeste van deze zandplaten aanzanden ligt echter buiten het onderzoeksgebied bij de Bornrif strandhaak aan de noordwestkust van Ameland.

¹ <https://www.persbureau-ameland.nl/rws-over-strandval-natuur-zoekt-evenwicht>



Figuur 1. Ligging van het Zeegat van Ameland (boven) en een overzicht van de ligging van geulen en platen (onder). De rode lijn in de onderste figuur geeft de locatie van de geulwandsuppletie aan.

2.2 Geologie

De ontwikkeling van het Borndiep ter hoogte en net ten zuiden van het suppletievak wordt sterk beïnvloed door de aanwezigheid van erosiebestendige lagen in de ondergrond. Verdieping van de geulbodem wordt verhinderd door een laag potklei (Laagpakket van Nieuwolda, Formatie van Peelo) die is afgezet tijdens de Elsterien ijstijd. Dit is een zeer compacte, stugge klei die ervoor zorgt dat er vrijwel geen verdieping plaats kan vinden. Met name rond Jarkusraai 4620 is de geheel platte geulbodem over een breedte van ruim 150 m, een duidelijke indicatie van deze niet-eroderende laag. Ten zuiden van de bestorting, tussen Jarkusraaien 4600 en 4700, wordt de geulwand gekenmerkt door twee plateaus die elk begrensd worden door een steile onderwateroever. Deze plateaus zijn gevormd door de aanwezigheid van twee Holocene kleilagen op 5 en 12 m -NAP. De kleilagen vertragen tevens de laterale migratiesnelheid van de geul met zo'n 25-30% ten opzichte

van de situatie zonder invloed van deze kleilagen (Forzoni et al., 2018). Een uitgebreide beschrijving en analyse van het effect van deze lagen op de morfologische ontwikkeling is gegeven in Forzoni et al., (2018) en Vermaas et al., (2019).

2.3 Kustverdediging

Langs dit deel van de kust worden maatregelen genomen om de vooroever en het strand te beschermen. Harde maatregelen bestaan uit bestorting met zinkstukken (1947) en de aanleg van strandhoofden (1979). Sinds 1979 zijn er ook zandsuppleties uitgevoerd. Een overzicht van harde en zachte maatregelen is gegeven in Tabel 1.

Tabel 1. Zandsuppleties uitgevoerd Ameland West / Hollum / Westkop en de buitendelta (Beheerbibliotheek)

Jaar	begin	eind	Volume	Type
	km	km	Mm ³	
1979	1.6	2.2	0,3	Strandsuppletie
1994	48.6	49.6	0,19	Vooroeverbetasting en strandkribben
1997	1.2	3	0,51	Strandsuppletie
2000	1	2.6	0,4	Strandsuppletie
2007	1.95	3	1,2	Vooroeversuppletie
2007	2	3.2	0,3	Strandsuppletie
2010-2011	2	4	1,9	Strandsuppletie
2015	1.4	4.02	2,0	Strandsuppletie
2017-2018	46	48.4	2,5	Geulwandsuppletie (dit rapport)
2018-2019	-	-	5,0	Pilot buitendeltasuppletie
2019	1.2	4.2	2,54	Strandsuppletie

3 Data en methoden

Voor het grootste deel van dit onderzoek is multibeam data gebruikt die gedurende de afgelopen tien jaar is ingewonnen door zowel Rijkswaterstaat (RWS) als de aannemer die de geulwandsuppletie heeft aangelegd. De multibeam data is gebruikt voor het produceren van verschilkaarten, verticale snelheidskaarten, kustdwarse profielen en volumeverschillen. In dit hoofdstuk wordt een overzicht van de gebruikte data en methodiek gegeven.

3.1 Multibeam data en afgeleide rasterdata

Een overzicht van alle gebruikte multibeam data is hieronder gegeven in Tabel 2. De ruwe puntbestanden van de multibeam opnames zijn omgezet naar rasters van de bathymetrie met een resolutie van 1x1 m. Van deze rasters zijn verschilkaarten (dz) en verticale snelheden (dz/dt) afgeleid tussen opeenvolgende opnames. In het bijzonder zijn ook verschilkaarten gemaakt van de huidige situatie en de situatie van vlak vóór de geulwandsuppletie (RWS 03-03-2020 – RWS 06-12-2016 en voor een close-up van het suppletievak: RWS 03-03-2020 – Aannemer 24-05-2017), alsmede van de huidige situatie versus de situatie vlak ná aanleg van de geulwandsuppletie (RWS 20-11-2019 – RWS 01-03-2018 en voor een close-up van het suppletievak: RWS 03-03-2020 – Aannemer 20-01-2018).

Tabel 2. Gebruikte multibeam data van Rijkswaterstaat en de aannemer.

Einddatum opname	Jarkus begin	Jarkus eind	dt (dagen)	Bijzonderheden
Rijkswaterstaat				
06-07-2010	< 4600	260	-	
18-04-2011	4600	202	286	
17-04-2012	< 4600	220	365	Smalle strook vanaf 4953, gaat door Westgat
18-11-2012	4600	160	215	Smalle strook van 100 m breed vanaf 240
03-04-2014	4600	260	501	
11-02-2015	4600	260	314	
20-08-2015	4600	260	190	
03-03-2016	4600	120	196	Enkel suppletievak voor volumeberekeningen
04-07-2016	4600	260	123	
19-10-2016	4600	240	107	
06-12-2016	4600	240	48	Op sommige plaatsen smallere strook langs kust
21-02-2017	4600	240	77	Op sommige plaatsen smallere strook langs kust
25-04-2017	4600	4916	63	Enkel suppletievak voor volumeberekeningen
26-10-2017	4600	4953	184	Enkel suppletievak voor volumeberekeningen
01-03-2018	4600	401	126	Net na afronden de geulwandsuppletie
01-05-2018	4600	401	61	
17-09-2018	4600	401	139	Missende data (gaten) langs NW-kust
28-11-2018	4600	401	72	
23-05-2019	4600	401	176	
26-08-2019	4600	401	95	
20-11-2019	4600	401	86	
03-03-2020	4600	4820	104	Enkel suppletievak voor volumeberekeningen
Aannemer				

Einddatum opname	Jarkus begin	Jarkus eind	dt (dagen)	Bijzonderheden
24-05-2017	4600	4840	-	Inpeiling
22-06-2017	4600	4840	29	Tussenpeiling
03-08-2017	4600	4840	42	Tussenpeiling
30-10-2017	4620	4840	88	Tussenpeiling
03-11-2017	4620	4840	4	Tussenpeiling
11-01-2018	4620	4840	69	Tussenpeiling
20-01-2018	4600	4900	19	Uitpeiling

3.2 Dwarsprofielen

Voor het inzichtelijk maken van de verticale ontwikkeling van de geulwandsuppletie in en net ten noorden van het suppletievak zijn langs Jarkusraaien 4620 t/m 4900 dwarsprofielen gemaakt op basis van bathymetrische data. De locaties van de gebruikte Jarkusraaien zijn weergegeven in Figuur 2. Er zijn twee sets profielen gemaakt: (1) voor het analyseren van de ontwikkeling tijdens de aanleg van de geulwandsuppletie en (2) voor het analyseren van de ontwikkeling na de aanleg van de geulwandsuppletie. De eerste set figuren is gebaseerd op de in- en uitpeiling plus alle tussenpeilingen van de aannemer (totaal 7 datasets) ter hoogte van Jarkusraaien 4620 t/m 4820. De tweede set profielen is gebaseerd op de in- en uitpeiling plus alle multibeam data van RWS opgenomen tussen maart 2018 en maart 2020 (totaal 10 datasets) ter hoogte van Jarkusraaien 4620 t/m 4900.

3.3 Volumeverschillen

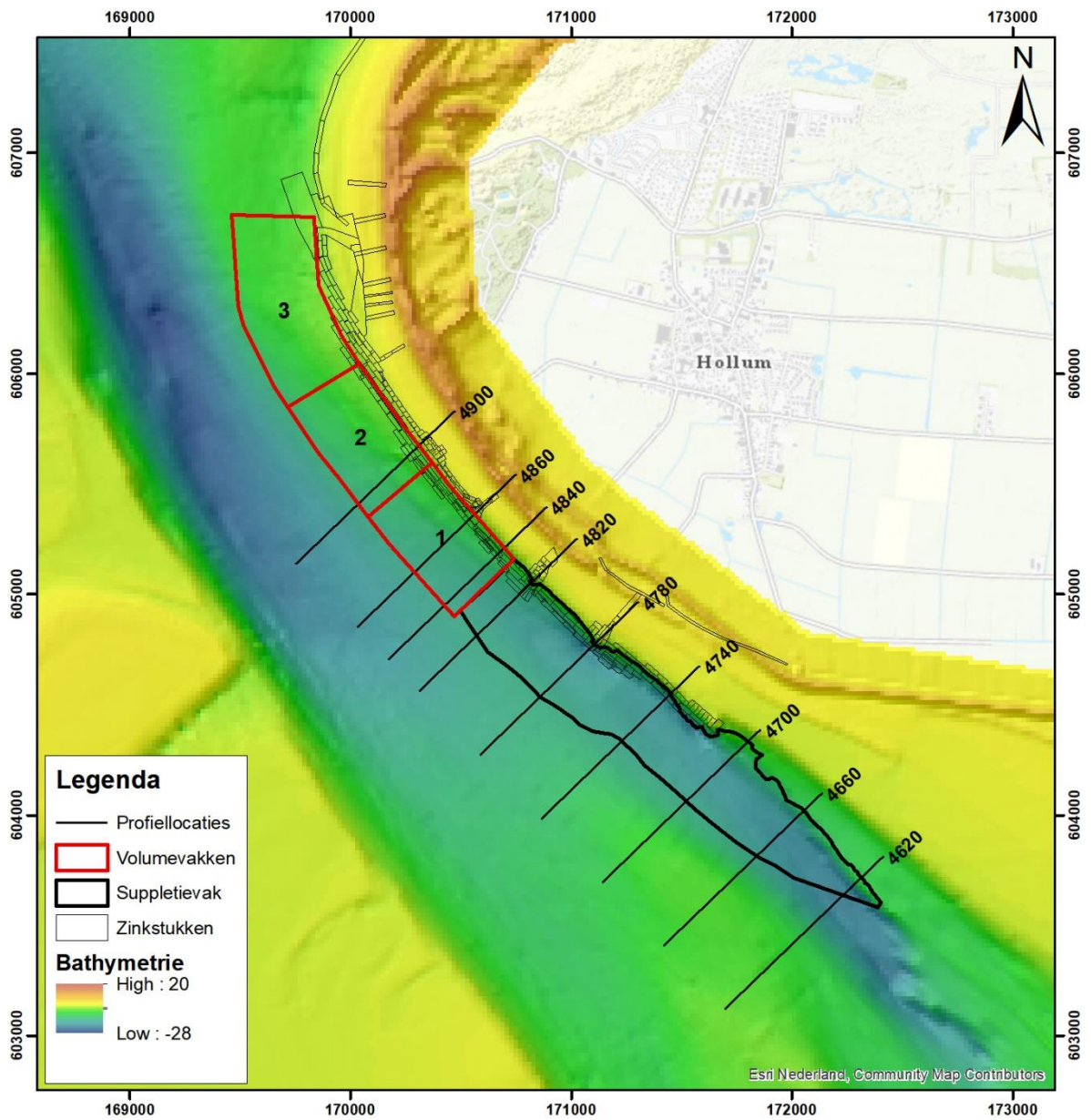
Er is naast het suppletievak een drietal vakken ten noorden van het suppletievak bepaald waarvoor volumeverschillen zijn berekend. Voor het suppletievak is de meeste data beschikbaar: alle in Tabel 2 genoemde multibeam data dekt dit gebied volledig. Voor de genummerde volumevakken is RWS multibeam data vanaf maart 2014 gebruikt met uitzondering van de data waarvoor dit is aangegeven in Tabel 2. De volumevakken bevinden zich tussen raai 4840 en raai 120. Het gebruiken van verder noordwaarts gelegen volumevakken is niet zinvol door de strandsuppletie die vanaf raai 120 is aangelegd in 2019, waardoor het signaal van de geulwandsuppletie niet te onderscheiden is. Een overzicht van de gebruikte volumevakken is hieronder gegeven in Figuur 2.

3.4 Momentane kustlijn en duinvoet

De ontwikkeling van de momentane kustlijn en de duinvoet is geanalyseerd door de verandering in de tijd in grafieken weer te geven. Bron van de data is:

- http://opendap.deltares.nl/thredds/dodsC/opendap/rijkswaterstaat/BKL_TKL_MKL/BKL_TKL_TND.nc
- <http://opendap.deltares.nl/thredds/dodsC/opendap/rijkswaterstaat/DuneFoot/DF.nc>

Voor niet alle raaien is de basis kustlijn of momentane kustlijn gedefinieerd, de ontwikkeling is alleen weergegeven voor de raaien met definitie.



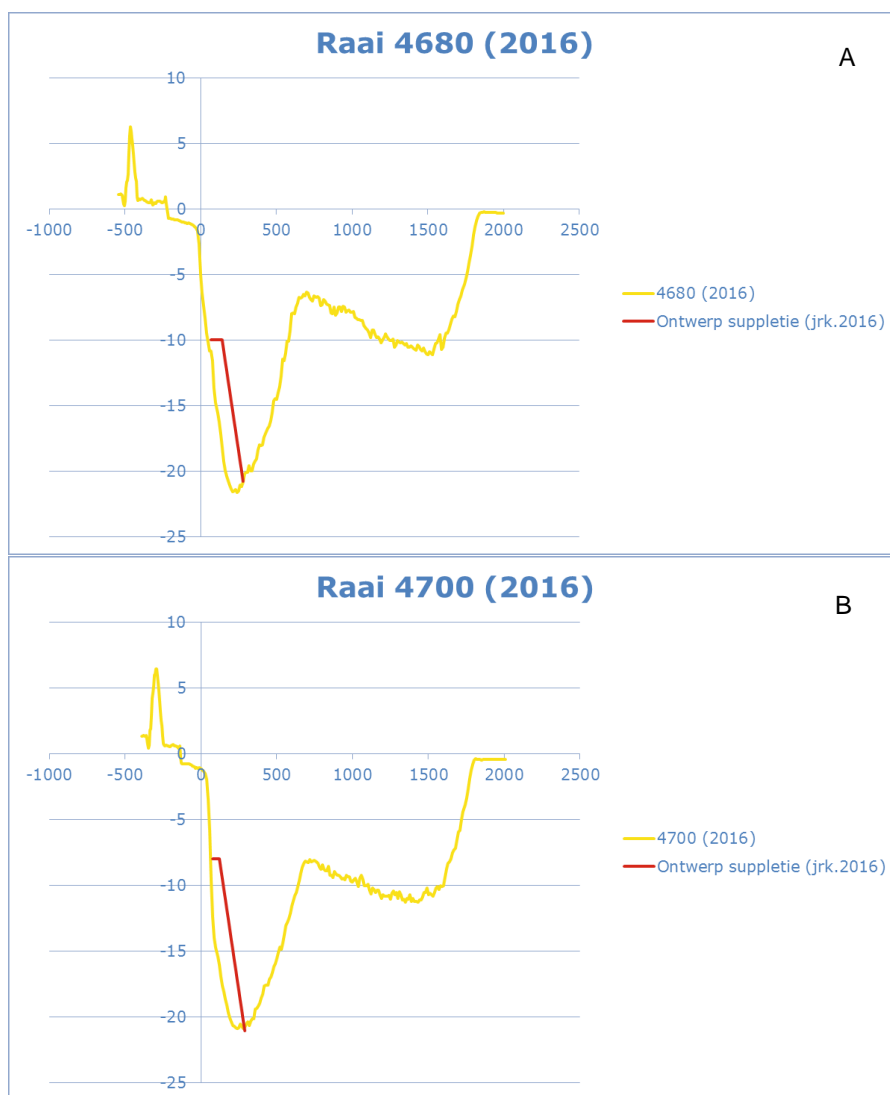
Figuur 2. Ligging van de bestorting, het suppletievak, de drie volumevakken en de gebruikte Jarkusraaien voor het produceren van profielen.

4 De geulwandsuppletie

4.1 Ontwerp

De geulwandsuppletie werd oorspronkelijk ontworpen om onder water de bestorting te bedekken tussen raai 4700-4800 en de natuurlijke onderwateroever tussen 4600 en 4700. Wegens het optreden van een strandval rond raai 4820 in februari 2017 werd besloten het suppletiegebied noordwaarts te verschuiven tot en met raai 4820 om hier de ontstane erosiekuil op te vullen. Volgens het uiteindelijke ontwerp wordt de bestorting dus bedekt tussen raai 4700 en 4820, terwijl de natuurlijke onderwateroever tussen raai 4620 en 4700 wordt bedekt. Tussen 4620 en 4700 werd verwacht dat de kustwaartse migratie vertraagd zou worden. In totaal bedroeg het voorziene suppletievolume 2.500.000 m³. De uiteindelijke ontwerpgegevens gebaseerd op de toetsing van 2017 zijn als volgt:

- Circa 1100 m³ per strekkende meter tussen raaien 4620 en 4820
- Tussen raai 4620 en 4700: vanaf 10 m -NAP met een horizontaal 'plateau' van ca. 100 m (afgaande op de ontwerptekening hieronder), helling 1:13 (Figuur 3A)
- Tussen raai 4700 en 4820: vanaf 8 m -NAP, helling 1:13 (Figuur 3B)



Figuur 3. (A) Ontwerp tot raai 4700 en (B) ontwerp vanaf raai 4700

4.2 Aanleg

Aanleg van de geulwandsuppletie werd in mei 2017 gestart en afgerond in januari 2018. De verschilkaarten tussen peilingen van de aannemer zijn gegeven in Figuur 4. Dwarsprofielen van raaien 4620 t/m 4820 zijn gegeven in Figuur 5 t/m Figuur 10.

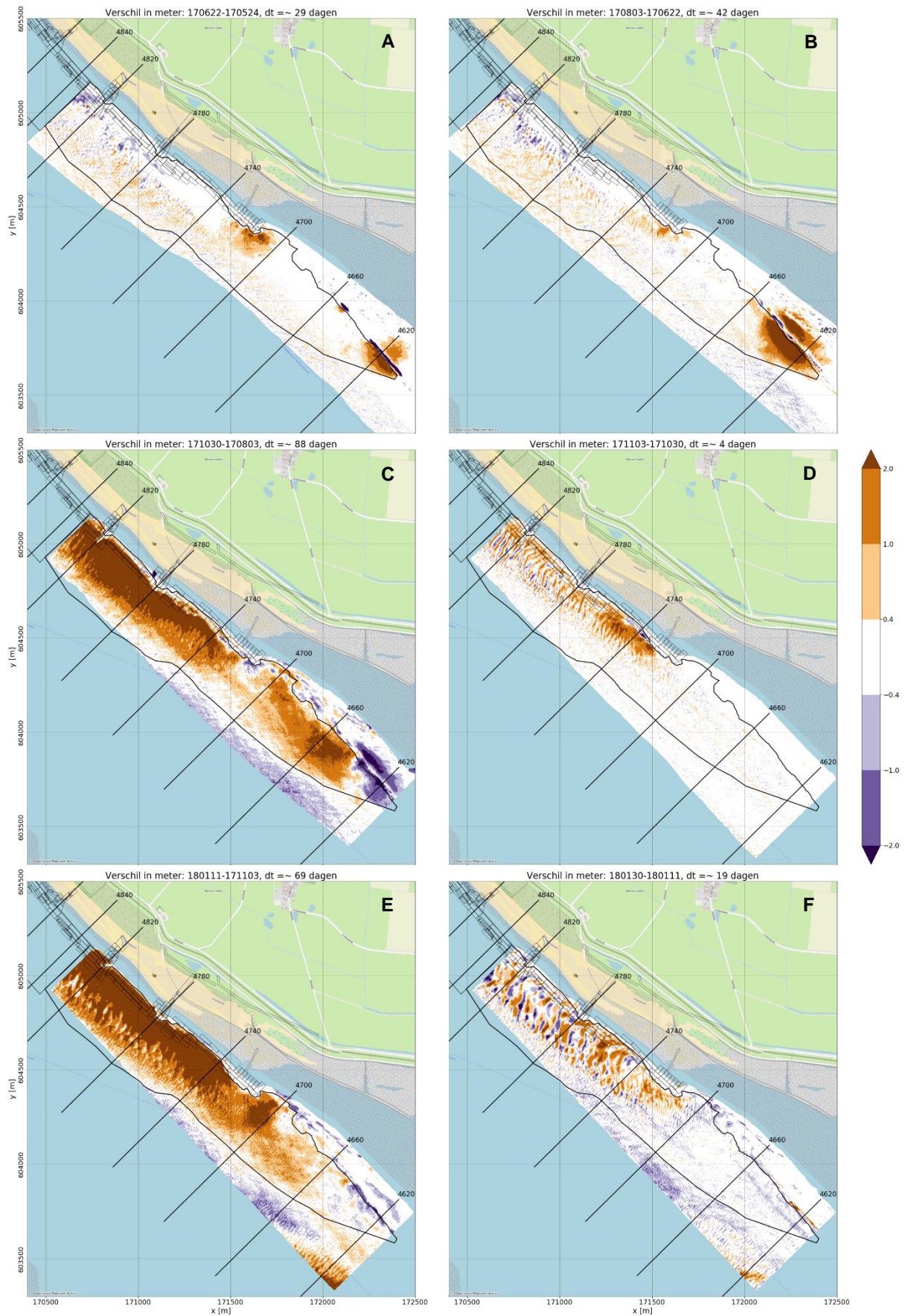
Aanleg is begonnen rond raai 4620 en tussen raai 4700 en 4740, waar de bestorting begint (zie panelen A en B van Figuur 4). Tussen raai 4620 en 4660 is zand zowel op de geulbodem als op het plateau van -10 m (boven de ontwerphoogte) terecht gekomen. Na augustus 2017 werd de focus van de suppletie verder noordwaarts geschoven. Tussen augustus en november 2017 (Figuur 4C) werd met name ten noorden van raai 4740 het meeste zand aangebracht op de bestorting en werd de natuurlijke geulwand rond raai 4660 bedekt. Eveneens in deze periode valt de sterke erosie van het aangebrachte zand rond raai 4620 op. Een aanzienlijk deel van het zand verdween hier vrijwel direct na aanbrengen en heeft mogelijk ook bijgedragen aan het toenemen van het zandvolume ter hoogte van de overige raaien in het suppletievak. De focus van de suppletie bleef vervolgens met name ten noorden van raai 4700, waar de bestorting ligt, tot het einde van de werkzaamheden in januari 2018. Tegen die tijd waren er in de bathymetrie duinvormen zichtbaar met een golflengte van +/- 100 m en een hoogte van ongeveer 1.5 m.

Het verschil tussen het ontwerp van de suppletie en de daadwerkelijke aanleg is goed te zien in de profielen. In vrijwel alle profielen is de suppletie onder een flauwere helling aangelegd dan volgens het ontwerp, alleen in profiel 4620 is de helling van 1:13 gerealiseerd. In raai 4660 is de suppletie vlak op de geulbodem aangebracht. In dit profiel ligt de NAP -10 m (de aanleghoogte) boven het (smalle) plateau, waardoor een helling van 1:13 al ongeveer werd bereikt vóór de aanleg van de suppletie. Het is niet duidelijk hoe het ontwerp voor deze raai beoogd was, aangezien die allen voor raai 4680 en 4700 in een profiel was aangegeven (zie vorige paragraaf). In de raaien 4700, 4740 en 4780 is de suppletie tot ca. 4 meter onder de aanleghoogte aangelegd. Door de steile helling van de geulwand is dit echter een relatief klein oppervlak dat mist – horizontaal gaat het om een afstand van ca. 25 meter tussen de bovenkant van de suppletie en de ontworpen aanleghoogte. In raai 4820 is de aanleghoogte door de suppletie bereikt, inclusief een klein 'plateau' van ca 30 meter, maar wel onder een flauwere hoek.

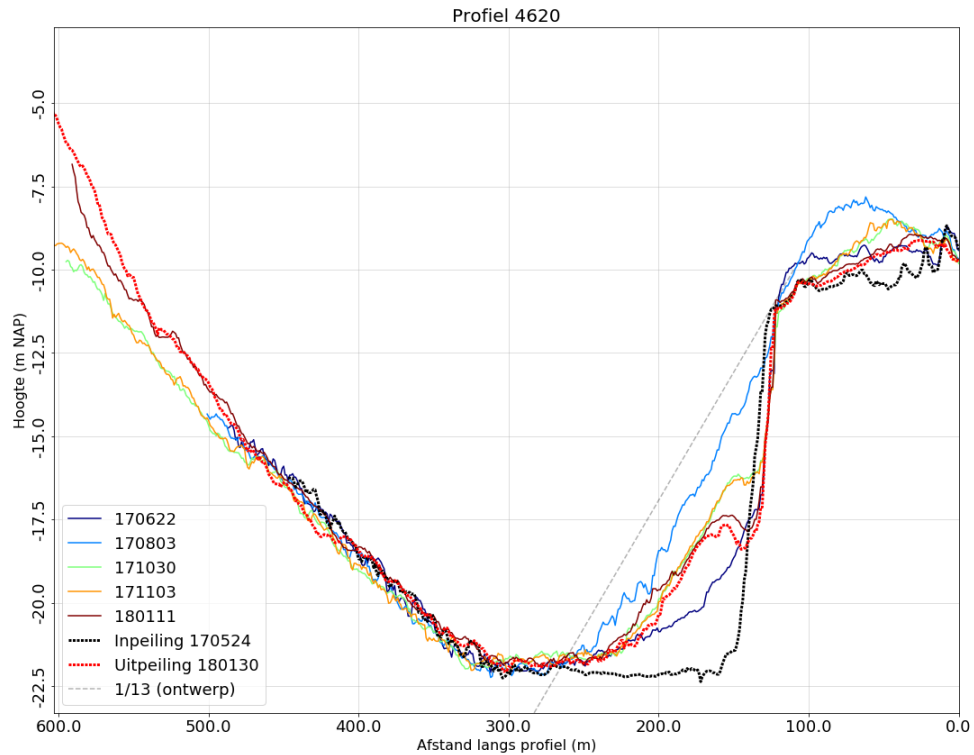
Een samenvatting van de vergelijking tussen ontwerp en realisatie is hieronder opgenomen in Tabel 3.

Tabel 3. Ontwerp versus realisatie van de geulwandsuppletie ter hoogte zes jarkusraaien.

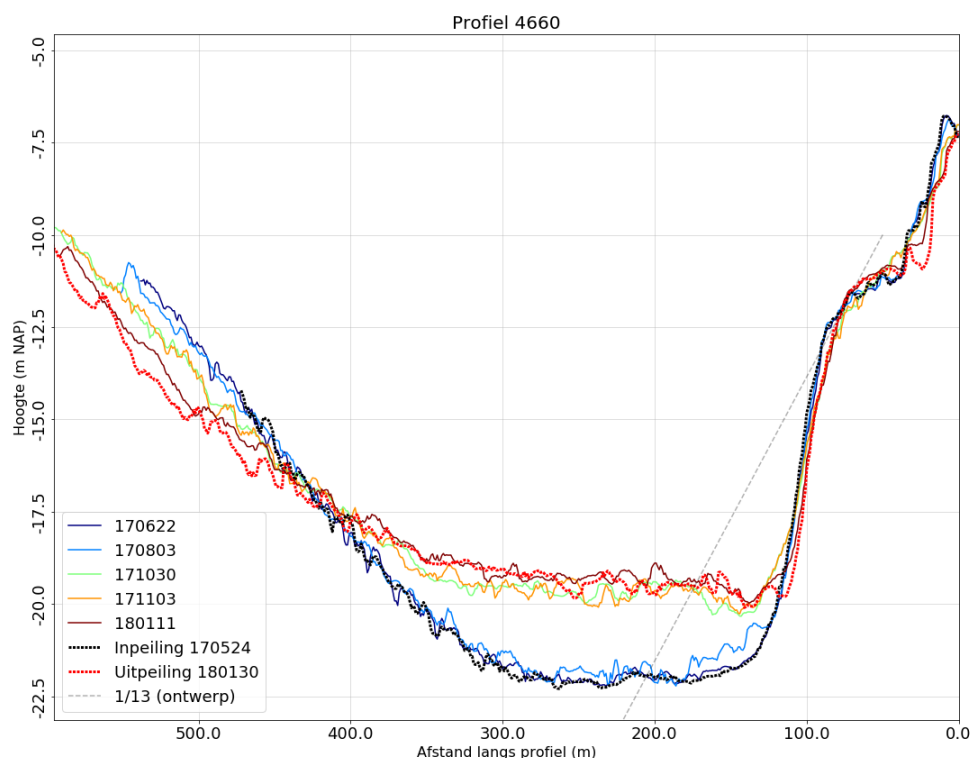
Raai	Ontwerp	Aanleghoogte	Aanleghelling	Opmerkingen
4620	-10 m, 1:13	-12.5 m	1:13	Hoogte -18 m tegen eind werkzaamheden
4660	-10 m, 1:13	-19 m	-	Vlak op de geulbodem aangebracht
4700	-8 m, 1:13	-12 m	1:40	Meeste op geulbodem aangebracht
4740	-8 m, 1:13	-12 m	1:35	Diepe geul opgevuld met ~9 m zand
4780	-8 m, 1:13	-13 m	<1:60	Diepe geul opgevuld met ~11 m zand
4820	-8 m, 1:13	-8 m	1:20	Strakker tegen geulwand aangelegd



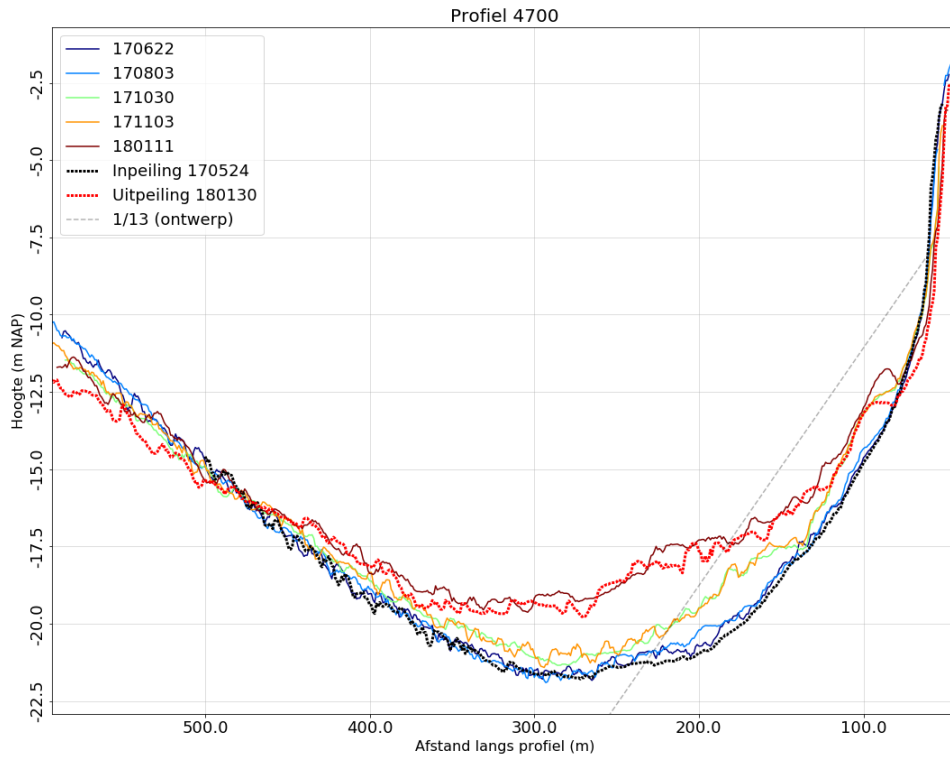
Figuur 4. Verschilkaarten van multibeamopnames (in-, uit-, tussenpeilingen) door de aannemer.



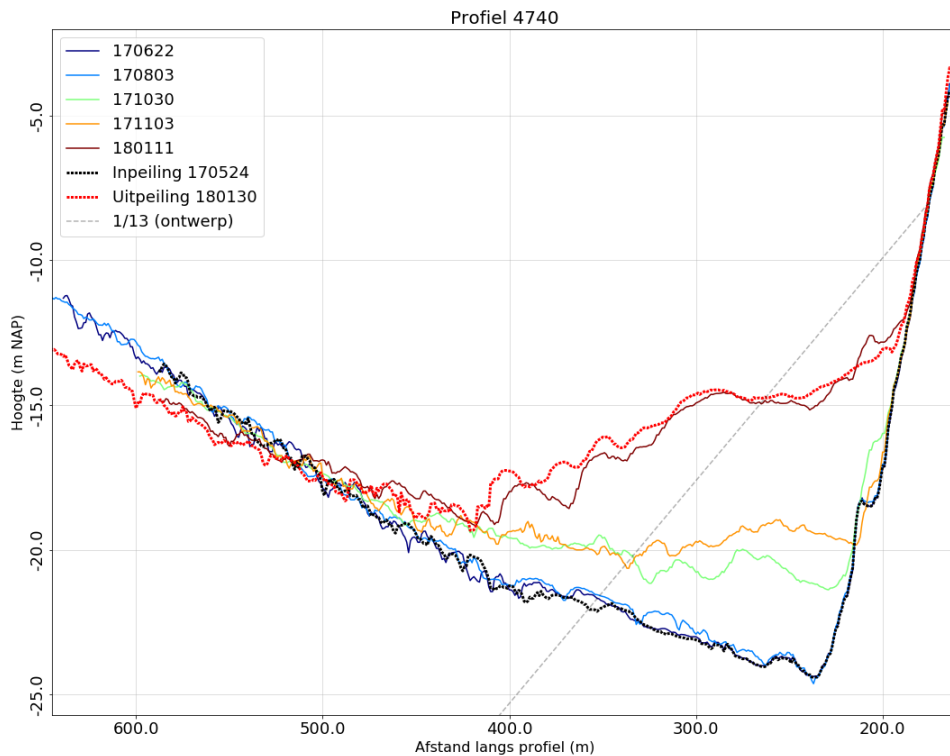
Figuur 5. Profiel bij raai 4620. Hier werd voor augustus 2017 de geulwandsuppletie aangelegd tot -12.5 m onder een helling van 1:13. In de periode daarna is tot het einde van de werkzaamheden een significant deel verdwenen, waardoor bij de uitpeiling het gesuppleerde zand vanaf -18 m tegen de geulwand aan lag. Ook vond er gedurende de aanleg erosie van de oorspronkelijke onderwateroever plaats, waardoor deze ongeveer 10 meter richting Ameland is gemigreerd.



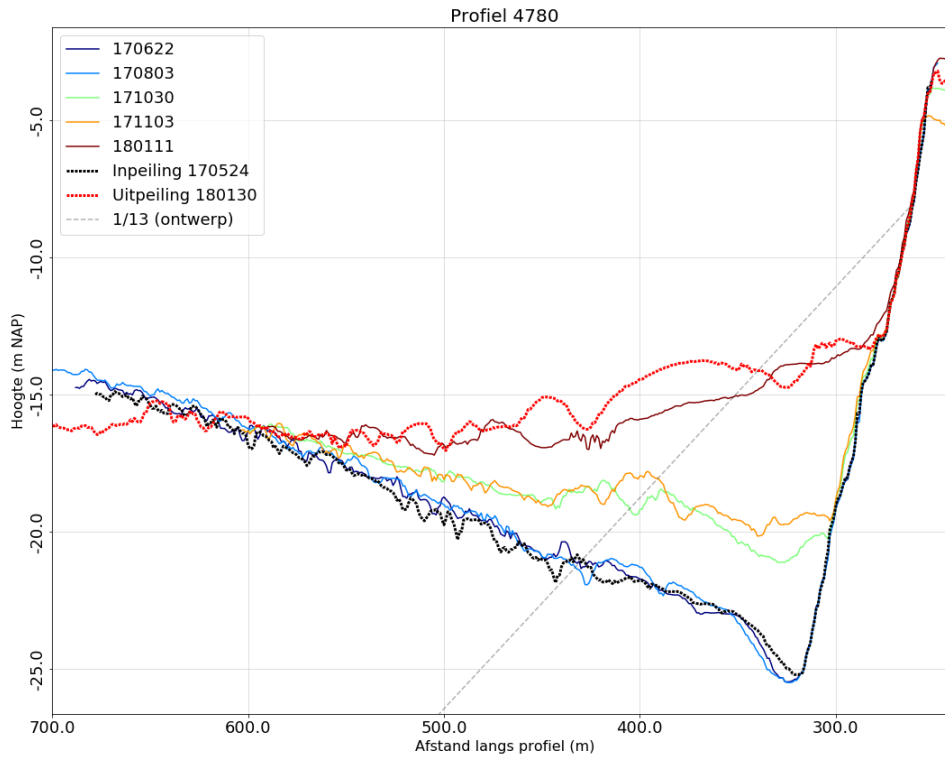
Figuur 6. Profiel bij raai 4660. De suppletie is hier tussen augustus en eind oktober 2017 gerealiseerd. De bodem van de geul is hier tot -19 m opgevuld. Gedurende de aanleg is de onderwateroever net zoals in 4620 ongeveer 10 m opgeschoven richting de kust van Ameland.



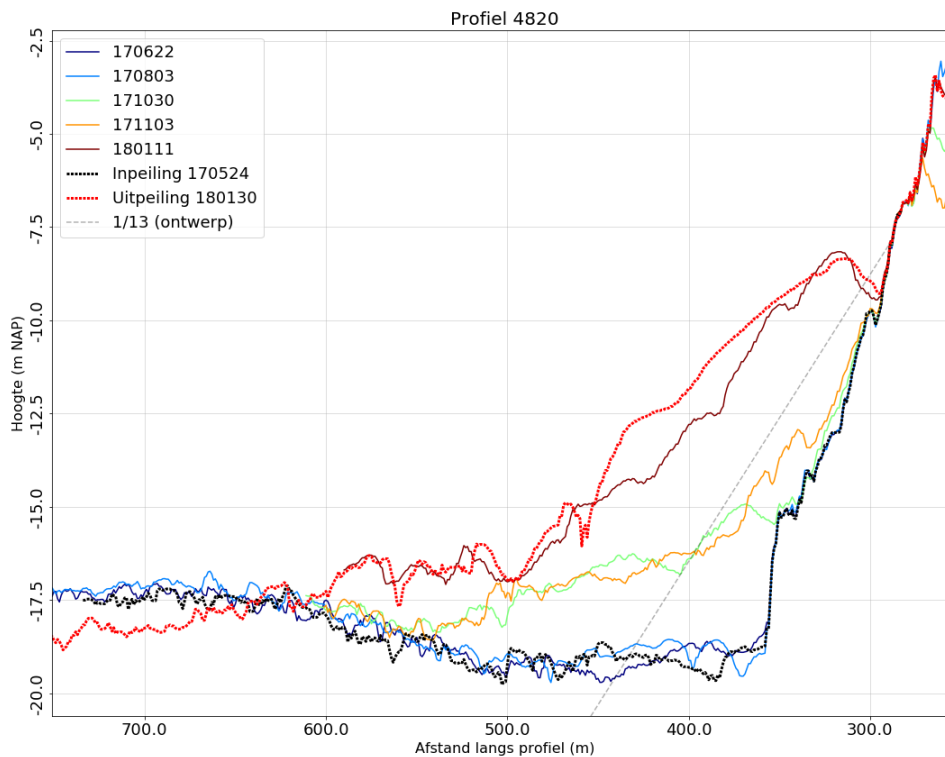
Figuur 7. Profiel bij raai 4700. Vanaf hier is de ontwerphoogte -8 m. Aanleg vond hier voornamelijk plaats vanaf november 2017, alhoewel in de eerste fase van de aanleg tussen 4700 en 4740 ook al gesuppleerd werd, zie Figuur 4A en 4B. In de realisatie van de suppletie ligt het zand vanaf een hoogte van -12 m tegen de geulwand aan onder een hoek van ongeveer 1:40.



Figuur 8. Profiel bij raai 4740. Aanleg vond hier plaats na augustus 2017. Het zand is tot -12 m tegen de geulwand aangelegd onder een hoek van ongeveer 1:35. Een groot deel van de geul werd opgevuld.



Figuur 9. Profiel bij raai 4780. Aanleg vond hier plaats na augustus 2017. Het zand is onder een zeer flauwe helling van <math><1:60</math> tot -13 m tegen de geulwand geplaatst. Op het diepste punt van de geul is deze opgevuld met ruim 10 meter zand.



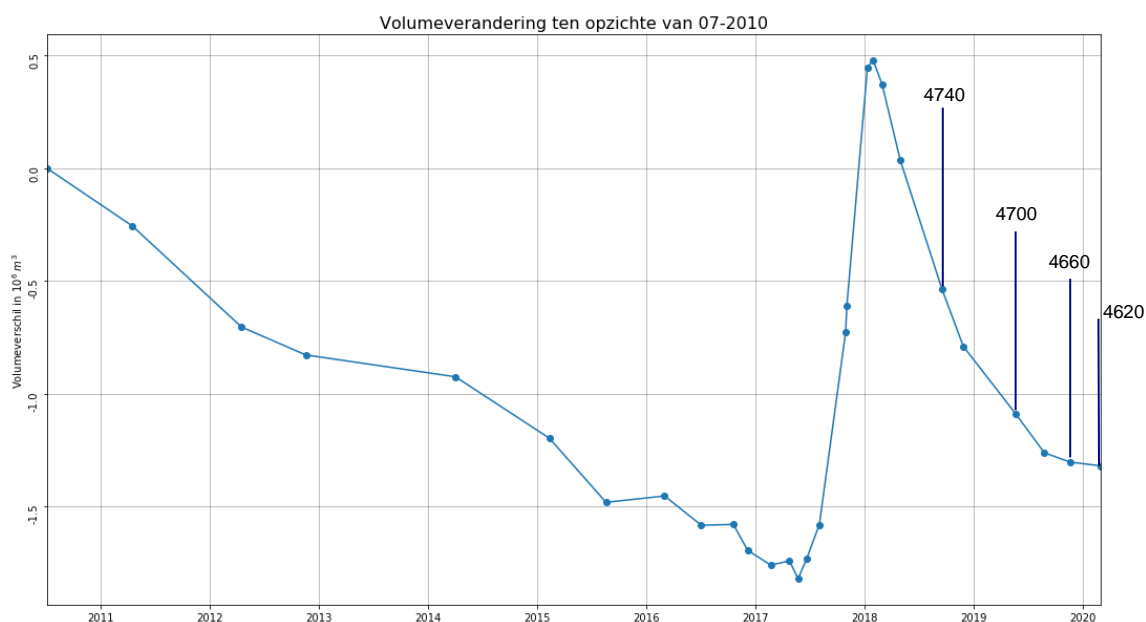
Figuur 10. Profiel bij raai 4820. Zand is hier na augustus 2017 tot ongeveer de ontwerphoogte van -8 m aangelegd onder een helling van ongeveer $1:20$.

4.3 Ontwikkeling binnen het suppletievak

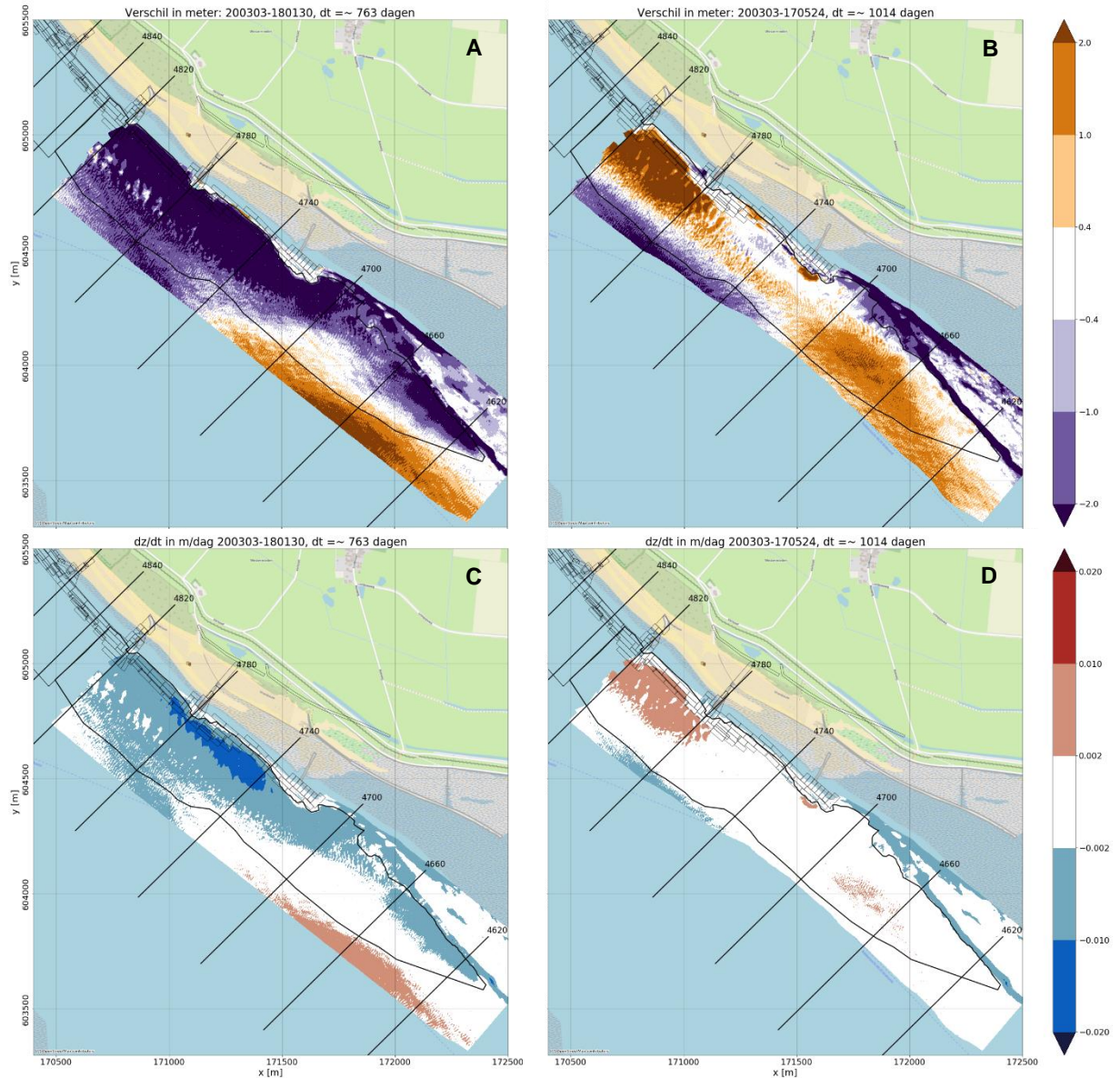
In aanloop naar de geulwandsuppletie verdween er gestaag sediment uit het suppletievak. De volumeverandering ten opzichte van 2010 (Figuur 11) laat zien dat het volume in het suppletievak in de zeven jaar voorafgaand aan de suppletie met een ongeveer 260.000 m³ per jaar afnam. Tijdens de suppletie wordt er een volumetoename van 2.300.000 m³ waargenomen. Dit is een nettoverandering: suppletiezand dat tijdens de aanleg al uit het suppletievak is verdwenen moet hier bij opgeteld worden om tot het werkelijke door de aannemer aangebrachte volume te komen. Er is ongeveer 300.000 m³ verdwenen uit het suppletievak tijdens de aanleg, waardoor het totaal gestorte volume wordt geschat op 2.600.000 m³ (zie hoofdstuk 4.2).

In de periode na aanleg, dus tussen eind januari 2018 en de laatste multibeam meting van begin maart 2020, is ruim driekwart van het netto suppletievolume van 2.300.000 m³ uit het suppletievak verdwenen (Figuur 11). In 2018 verdwijnt meer dan de helft (1.300.000 m³) van het suppletievolume, waarna de snelheid van volumeafname kleiner wordt en er nog ongeveer 500.000 m³ verdwijnt tot maart 2020. De volumeafname vlakt dus af. Totaal is er dus 300.000 (tijdens aanleg) + 1.300.000 (2018) + 500.000 (2019 - 03-2020) = 2.100.000 m³ van het gestorte zand uit het suppletievak verdwenen. Deze verandering is goed zichtbaar in de verschil- en verticale snelheidskaarten (Figuur 12). Het suppletiezand is niet gelijkmatig uit het gebied verdwenen: de sterkste afname vond plaats ten zuiden van raai 4780. Hier is de positie van de geulwand en -bodem op veel plaatsen weer gelijk aan die van voor de suppletie (Figuur 12B, witte gebieden). Tussen raai 4700 en 4620 is er wel zand blijven liggen op de geulbodem, maar is de kustwaartse migratie van de onbestorte geulwand doorgezet met 5 - 10 m per jaar.

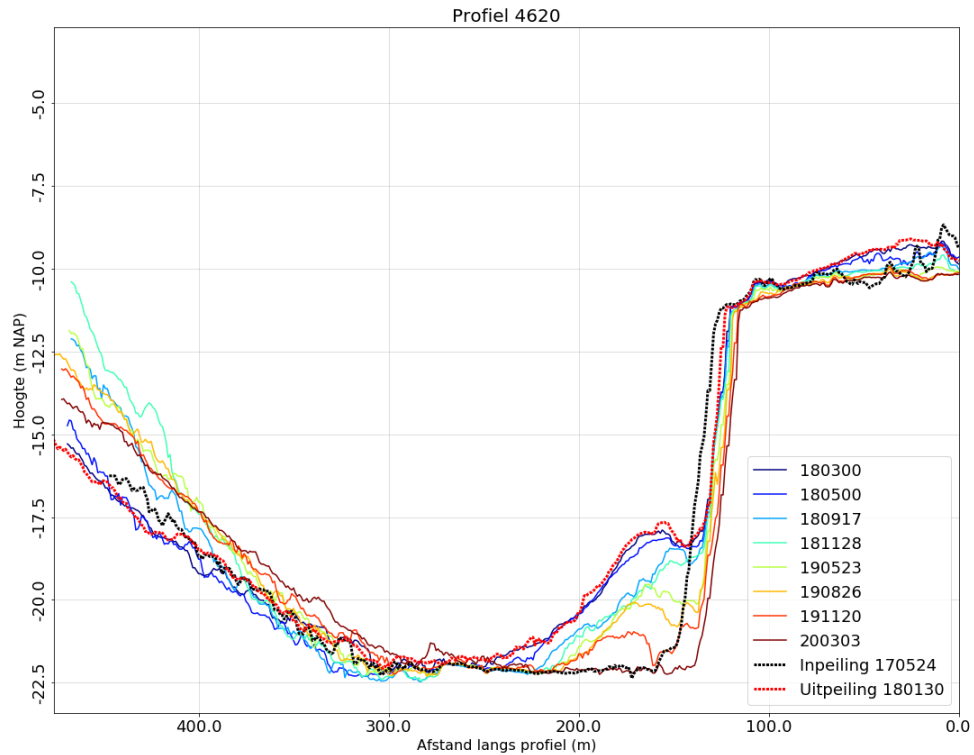
In Jarkusraaien 4620 t/m 4740 is de bedekking van de geulwand na twee jaar volledig verdwenen (Figuur 13, Figuur 14, Figuur 15, Figuur 16). In Figuur 11 is aangegeven vanaf welk moment dit het geval was. Opvallend is dat bij raai 4740 de bedekking van de bestorting na ongeveer zes maanden al volledig verdwenen was. Het grootste deel van het overgebleven zand in het suppletievak bevindt zich ten noorden van raai 4780. Ter hoogte van raai 4780 wordt nog ongeveer twee meter van de bestorting bedekt op het moment van de laatste meting in maart 2020, waar dit oorspronkelijk zo'n 13 meter bedroeg (Figuur 17). Bij raai 4820 is volgens de laatste meting nog 3 meter van de teen van de bestorting bedekt (Figuur 18).



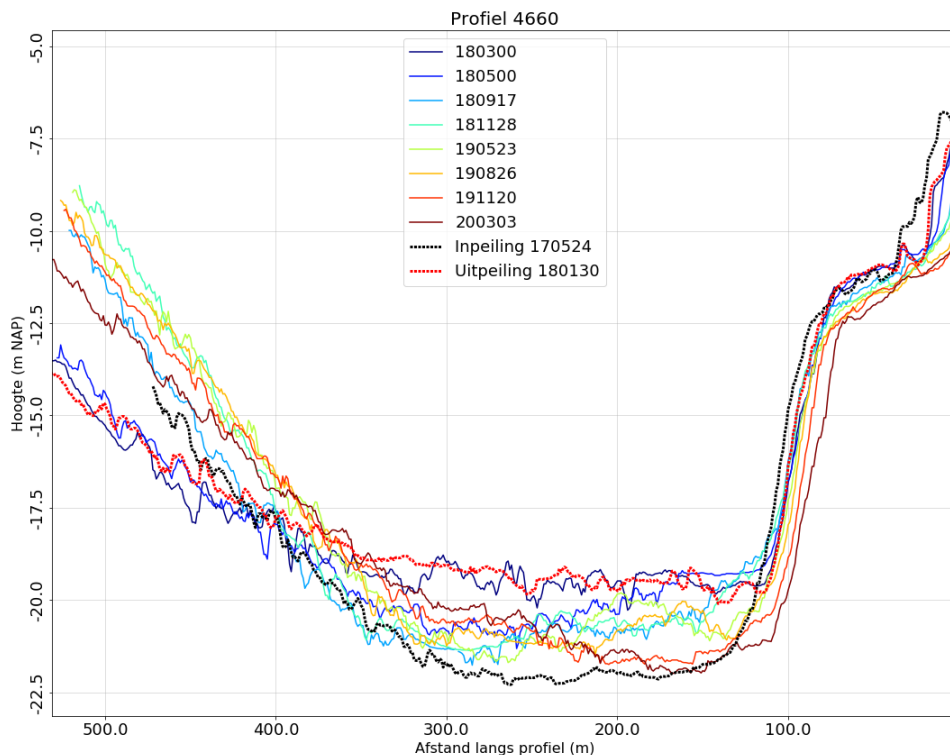
Figuur 11. Volumeverandering in het suppletievak ten opzichte van juli 2010. Voor de aanleg van de geulwandsuppletie nam het volume gestaag af met ongeveer 260.000 m³ per jaar. Voor de vier Jarkusraaien waar de bestorting of natuurlijke geulwand volledig onbedekt is geraakt, is aangegeven vanaf wanneer dit het geval was.



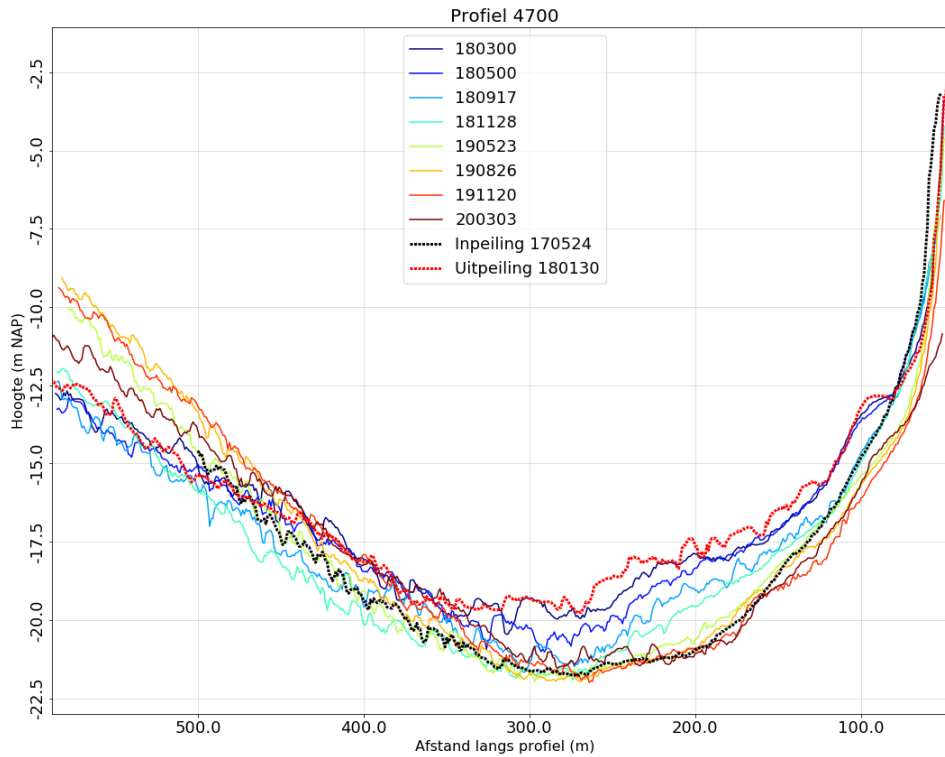
Figuur 12. Verschilkaarten tussen: vlak na de suppletie en maart 2020 (A), Beginsituatie voor de suppletie en maart 2020 (B). Corresponderende kaarten van verticale snelheden in panelen C en D. Paneel B is met name interessant omdat de witte gebieden laten zien waar de situatie weer ongeveer gelijk is aan de beginsituatie. De bestorting is hier dus wederom onbeschermd. Vanaf raai 4780, tussen 4660 en 4700 en in de benedenstroomse luwte van de bestorting tussen 4600 en 4740 is een deel van het gesuppleerde zand blijven liggen.



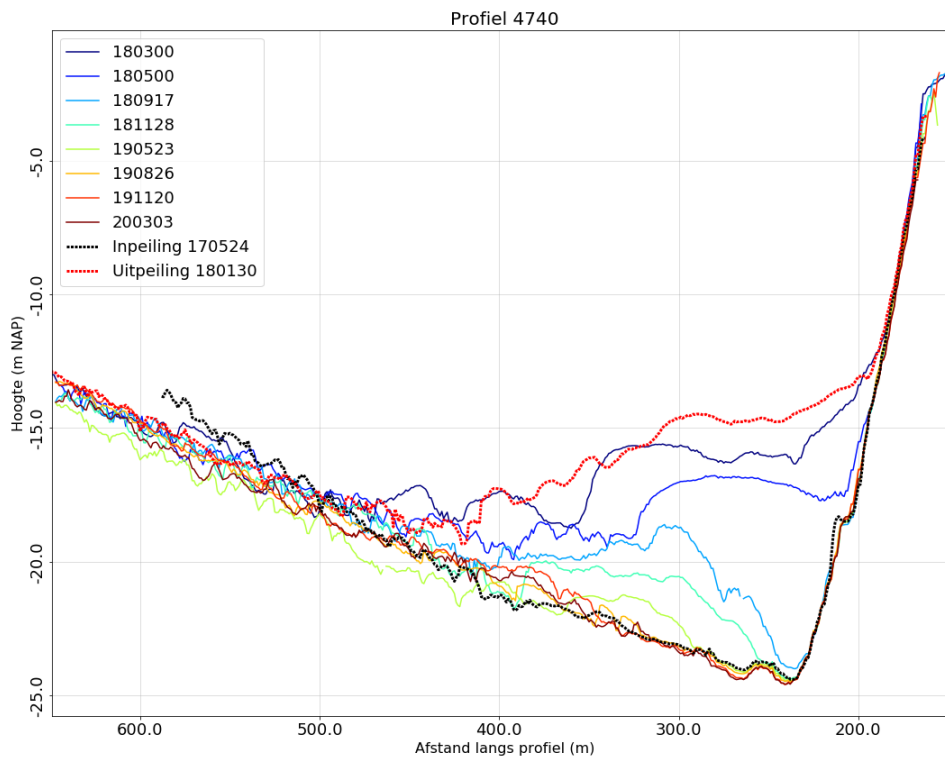
Figuur 13. Ontwikkeling profiel bij raai 4620. Een deel van het originele suppletiezand was hier al tijdens de aanleg verdwenen (Figuur 5, Figuur 4C). Het profiel ziet er sinds eind 2019 nagenoeg hetzelfde uit als voor de suppletie. De onderwateroever is in de twee jaar na aanleg nog eens ongeveer 10 meter landwaarts gemigreerd, vergelijkbaar met de snelheden die door Forzoni et al. (2018) geconstateerd werden.



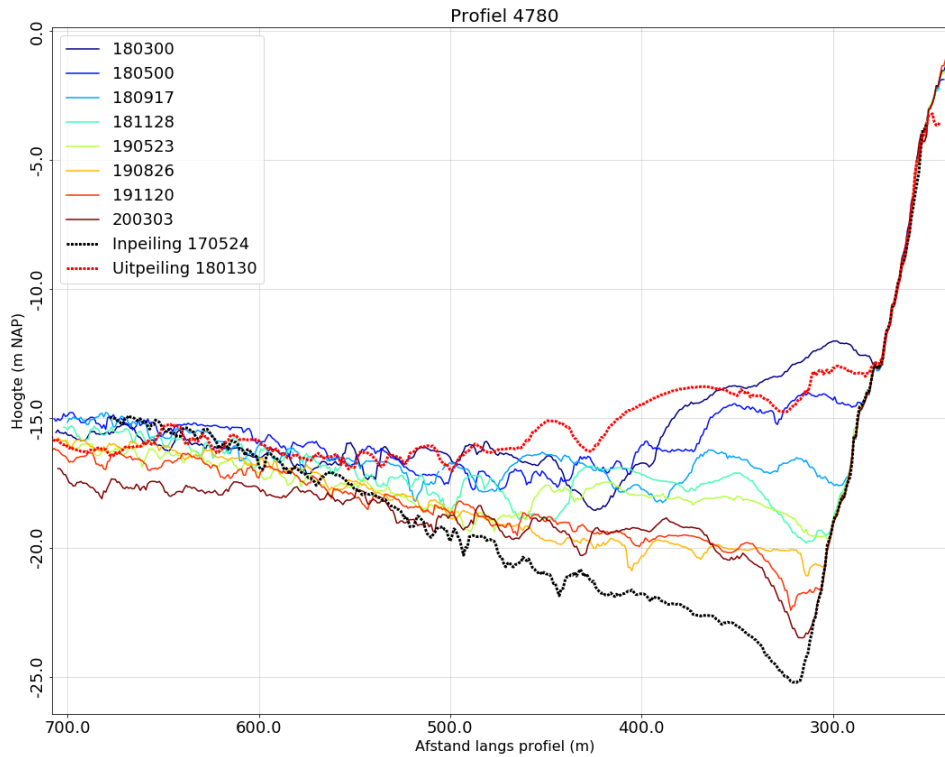
Figuur 14. Ontwikkeling profiel bij raai 4660. Hier werd de geulbodem tot -19 m opgevuld. Een groot deel van dit volume is verdwenen en de oostelijke geulwand (rechts in figuur) heeft z'n oorspronkelijk profiel terug, maar is sinds januari 2018 zo'n 20 m kustwaarts gemigreerd.



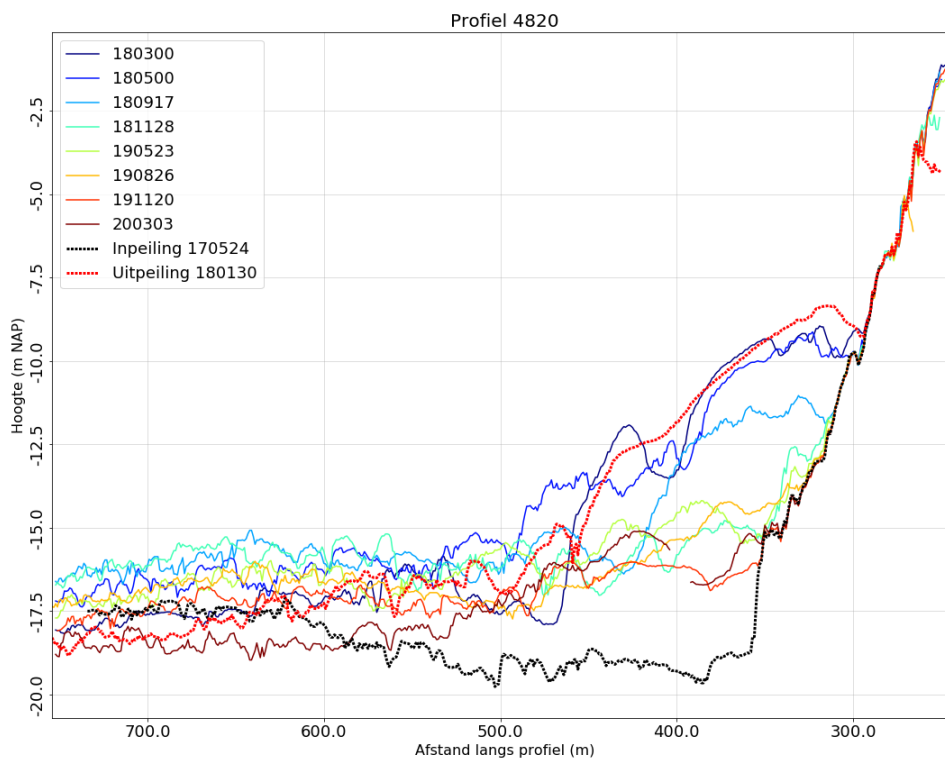
Figuur 15. Ontwikkeling profiel 4700. Sinds medio 2019 is het profiel weer vergelijkbaar met de beginsituatie en is de onderwateroever zo'n 5 m verder kustwaarts geschoven. De bestorting begint 150 m benedenstrooms van dit profiel.



Figuur 16. Ontwikkeling bij profiel 4740. Opvallend hier is dat het profiel van de oostelijke geulwand (rechts in figuur) in september 2018 al terug was bij de beginsituatie en de bestorting die hier ligt volledig onbedekt raakte. Sindsdien is ook het overgebleven zand van de geulbodem verdwenen tussen 250 en 400 m.

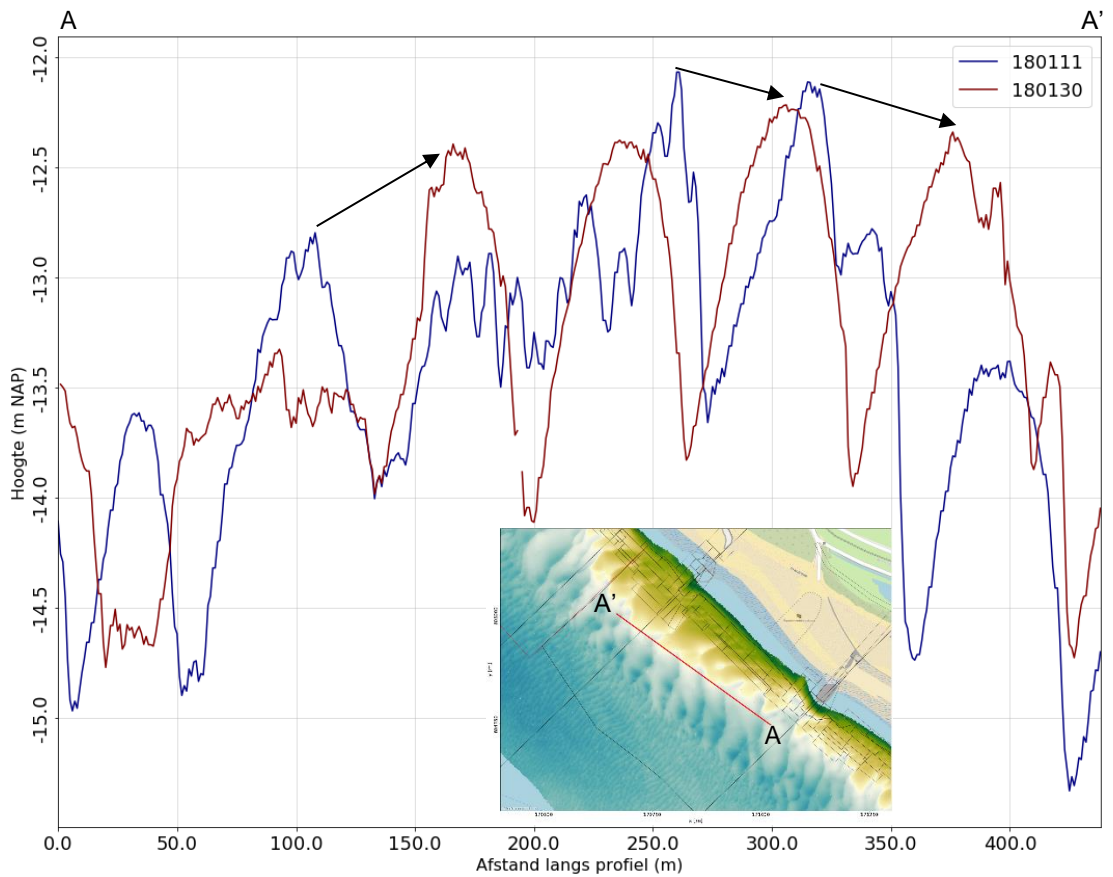


Figuur 17. Ontwikkeling bij profiel 4780. Hier lijkt een deel van het aangebrachte zand nog aanwezig te zijn op de geulbodem, maar is de geulwand tot -23 m terug op het niveau van de inpeiling.



Figuur 18. Ontwikkeling bij profiel 4820. Bij het meest noordelijke profiel in het suppletievak is een aanzienlijk deel van het suppletiezand blijven liggen. De geulwand wordt echter vanaf -15 m bedekt, waardoor een groot deel van de bestorting onbedekt is geraakt. Het extra zand op de geulbodem lijkt sinds medio 2019 redelijk stabiel op z'n plek te blijven.

De duinvormen die geobserveerd werden tegen het einde van de aanlegperiode zijn snel noordwestwaarts migrerende bodemvormen die in de ebstroom zijn ontstaan. Door de snelle verandering van het bodemoppervlak zijn er slechts twee bathymetrieopnames geschikt om een ruwe inschatting te maken van de migratiesnelheid van deze bodemvormen. Het betreft de laatste tussenpeiling van 11 januari 2018 en de uitpeiling van 30 januari 2018. In daarop volgende bathymetrieopname van maart 2018 zijn de duinen al enkele golflengtes gemigreerd en niet met zekerheid aan elkaar te koppelen. Uit het profiel in Figuur 19 volgt een migratiesnelheid van ongeveer 2.6 - 3.7 m/dag, gemeten van duintop tot duintop.



Figuur 19. Profiel door onderwaterduinen tussen raai 4780 en 4820. In de 19 dagen tussen de twee getoonde opnames zijn de duintoppen 50-70 m richting het noordwesten opgeschoven.

5 Morfologische ontwikkeling

5.1 Morfologie en volumes

Uit de morfologische ontwikkeling binnen het suppletievak is gebleken dat er tussen januari 2018 en maart 2020 ruwweg 1.800.000 m³ zand uit het suppletievak is verdwenen. Gezien de snel noordwaarts migrerende bodemvormen en de dominante ebstroom in dit gedeelte van het Borndiep, is het aannemelijk dat een groot deel van het verdwenen volume noordwaarts richting het Akkepollegat en de buitendelta is bewogen. Het in noordelijke richting verplaatsen van het zand wordt ook onderschreven door de resultaten die in dit hoofdstuk worden beschreven.

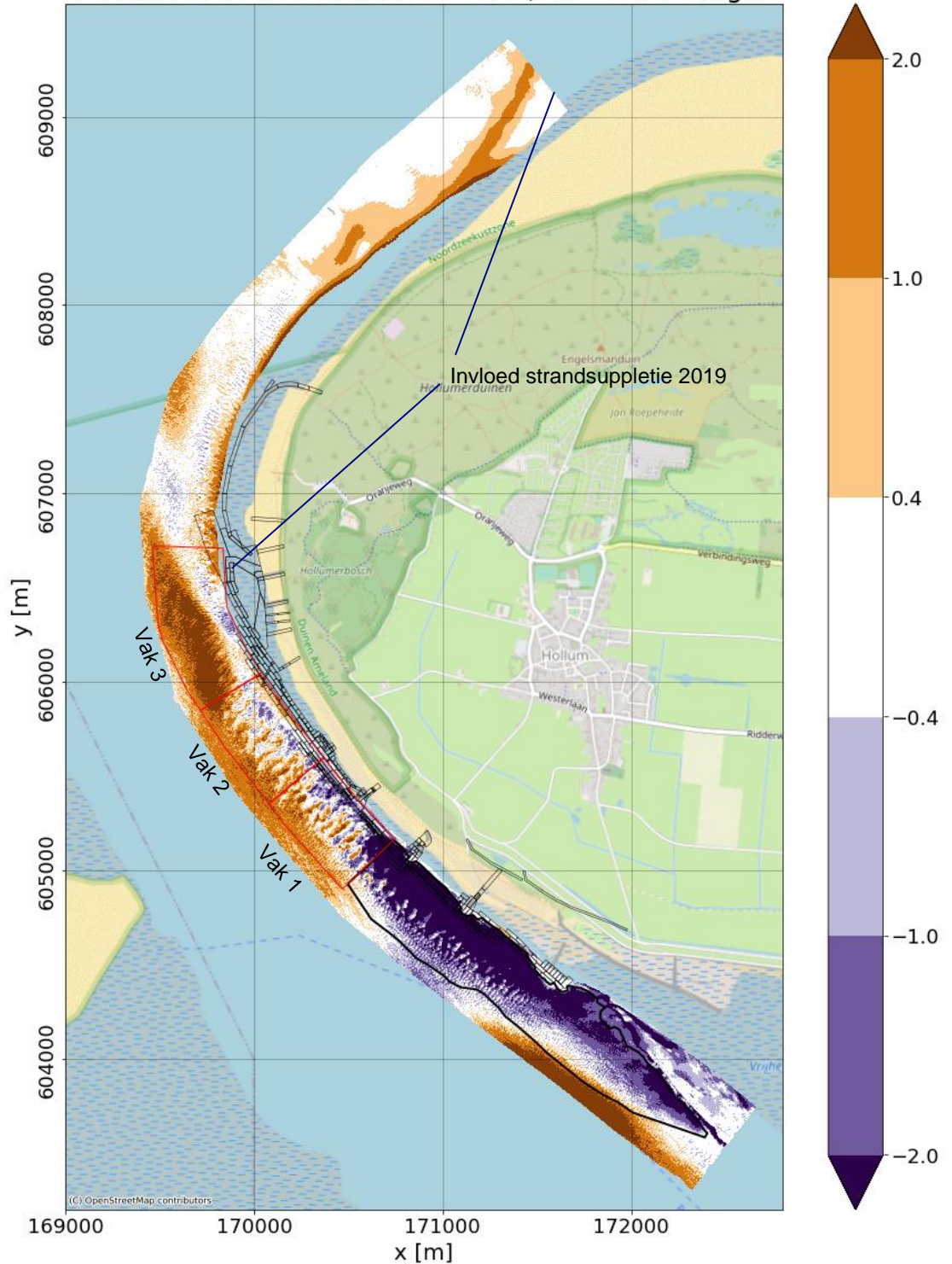
In de kaart die het verschil tussen maart 2018 en november 2019 laat zien (Figuur 20), is het grote contrast zichtbaar tussen enerzijds erosie in het suppletievak en anderzijds depositie in de volumevakken 1 t/m 3. Depositie in vak 1 concentreert zich met name langs de buitenkant van het vak (verder van de kust af), terwijl dicht langs de kust waar de bestorting ligt er juist sprake is van erosie. Het betreft hier erosie van zand dat al tijdens aanleg van de suppletie op de bestorting is komen te liggen en duidt dus niet op het ondergraven worden en afbrokkelen van de bestorting zelf. In vak 2 is dit in mindere mate ook het geval, mede doordat hier minder zand al tijdens de aanleg van de suppletie op de bestorting kwam te liggen. In vak 3 is op veel plekken meer dan 2 m afgezet in deze periode, wat overeenkomt met een volume van ongeveer 450.000 m³. In een vergelijkbare periode vóór aanleg van de suppletie (van februari 2015 tot oktober 2016) zijn erosie- en depositietrends veel minder sterk en balanceert erosie en depositie zich binnen de volumevakken min of meer uit (Figuur 22).

In vergelijking met de beginsituatie van vlak voor aanleg van de geulwandsuppletie (Figuur 21), heeft de grootste volumetoename plaatsgevonden in het noorden van het suppletievak en in volumevak 1. Ook hier geldt dat het grootste deel van dit 'overgebleven' zand op de geulbodem ligt en niet (volledig) de geulwand bedekt, vergelijkbaar met de profielen bij raai 4780 en 4820 (Figuur 17 en Figuur 18). In beide verschilkaarten is het effect van de strandsuppletie die in 2019 ten noorden van raai 120 is aangelegd goed te zien. Een klein deel hiervan draagt bij aan het toenemen van het volume in vak 3.

Ten zuidwesten van het suppletievak ligt een gebied waar met name in de eerste maanden na aanleg van de suppletie (tot eind 2018) tot meer dan een meter wordt zand afgezet. Op basis van de beschikbare data kan niet vastgesteld worden of er een verband is met de geulwandsuppletie. Wel duidelijk is dat het zand niet direct in zuidwestelijke richting uit het suppletievak is getransporteerd. Als een deel van het afgezette materiaal van de geulwandsuppletie afkomstig is, dan is het in eerste instantie in noordwaartse richting getransporteerd en mogelijk in het westelijke deel van het Borndiep met de vloedstroom hier terecht gekomen.

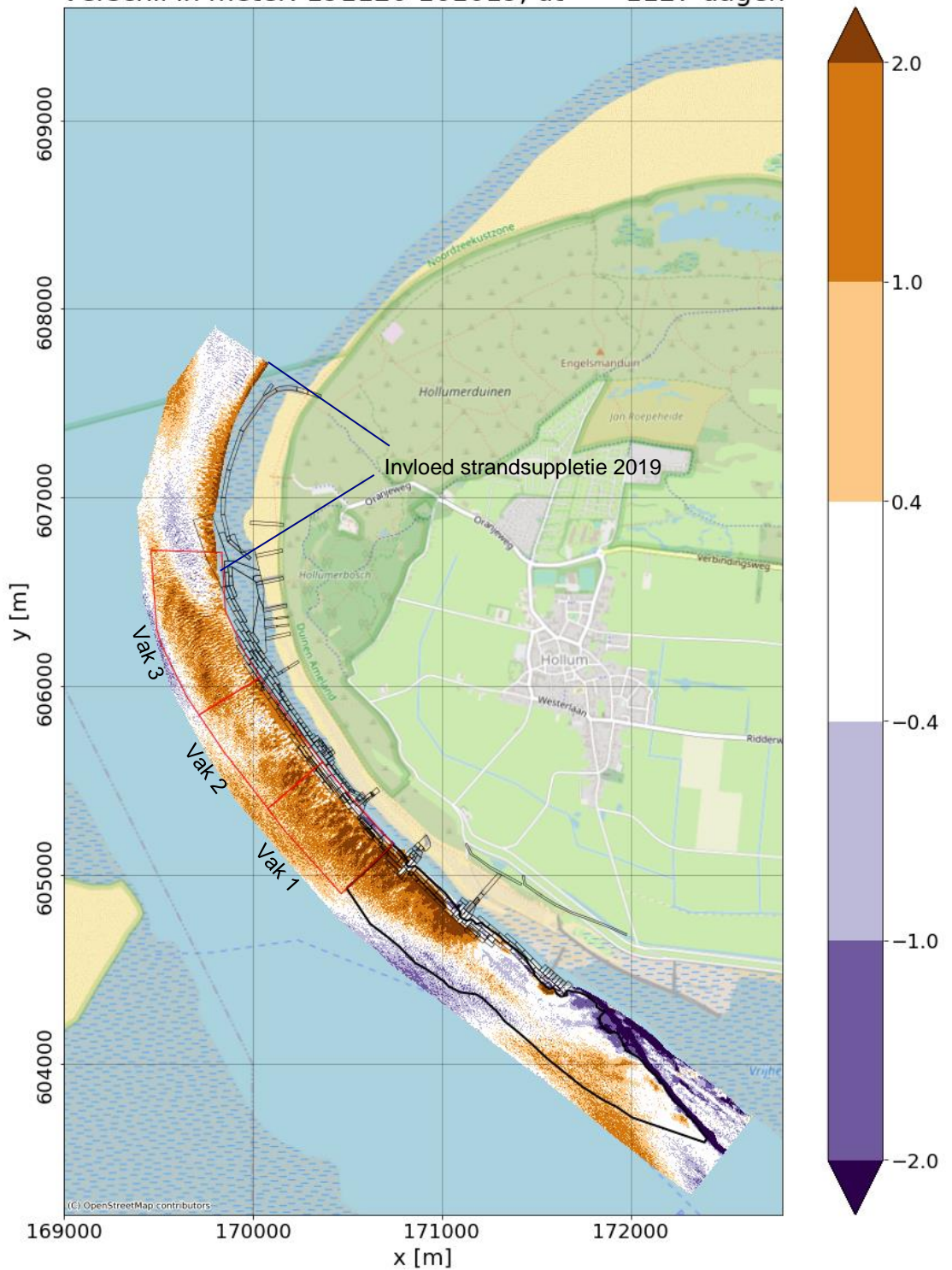
Er is geen directe data beschikbaar van de Vrijheidsplaat en aangrenzende kwelder Feugelpôle. De vrijwel uitsluitend noordwaartse transportrichting vanuit het suppletievak, de grote aanlegdiepte (onder 10 m -NAP) en het feit dat er geen schelpenbanken bekend zijn (zie Vermaas et al., 2019) die bedekt zijn geraakt door het suppletiezand, geven voldoende aanwijzing dat er niet of nauwelijks invloed is geweest op de Feugelpôle.

Vershil in meter: 191120-180301, dt = ~ 629 dagen

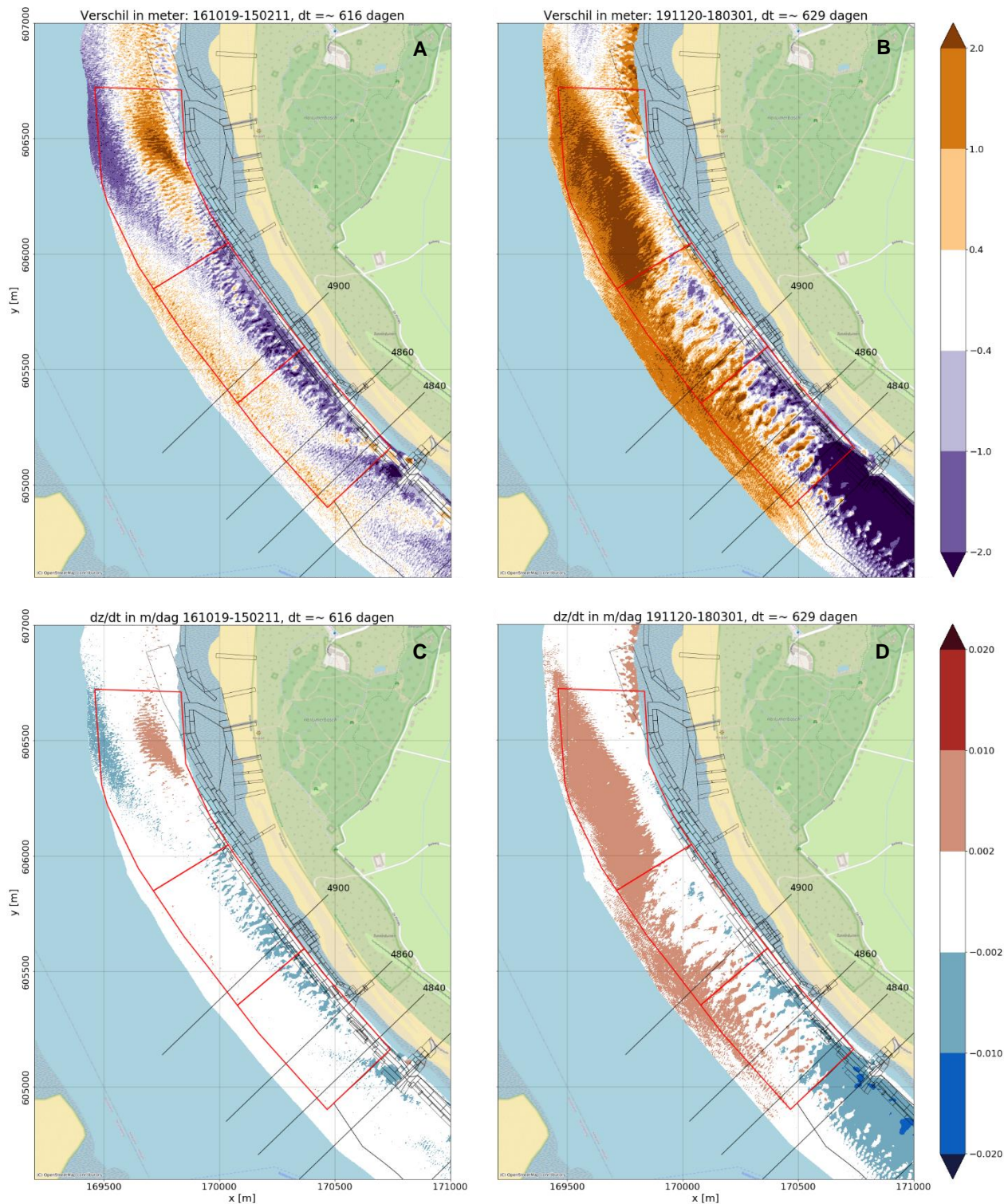


Figuur 20. Verschil tussen vlak na aanleg van de suppletie (maart 2018) en de laatste multibeam bathymetrie die het westen en noordwesten van het eiland dekken (november 2019). Het grote contrast tussen erosie in het suppletievak en depositie in de volumevakken wordt direct duidelijk uit dit figuur. De aanzanding in een smalle strook langs de kust ten noorden van vak 3 werd veroorzaakt door de strandsuppletie die in 2019 is aangelegd.

Verskil in meter: 191120-161019, dt = ~ 1127 dagen



Figuur 21. Verskil tussen de beginsituatie (voor de aanleg, oktober 2016) en de laatste multibeam bathymetrie die het westen en noordwesten van het eiland dekken (november 2019). Hieruit blijkt dat naast het noordelijke deel van het suppletievak er ook met name in vak 1 sediment is bijgekomen ten opzichte van de beginsituatie. Ten noorden van vak 3 is het effect van de strandsuppletie zichtbaar in een smalle strook langs de kust.



Figuur 22. In de linkerkolom (panelen A en C) de bodemverandering en gemiddelde snelheid van bodemverandering tussen februari 2015 en oktober 2016, vóór aanleg van de suppletie. In de rechterkolom (panelen B en D) nagenoeg dezelfde periode (maart 2018 – november 2019) ná aanleg van de suppletie. In de periode voor aanleg van de suppletie middelen erosie en depositie elkaar ongeveer uit, terwijl na de aanleg er duidelijk een voorkeur voor depositie is, vooral in vak 3, waar naar schatting 450.000 m³ is bijgekomen in de periode van maart 2018 tot november 2019..

Het volumeverschil in de drie volumevakken ten opzichte van april 2014 is gegeven in Figuur 23. Het volume verandert nauwelijks (vak 3) of laat een lichte afname zien (vakken 1 en 2) in aanloop naar de aanleg van de geulwandsuppletie.

In vak 1, grenzend aan het suppletievak, wordt gedurende de aanlegperiode een grote volumetoename waargenomen. Dit wordt grotendeels verklaard door zand dat tijdens de aanleg al uit het suppletievak noordwaarts getransporteerd werd. De volumetoename die tijdens de aanleg plaatsvond in vak 1 bedroeg ongeveer 300.000 m³. Dit volume opgeteld bij het netto aangebrachte volume van 2.300.000 m³ leidt tot een totaal door de aannemer gestort volume van 2.600.000 m³ in het suppletievak. Medio 2018 lag er in dit vak 500.000 m³ extra zand ten opzichte van februari 2017. Sinds de tweede helft van 2018 nam het volume in dit vak echter weer af: in november 2019 was ongeveer 150.000 m³ van deze 500.000 m³ uit het gebied verdwenen.

In vak 2 volgde de respons op de geulwandsuppletie later. Hier werd de eerste significante volumetoename tussen maart en mei 2018 waargenomen. De maximale volumetoename ten opzichte van vlak voor de suppletie bedroeg hier zo'n 280.000 m³, aanzienlijk minder dan in het eerste volumevak. Het suggereert dat vak 2 meer als 'doorgeefluik' heeft gefungeerd en niet zozeer een plek waar het passerende zand is afgezet. Momenteel lijkt het volume af te nemen en was in november 2019 ongeveer 50.000 m³ van de oorspronkelijke volumetoename weer uit het gebied verdwenen.

Alhoewel vak 3 het verst van het suppletievak af ligt, is hier een grote volumetoename waargenomen. De eerste significante toename werd waargenomen tussen mei en september 2018, iets later dan in vak 2. In tegenstelling tot het volume in vak 1 en 2 neemt het volume nog steeds toe. Een klein deel van de volumetoename sinds medio 2019 kan echter verklaard worden door de strandsuppletie, waarvan het effect tot net in het noordelijke deel van het volumevak reikt. In november 2019 was er in dit vak 430.000 m³ bijgekomen en lijkt er vooralsnog geen sprake van volumeafname. Mogelijk speelt de opbouw van het ebschild net ten noorden van vak 3 ook een rol in de toename van het volume.

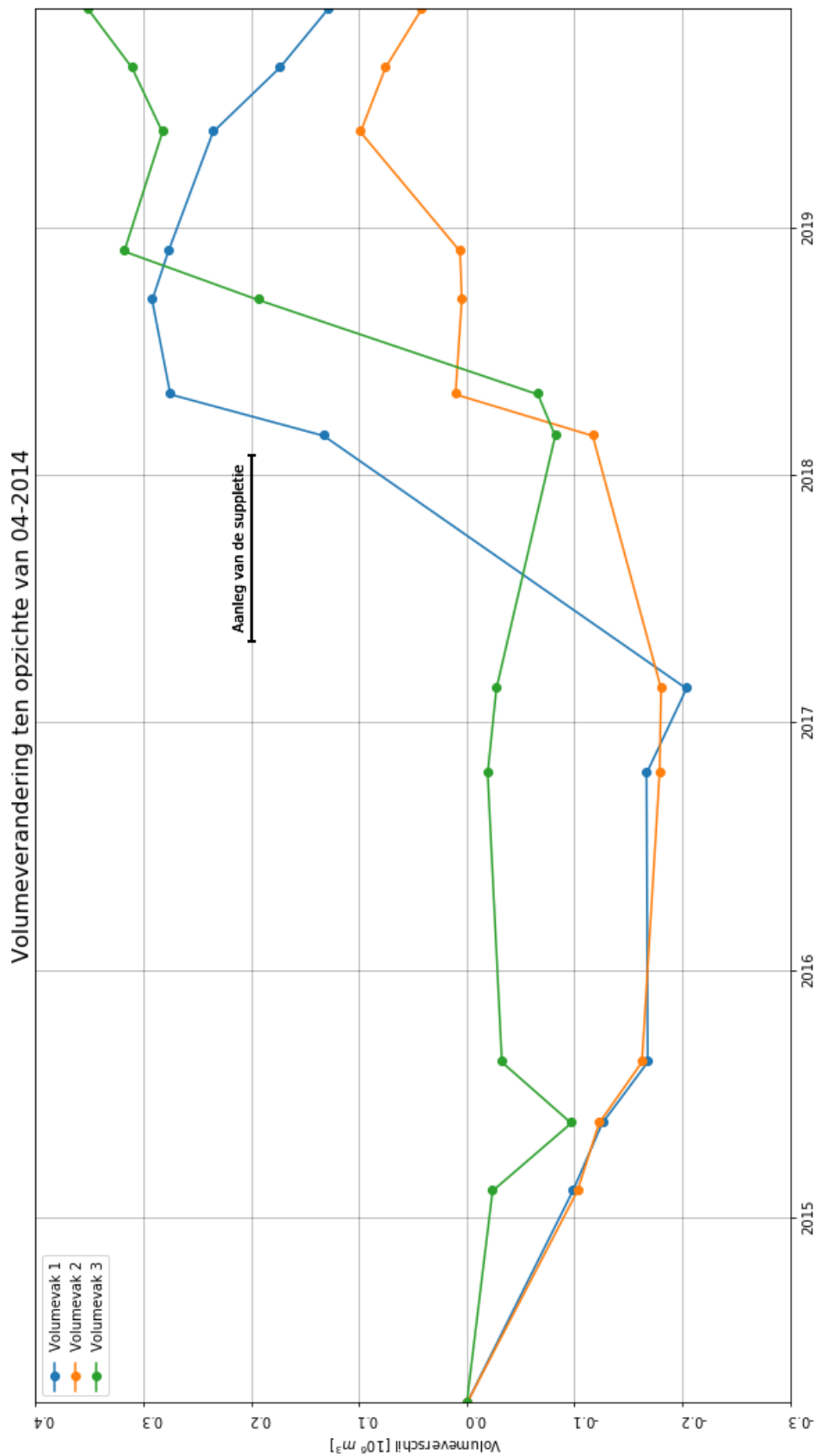
Vlak na aanleg van de suppletie, in mei 2018, lag meer dan 90% van het suppletiemateriaal dat uit het suppletievak verdween in één van de volumevakken (Figuur 24). Dat wil zeggen dat bijna al het materiaal in noordwestelijke richting langs de kust werd getransporteerd en slechts een klein deel al buiten de volumevakken lag. Dit is echter onder de aanname dat de natuurlijke trends van vóór de suppletie (i.e. geen volumeverandering of lichte afname) door hadden gezet indien er geen ingreep had plaatsgevonden.

De maximale gecombineerde volumetoename in de volumevakken bedroeg ongeveer 1.100.000 m³ in de eerste helft van 2019 (net voor aanleg van de strandsuppletie). Op dat moment was er ruim 1.600.000 – 1.800.000 m³ uit het suppletievak verdwenen. Dit betekent dat nog ongeveer 60 - 70% van het suppletiezand dat uit het suppletievak verdween op dat moment in één van de volumevakken lag.

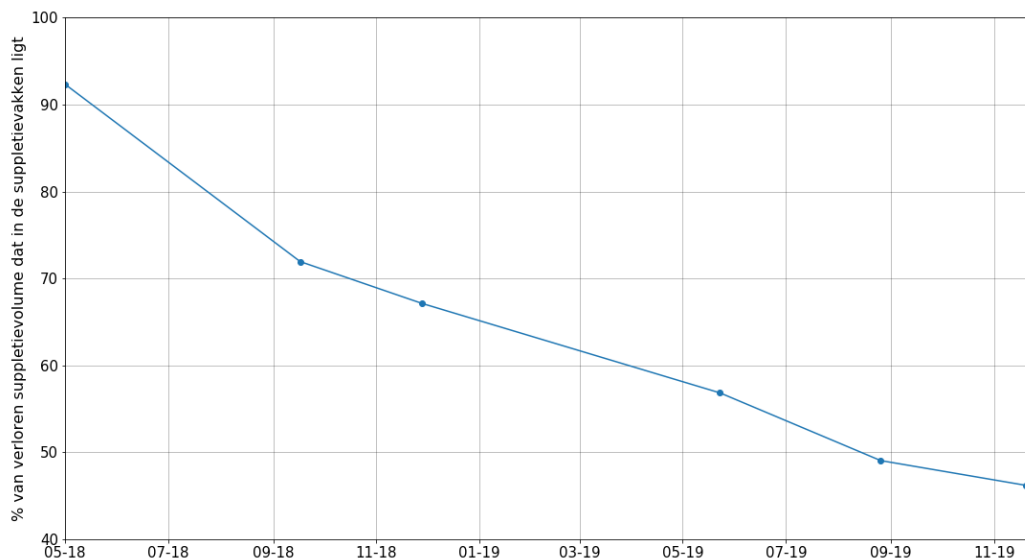
In november 2019 lag er in de volumevakken opgeteld ongeveer 1.000.000 m³ meer dan vlak voor de suppletie, terwijl er op dat moment al bijna 2.100.000 m³ uit het suppletievak verdwenen was. Iets minder dan de helft van het suppletiezand dat uit het suppletievak verdween lag toen in de volumevakken. De andere helft is dan wel verder westwaarts van de kust af, verder richting de buitendelta, verder langs de noordwestkust van Ameland of in het kombergingsgebied afgezet. Een compleet overzicht van de volumebalans van eind 2019 is gegeven in Figuur 25.

Op basis van de in dit rapport getoonde data en analyses is het onwaarschijnlijk dat er een volume van enige betekenis in het kombergingsgebied of langs de noordwestkust van Ameland terecht is gekomen.

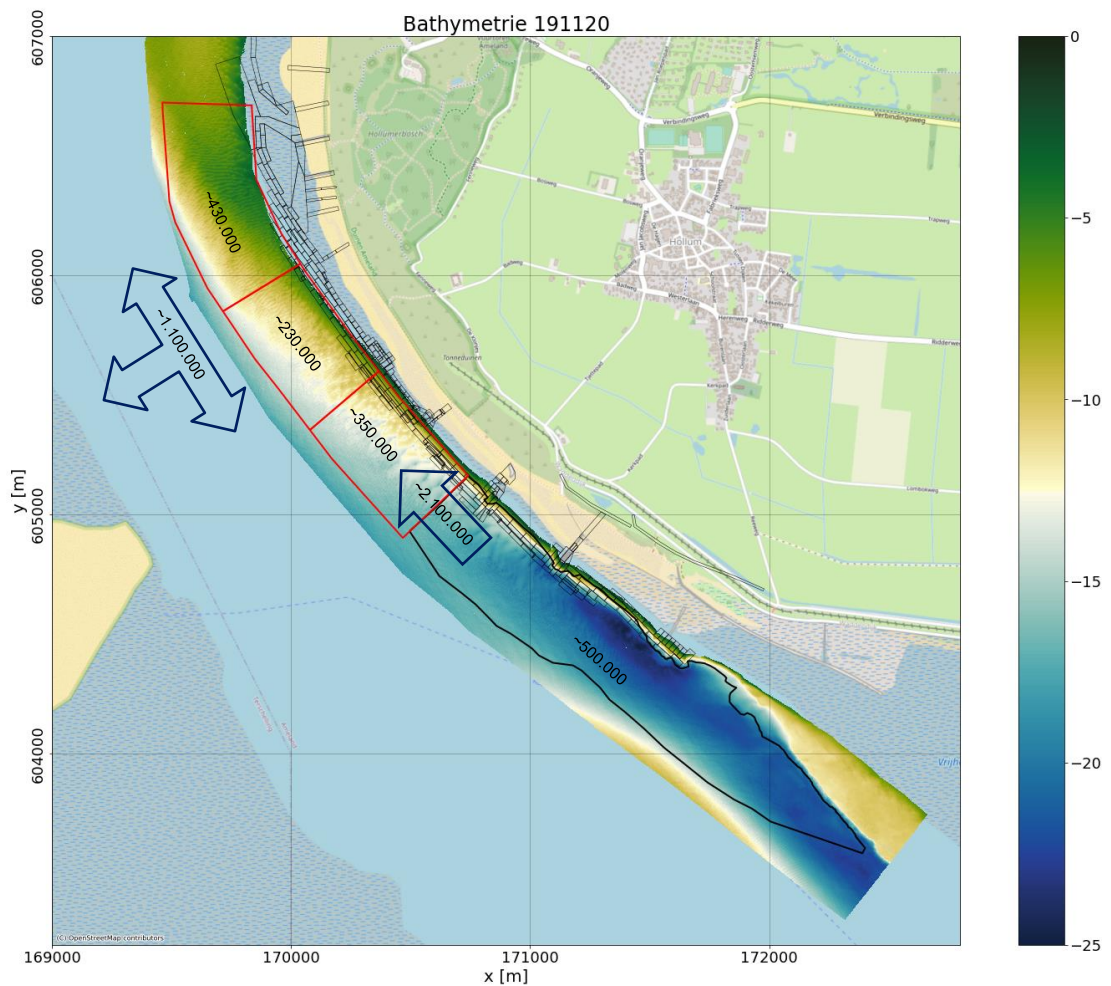
Niet al het zand van de suppletie beweegt door de volumevakken langs de kust richting het noordwesten. Net ten westen buiten volumevakken 1 en 2 is in beide verschilkaarten een gebied te zien waar aanzanding plaatsvindt. Mogelijk is dit materiaal dat direct uit het suppletievak komt. Onbekend is hoe ver dit gebied zich buiten bereik van de bathymetrische data uitstrekt en om welke hoeveelheden het gaat. Deze aanzanding heeft echter ook te maken met de grootschalige morfologische ontwikkelingen, het is niet aan te geven welk deel daardoor wordt veroorzaakt en welk deel door de suppletie.



Figuur 23. Volumeverandering in de volumevakken ten opzichten van april 2014. In de periode voor aanleg van de suppletie blijft het volume ongeveer gelijk (vak 3) of is er een lichte daling (vakken 1 en 2). Vak 1, dat het dichtst bij het suppletievak ligt, laat gedurende de aanleg van de suppletie al een significante volumetoename zien. Vak 2 en 3 volgen iets later. Vanaf medio 2018 begint het volume in vak 1 af te nemen. Volumeafname in vak 2 volgt later in de tweede helft van 2019. Opvallend is dat de volumetoename in vak 3 veel groter is dan in vak 2. Dit volgt ook uit de verschillenkaarten. In vak 3 wordt een groter deel van het passerende sediment afgezet, terwijl in vak 2 het voornamelijk doorgevoerd wordt. Ook lijkt het volume in vak 3 nog steeds toe te nemen.



Figuur 24. Percentage uit het suppletievak verdwenen volume dat op het gegeven moment in de volumevakken lag, onder de aanname dat er geen significante 'natuurlijke' volumeveranderingen plaatsvonden.

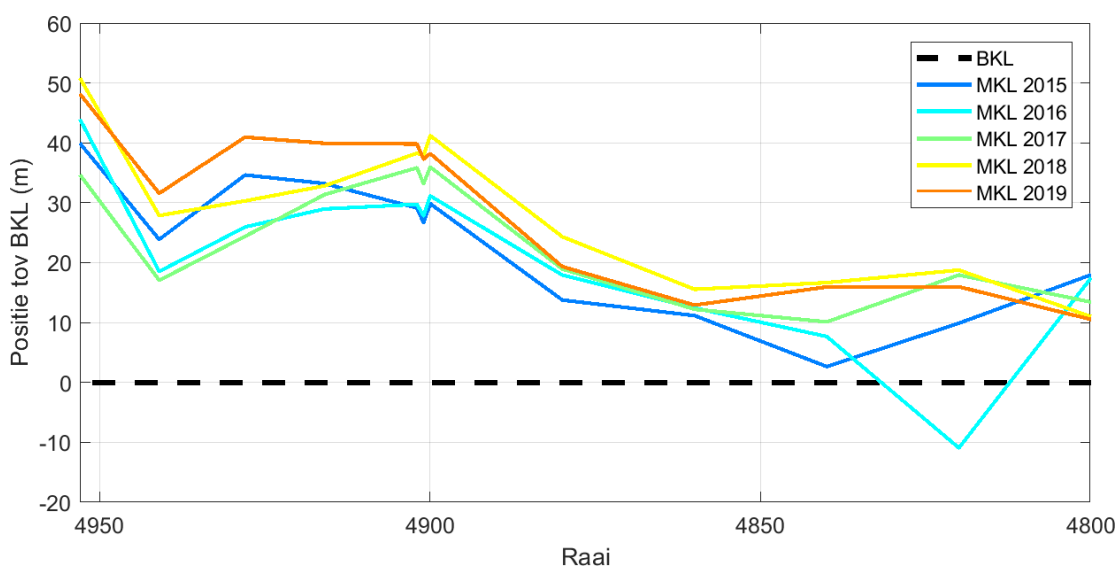


Figuur 25. De laatst bekende volumes en volumefluxes in m³. Samenvattend: 2.1 miljoen kuub verdween uit het suppletievak, waardoor er ongeveer 0.5 miljoen kuub is blijven liggen (met name in het noorden van het gebied, zie hoofdstuk 3.3). In de volumevakken ligt totaal ongeveer 1 miljoen kuub extra materiaal. Dat wil zeggen dat 1.1 miljoen kuub inmiddels elders buiten het suppletievak én de volumevakken ligt.

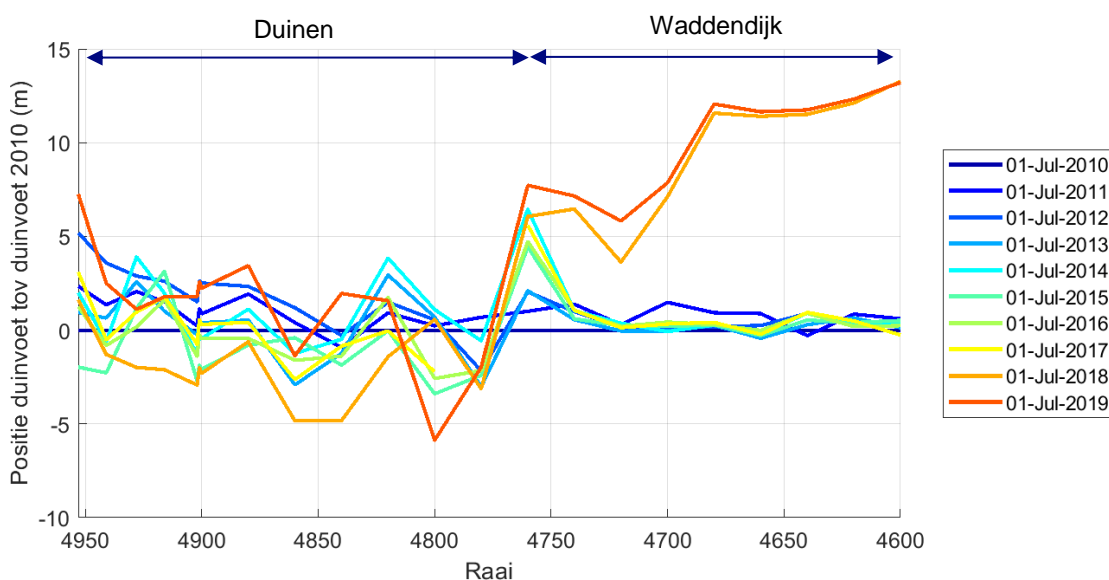
5.2 Momentane kustlijn en duinvoet

De basis kustlijn (BKL) en momentane kustlijn (MKL) zijn gedefinieerd vanaf raai 4800, terwijl de suppletie is aangelegd tussen raai 4700 en 4820. De MKL toont geen eenduidige verplaatsing tussen 2015 en 2019, en laat verplaatsingen zeewaarts en landwaarts zien binnen een bandbreedte van ca. 10 meter (Figuur 26). Er is geen duidelijk effect te zien van de geulwandsuppletie in de posities van 2018 en 2019. In 2019 toonde geen van deze raaien een overschrijding van de BKL.

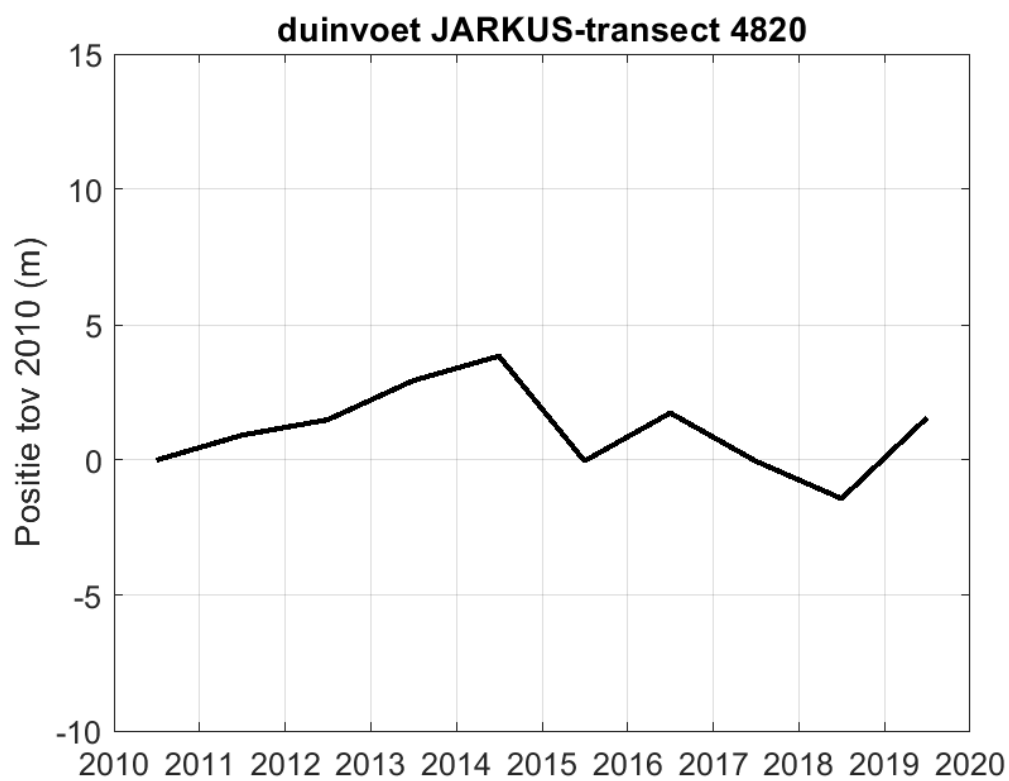
De duinvoet laat voor de raaien ten noorden van 4740 (4760 t/m 4953) schommelingen binnen 10 meter zien (5 m zeewaarts en 5 m landwaarts van de positie in 2010), zie Figuur 27 en Figuur 28. Er is geen duidelijke groei of erosie te zien. De raaien vanaf 4740 naar het zuiden toe laten een plotselinge, sterke zeewaartse verplaatsing van de duinvoet zien van 5 tot bijna 15 meter zien in 2018. In deze raaien zijn geen duinen aanwezig maar ligt de zeedijk, die in 2017 is versterkt, wat de oorzaak is van de verplaatsing van de 'duinvoet'.



Figuur 26 Positie van de MKL in 2015 t/m 2019 in meters t.o.v. de BKL



Figuur 27 Positie van de duinvoet (NAP +3m) in meters t.o.v. de positie in 2010. De sterke zeewaartse verplaatsing in de raaien 4600 t/m 4740 komt door de dijkverzwaring. Er is hier dus niet sprake een natuurlijke duinvoet die is verplaatst.



Figuur 28 Ontwikkeling van de positie van de duinvoet voor raai 4820 tussen 2010 en 2019

6 Conclusies

Hoewel dit een tussentijdse evaluatie betreft, is er op veel vragen al een duidelijk antwoord te formuleren. Dit komt door de snelle ontwikkeling van de suppletie, de hoog-frequente multibeam metingen met hoge resolutie en het in 2017 en 2018 uitgevoerde geofysische (seismiek) en geologische (boringen) veldwerk. Hieronder wordt eerst de hoofdvraag beantwoord, waarna de conclusies van de deelvragen afzonderlijk beschreven worden.

6.1 Hoofdvraag

In relatie tot de hoofdvraag: *“Wat is de morfologische ontwikkeling van de suppletie?”* concluderen we het volgende: het sediment heeft zich zeer snel verspreid langs de kust. Ruim de helft van het suppletievolume lag eind 2019 langs de zuid- en zuidwestkust van Ameland, in het suppletievak en ten noorden daarvan. Iets minder dan de helft van het gesuppleerde volume is hoogstwaarschijnlijk richting de buitendelta verplaatst, het is niet duidelijk waar het precies terecht is gekomen. Met de vermoedelijke verplaatsing in noordelijke richting komt het zand in het kustfundament terecht, waar het bijdraagt aan het hoofddoel van de suppletie: *“het laten meegroeien van het kustfundament”*. Mogelijk transport richting de Waddenzee – geen onderdeel van het kustfundament – draagt mogelijk indirect bij aan het kustfundament, doordat er minder sediment vanaf de buitendelta's richting de Waddenzee gaat.

Wat betreft het secundaire doel, namelijk het beschermen van de bestorte geulwand: er is in december 2018 een advies-memo door Deltares opgesteld (Mastbergen, 2018). Hierin is voor drie mogelijke aanpakken een eerste uitwerking gemaakt: 1. zachte maatregelen (zandsuppleties), 2. harde maatregelen (steenbestorting) en 3. een hybride oplossing. Voor de eerste aanpak is al door Mastbergen aangegeven dat er een significant grotere suppletie nodig zal zijn, en die frequent herhaald zou moeten worden. De zeer hoge erosiesnelheden, en met name het snel verdwijnen van sediment vanaf de bestorte geulwand, geven aan dat de suppletie-frequentie nog hoger zal liggen dan in 2018 kon worden ingeschat. Een volledig zandige oplossing om de kustveiligheid te garanderen lijkt daarom een erg grote inspanning te zullen vergen.

6.2 Deelvragen

Met betrekking tot de deelvragen kunnen de volgende conclusies worden gesteld:

1. Hoe is de suppletie ontworpen en hoe is deze daadwerkelijk uitgevoerd? Hoeveel zand is er uiteindelijk precies waar aangebracht? Waarom is er eventueel een verschil tussen het ontwerp en de uitvoering: was ons ontwerp niet uitvoerbaar?

De suppletie was ontworpen om onder een helling van 1:13 te worden aangelegd tot een hoogte van NAP -8 m en NAP -10 m. In twee profielen was het ontwerp aangegeven, waar ook een plateau te zien was van ca. 100 m. Uitgebreidere informatie was niet beschikbaar, waardoor het niet duidelijk was hoe het ontwerp precies was voor de overige raaien. Doordat het profiel niet uniform is in alle raaien, maakt dit de vergelijking lastig voor de afwijkende profielen.

De suppletie is over het algemeen iets lager en onder een flauwere helling aangelegd. Het totaal volume is wel vergelijkbaar met het ontworpen volume. Dit komt doordat er met een flauwere helling meer sediment nodig is om tot eenzelfde hoogte te komen.

De oorzaak voor het verschil tussen ontwerp en aanleg is niet onderzocht, maar een aantal factoren kunnen een rol spelen:

- De steile helling en grote stroomsnelheden kunnen het lastig hebben gemaakt om dicht bij de kust sediment te plaatsen. Dit is afhankelijk van de diepgang en technische details van het baggerschip;

- Mogelijk is de aanleg onder een helling van 1:13 moeilijk(er) te realiseren door de grote stroomsnelheden en scherp ingesneden geul (met name raaien 4740 en 4780).

Om te onderzoeken of het ontwerp niet uitvoerbaar was is een nadere analyse van de baggermethode en technische details daarvan nodig.

2. Verandert de hydrodynamiek door aanleg van de suppletie?

Het uitvoeren van simulaties met hydrodynamische modellen lag buiten de scope van deze tussentijdse evaluatie. Een korte analyse die ter voorbereiding op de geulwandsuppletie in een workshop is uitgevoerd liet geen significant effect van de suppletie op de stroomsnelheden zien. Details hierover zijn echter niet meer beschikbaar. Ook de morfologische ontwikkelingen wijzen niet op een grote verandering van de hydrodynamiek als gevolg van de suppletie. Zelfs al zou de suppletie effect hebben, is dat van relatief korte duur gezien de snelle verspreiding van het sediment.

3. Hoe en hoe snel heeft het aangebrachte zand zich verspreid? Waar is het aangebracht zand gebleven: heeft het bijgedragen aan de MKL-zone? Heeft de duinvoet zich ontwikkeld? Is het zand de Waddenzee in gegaan?

Sinds de voltooiing van de suppletie eind januari 2018 en de laatste multibeam meting van begin maart 2020 is ruim driekwart van het netto suppletievolume uit het suppletievak verdwenen. Tijdens de aanleg van de suppletie beweegt er 300.000 m³ uit het suppletievak. In 2018 verdwijnt na aanleg meer dan de helft (1.300.000 m³) van het suppletievolume, waarna de snelheid van volumeafname kleiner wordt en er nog ongeveer 500.000 m³ verdwijnt tot maart 2020. In totaal verdween er dus 2.100.000 m³ uit het suppletievak, waarvan ongeveer 1.000.000 m³ nog binnen 400 m van de kust en binnen 2 km ten noordwesten van het suppletievak ligt. Het sediment lijkt grotendeels naar het noorden getransporteerd te zijn en relatief weinig naar de Waddenzee. In de MKL- of duinvoetpositie is geen effect van de geulwandsuppletie waarneembaar tot 2019, het is onwaarschijnlijk dat er sediment van de geulwandsuppletie in deze zone terecht is gekomen.

4. Hoe ontwikkelt de helling van de onderwateroever zich? Is de steile onderwateroever te verklaren; komen hier bijvoorbeeld schelpen- of kleibanken voor?

In de seismische metingen en boringen die in 2017 en 2018 (zie Vermaas et al., 2019) zijn ingewonnen zijn op drie niveau's kleilagen waargenomen: rond NAP -5 m, -12 m en -22 m. De ondiepste twee zijn Holocene kleilagen en hebben duidelijk invloed op de steilheid en ontwikkeling van de onderwateroever. Ze vertragen de landwaartse migratie van de geul, veroorzaken steile hellingen en zorgen voor een plateau. De diepste kleilaag bestaat uit zeer compacte, stugge klei uit het Elsterien (potklei) en verhindert (vooralsnog) het dieper insnijden van het Borndiep. De suppletie lijkt geen invloed te hebben gehad op deze ontwikkeling: de landwaartse migratiesnelheid van de gehele geulwand is onveranderd gebleven.

5. Wat was het effect van de suppletie op de Feugelpôle? Leidt de verharding van deze geulwand tot verstoring van de geulwand-plaat interactie en daarmee tot verstoring van de aanvoer van zand/schelpen naar de plaat en de Feugelpôle?

De suppletie heeft zich vooral in noordelijke richting verplaatst en is op relatief grote diepte aangelegd. Er lijkt niet direct reden om (sterke) invloed van deze suppletie op de naastliggende plaat/kwelder de Feugelpôle te verwachten. Het is niet helemaal duidelijk waar de schelpen op de Feugelpôle precies vandaan komen, maar er zijn geen schelpenbanken aangetroffen in de boringen, die eventueel bedekt zouden zijn geraakt met suppletiezand. Een verstoring van de geulwand-plaat interactie is niet waarschijnlijk.

7 Referenties

- K.F. Cheung, Gerritsen, F. & Cleveringa, J., 2007. Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, the Netherlands. *Journal of Coastal Research*, 23(1), pp. 106-118.
- Cleveringa, J., Israel, C. G., & Dunsbergen, D. W. (2005). De westkust van Ameland: Resultaten van 10 jaar morfologisch onderzoek in het kader van de Rijkswaterstaat programma's KUST2000 en KUST2005.
- Elias, E. P., Van der Spek, A. J., Pearson, S. G., & Cleveringa, J. (2019). Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology*, 415, 105956.
- Forzoni, A., Hijma, M.P., Vermaas, T., 2018. Geologie en morfodynamiek getijdengeulen Casus Borndiep, Zuidwest Ameland, Deltares report 11202190-001-ZKS-0002, Utrecht, The Netherlands, 26 pp.
- C.G. Israël, en D.W. Dunsbergen, 1999. Cyclic morphological development of the Ameland Inlet, proceedings of the I.A.H.R Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Genova, Italy, p. 705-714.
- Mastbergen, D. 2018. Advies onderhoud kustverdediging Ameland ZW, Deltares, memo 21 december 2018.
- Ridderinkhof, W., Hoekstra, P., Van der Vegt, M., & De Swart, H. E. (2016). Cyclic behavior of sandy shoals on the ebb-tidal deltas of the Wadden Sea. *Continental Shelf Research*, 115, 14-26.
- Vermaas, T., Mastbergen, D., Schrijvershof, R., Mesdag, C., Gaida, T., (2019). Geologie, bestorting en strandvallen bij Ameland zuidwest, eindrapportage 2019. Deltares, Rapport 11203683-002

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