

Stijging Baggerhoeveelheden Vaargeul Boontjes

Data analyse op basis van morfologische ontwikkeling en baggerwerkzaamheden



Stijging Baggerhoeveelheden Vaargeul Boontjes

Data analyse op basis van morfologische ontwikkeling en baggerwerkzaamheden

Luchtfoto voorzijde is afkomstig uit de beeldbank van Rijkswaterstaat en toont de sluis bij Kornwerderzand met op de achtergrond de vaargeul Boontjes.

Stijging Baggerhoeveelheden Vaargeul Boontjes

Data analyse op basis van morfologische ontwikkeling en baggerwerkzaamheden






Opdrachtgever	Rijkswaterstaat – Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	J. de Vries, E. Lofvers
Referenties	KPP code HV09 2021
Trefwoorden	Baggeren, vaargeul Boontjes, morfologie

Documentgegevens

Versie	0.1
Datum	22-12-2021
Projectnummer	11206799-007
Document ID	11206799-007-ZKS-0001
Pagina's	93
Classificatie	
Status	Definitief

Auteur(s)

Ana Colina Alonso		
Bob Smits		
Julia Vroom		

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Ana Colina Alonso 	Zheng-Bing Wang 	Philip Visman	
	Bob Smits 			
	Julia Vroom 			

Samenvatting

Sinds de drempelverwijdering in 2012-2013 kampt de vaargeul Boontjes met een toename in baggervolumes voor het onderhoud van de vaargeul tot ca. 300.000 m³ per jaar. Deze baggervolumes zijn een orde groter dan de prognose uit 2012 (20.000 m³ per jaar). Dit rapport heeft als doelen om de morfologische ontwikkelingen in en nabij de vaargeul Boontjes in beeld te brengen, het inzicht in de aandrijvende processen van de baggervolumes te vergroten en een verklaring te geven voor de grotere baggervolumes dan geprognosticeerd.

De morfologische ontwikkeling van het gebied rondom de vaargeul Boontjes is, evenals de ontwikkeling van de omliggende gebieden in de bekkens van het Marsdiep en het Vlie, gestuurd door veranderingen in de hydrodynamica en menselijke ingrepen. De grootschalige ontwikkeling van beide kombergingsgebieden is nog altijd sterk gestuurd door de afsluiting van de Zuiderzee. Deze afsluiting leidde ook tot een sterke verandering van het getij in de Westelijke Waddenzee: een toename van het getijprisma door de zeegaten Marsdiep en Vlie en een sterke reductie van de getijstroming door de geulen die de Waddenzeebekkens Marsdiep en Vlie met de Zuiderzee verbonden. Het hydrodynamische wantij (de plaats met minimale stroomsnelheden) tussen de bekkens van het Marsdiep en Vlie verschoof naar het oosten. Er vindt echter veel uitwisseling tussen de bekkens van het Marsdiep en het Vlie plaats en de positie van het morfologische wantij is lastig vast te stellen. De respons van de bekkens op de afsluiting van de Zuiderzee wordt dus gekenmerkt door een sterke sedimentimport, waarbij slib een relatief groot aandeel heeft in de opvulling van de bekkens langs de Friesche vastelandskust en in geulen die door de afsluiting hun functie verloren (Balgzand, Vlieter en rondom de Javaruggen). Daarnaast spelen zeespiegelstijging (1,2-1,4 mm/jaar) en bodemdaling (0,5-0,6 mm/jaar) een beperkte rol in de grootschalige morfologische ontwikkeling.

Op meso-schaal (rondom de vaargeul Boontjes) waren de belangrijkste morfologische ontwikkelingen in het decennium vóór de drempelverwijdering sedimentatie in het noordelijke gebied rond de vaargeul (uitbreiding van de westelijke platen en ophoging van het intergetijdengebied ten oosten ervan, in lijn met de grootschalige ontwikkeling) en erosie van het zuidelijke gebied (toename van geulomvang). De overgang van deze ontwikkeling in de Boontjes, met in het noorden afname van de geul en in het zuiden toename van de geul, lijkt geleidelijk naar het zuiden op te schuiven.

De grootschalige sedimentsamenstelling van de bodem van de westelijke Waddenzee is in grote lijnen relatief stabiel gebleven, zoals blijkt uit een lange termijnanalyse. Door het beperkte aantal metingen in de tijd en de verschillende locaties van de metingen is het niet goed mogelijk om een trend te kwantificeren. Het gemeten bodemsediment in en rondom de Boontjes was in de geanalyseerde gegevens (Sedimentatlas Waddenzee, 1995; meetcampagnes SIBES & Waddenmozaïek, 2017) voornamelijk zandig, behalve het plaatgebied ten oosten van de geul, waar slibgehalten oplopen tot meer dan 50%. Het Molenrak en het plaatgebied ten westen van de vaargeul Boontjes lijken iets slibrijker te zijn geworden. In het gebied rondom de zuidelijke Boontjes zijn er geen opvallende verschillen waargenomen.

Analyse van de geregistreerde baggerwerkzaamheden in de Reizen-database toont een sterke fluctuatie in de gebaggerde volumes van ca. 170.000 m³ per jaar in 2015 en 2016, 94.000 m³ in 2017, een toename naar 364.000 m³ in 2019 (toename met een factor 3.9) en een afname naar 222.000 m³ in 2020. Deze gerealiseerde waardes liggen allemaal ver boven de prognose uit 2012 (20.000 m³ per jaar). Dit verschil kan gedeeltelijk worden verklaard uit een veranderde samenstelling van het gebaggerde materiaal op basis van de gemeten soortelijke dichtheden.

Deze gemeten dichtheden laten zien dat het gebaggerde materiaal een veranderde samenstelling heeft ten opzichte van het zandige materiaal dat er in het verleden werd gebaggerd en nog steeds wordt aangenomen in de gehanteerde omrekenfactor naar tonnen droge stof (tds). Volgens de baggeraar (Gebroeders Van der Lee) is het *bodemsediment* slibrijker geworden. Dit kon nog niet worden bevestigd vanuit de data-analyse, vanwege het beperkte aantal in-situ metingen. Doordat er steeds slibrijker materiaal wordt gebaggerd nemen de volumes zeer sterk toe, maar de gebaggerde massa minder sterk. De dichtheid is niet voor alle baggerwerkzaamheden gemeten, waardoor de gebaggerde massa enkel geschat kan worden. Uit die schatting blijkt dat er wel degelijk ook een toename waarneembaar is in de gebaggerde massa's (van 100.000 tds in 2017 naar ongeveer 170.000-270.000 tds in 2019 (toename met een factor 1.7-2.7)).

Recente dieptepeilingen tonen dat met name (en veel meer dan verwacht) sedimentatie plaatsvindt in de noordelijke Boontjes, rond het drempelgebied waar het meeste aanlegbaggerwerk heeft plaatsgevonden. In het voorjaar en in de zomermaanden vormt zich een fluid mud laag van 20- 50 cm dik in de noordelijke Boontjes.

Aan de hand van de dieptepeilingen en de registreerde baggerwerkzaamheden is er een sedimentbalans opgesteld om inzicht in de volumeveranderingen van de vaargeul te vergroten en onderscheid te maken tussen sedimentatie (en erosie) aan de ene kant en baggervolumes aan de andere kant. Als mogelijk sturende processen zijn stromingspatronen, wind en golfwerking, zoetwaterafvoer en gravitatiecirculatie en de vorming van fluid mud geïdentificeerd. De invloed van complexe stromingspatronen wordt in 2022 met een numerieke modelstudie onderzocht. De resultaten van de sedimentbalans zijn vergeleken met de lokale windcondities (als maat voor golfwerking) en zoetwaterafvoer vanuit de spuisluis bij Kornwerderzand. Uit de analyse van windcondities komt naar voren dat sommige stormen, met name stormen afkomstig uit het zuidwesten of zuidzuidwesten, direct in verband lijken te staan met sedimentatie in de geul en vervolgens een groot baggervolume. Stormen uit windrichtingen meer vanuit het oosten hebben relatief weinig effect op de vaargeul Boontjes vanwege de geografische ligging van de vaargeul nabij de vastelandskust. De lagere zoetwaterafvoer vanuit de spuisluis bij Kornwerderzand kan in droge zomers zorgen voor een tijdelijke afname van de stroomsnelheden in de vaargeul Boontjes, waardoor mogelijk sedimentatie plaatsvindt in de geul. De invloed van het spuidebiet bij Kornwerderzand op gravitatiecirculatie in de vaargeul Boontjes (aangedreven door de saliniteitsgradiënt) wordt in 2022 nader onderzocht aan de hand van een modelstudie. In zomerperiodes vormt bovendien een fluid mud laag in de vaargeul Boontjes, wat een belangrijk effect kan hebben gehad op de grote baggervolumes in september 2019 en september 2020. Het is niet duidelijk of dit fenomeen ook voor de drempelverwijdering al een rol speelde.

In een samenvatting van de systeemwerking van de vaargeul Boontjes en aandrijvende processen achter het vaargeulonderhoud zijn de inzichten uit bovenstaande analyses samengebracht. De grootschalige sedimentatie aan de landwaartse zijde van de bekkens leidt tot verkleining van het kombergingsvolume van de geul Boontjes en leidt tot toenemende sedimentatie in de vaargeul. Daarmee lijkt deze langjarige, grootschalige sedimentatie de belangrijkste oorzaak te zijn voor de toename in baggervolumes. De drempelverwijdering is niet de primaire oorzaak, maar heeft de toename waarschijnlijk wel versterkt. Daarnaast wordt er steeds slibrijker materiaal gebaggerd, waardoor de gebaggerde *volumes* veel sterker toenemen dan de gebaggerde *massa*. In 2022 wordt middels een numerieke modelstudie de invloed van stromingspatronen en gravitatiecirculatie nader onderzocht en worden mogelijke beheerstrategieën uitgewerkt. Onze huidige verwachting is dat de sedimentatie in de vaargeul Boontjes de komende jaren niet zal afnemen. Mogelijk zullen de benodigde baggervolumes voor vaargeulonderhoud bij ongewijzigd beheer zelfs verder toenemen als gevolg van de grootschalige morfologische ontwikkeling.

Inhoudsopgave

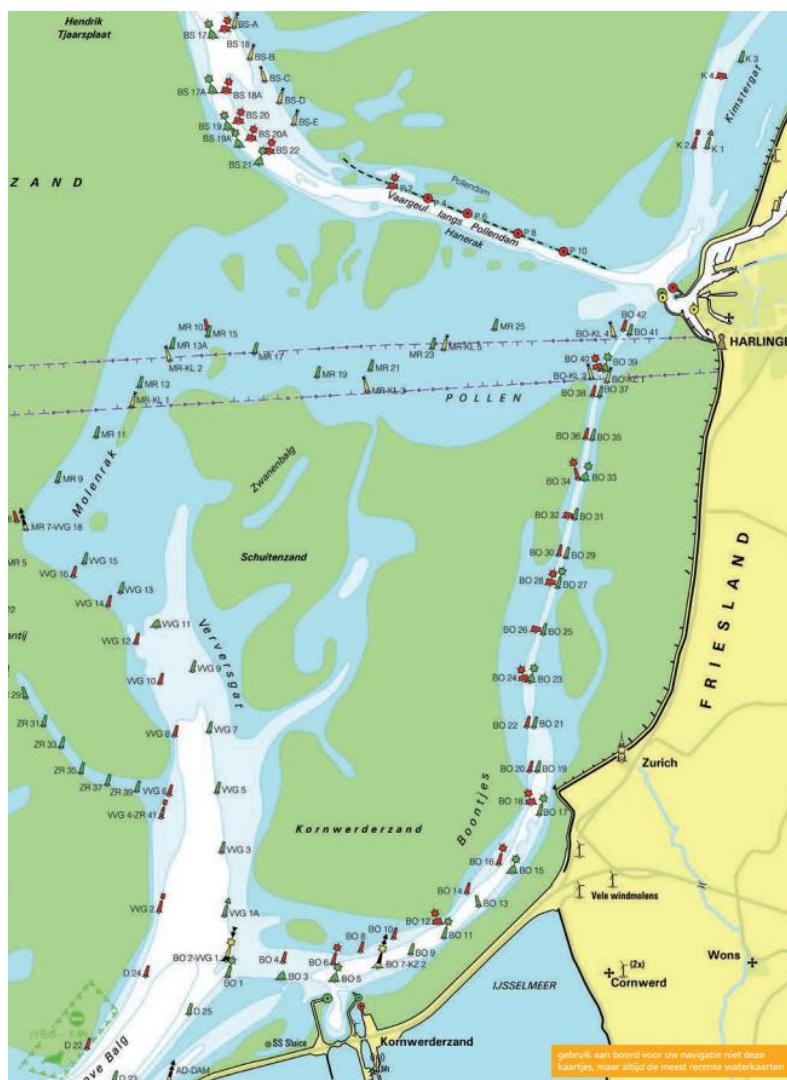
	Samenvatting	4
1	Introductie	8
1.1	Vaargeul Boontjes	8
1.2	Probleembeschrijving	9
1.3	Doelen	9
1.4	Hypotheses	9
1.5	Naamgeving geulen en platen	10
1.6	Leeswijzer	10
2	Grootschalige ontwikkeling over de afgelopen eeuw	13
2.1	Sturend effect van de afsluiting van de Zuiderzee	13
2.1.1	Veranderingen in het getij	13
2.1.2	Effect op het wantij	15
2.1.3	Morfologische respons	16
2.1.4	Sedimentsamenstelling bodem	17
2.2	Kleiner effect zeespiegelstijging en bodemdaling	18
2.2.1	Zeespiegelstijging	18
2.2.2	Bodemdaling	19
2.3	Grootschalige sedimentbalans	21
2.4	Samenvatting van de belangrijkste bevindingen	22
3	Meso-schaal ontwikkeling rondom de Boontjes	23
3.1	Recente veranderingen in de getijslag	23
3.2	Morfologische ontwikkeling	24
3.3	Sedimentsamenstelling bodem	29
3.4	Baggeren en verspreiden rondom de Boontjes	32
3.5	Samenvatting van de belangrijkste bevindingen	33
4	Vaargeul Boontjes en de rol van baggeren	34
4.1	Eerdere studies en analyses	34
4.1.1	Inschatting vóór drempelverwijdering	34
4.1.2	Inschatting op basis van gerealiseerde baggervolumes direct na drempelverwijdering	34
4.2	Ontwikkeling baggervolumes: 2012 tot heden	34
4.2.1	Databronnen en methode	35
	Dichtheid van het gebaggerde materiaal en omrekening naar massa (tds)	36
4.2.2	Baggervolume en gebaggerde massa	37
4.2.3	Variaties in baggervolume binnen het jaar	39
4.3	Erosie en sedimentatie in de vaargeul	40

4.3.1	Databron	40
4.3.2	Morfologische respons	41
4.3.3	Morfodynamiek rondom grote baggerwerkzaamheden	46
4.3.4	Aanwezigheid van fluid mud	46
4.4	Sedimentbalans Boontjes inclusief baggeren	47
4.4.1	Methode	47
4.4.2	Resultaat	48
4.5	Mogelijk sturende processen	49
4.5.1	Stromingspatronen	50
4.5.2	Wind en golfwerking	50
4.5.3	Zoetwaterafvoer en gravitatiecirculatie	50
4.5.4	Vorming van fluid mud	51
5	Samenvatting systeemwerking	52
6	Conclusie en aanbevelingen	55
6.1	Morfologische ontwikkeling	55
6.2	Sedimentsamenstelling op de bodem	55
6.3	Ontwikkeling baggerwerkzaamheden	56
6.4	Mogelijk sturende processen	56
6.5	Aanbevelingen	57
	Referenties	59
	Appendices	61
A	Aanvullende kaarten van de westelijke Waddenzee	62
B	Dieptepeilingen vaargeul Boontjes	63
B.1	Peilingen rondom grote baggerwerkzaamheden	63
B.2	Fluid mud	66
C	Aanvullende resultaten sedimentbalans	78
C.1	Foutieve bodemkaarten	78
C.2	Resultaten aangepaste factor beunvolumes	81
D	Aanvullende analyse mogelijk sturende processen	83
D.1	Extreme windcondities	83
D.2	Afvoer spuisluis Kornwerderzand	87

1 Introductie

1.1 Vaargeul Boontjes

De vaarweg Boontjes is de vaarweg die Kornwerderzand verbindt met Harlingen (Figuur 1.1). Het scheepvaartverkeer vanaf het IJsselmeer kan via de Boontjes een rechtstreekse route naar Harlingen nemen, als alternatief voor de veel omslachtiger route via de binnenwateren. In 2012 en 2013 is de vaarweg verdiept, zodat deze over de volle lengte voldoet aan een streefdiepte van NAP-3,8 m (de maximale baggerdiepte is NAP-4,3 m), met een breedte van minimaal 100 m. De drempelverwijdering vond plaats door het baggeren van in totaal 711.907 m³ (bepaald in de beun van het baggerschip). Het gebied waar baggeren nodig was om aan de streefdiepte te voldoen is de ongeveer 5 kilometer lange drempel, met een zwaartepunt over twee kilometer. Sindsdien wordt de vaarweg onderhouden door het uitvoeren van baggerwerkzaamheden, zodat de geul steeds aan de streefdiepte voldoet. De Boontjes wordt door het uitvoeren van onderhoudsbaggerwerk op diepte gehouden. Hiervoor wordt jaarlijks ongeveer 160.000 m³ zand en slib gebaggerd (volume bepaald in de beun van het schip).



Figuur 1.1 Nautische kaart van de vaarweg Boontjes, tussen Kornwerderzand en Harlingen (bron: Knooppuntenboekje 05a Waddenzee), gedraaid zodat het noorden rechts is. De drempel bevond zich tussen BO 31-BO 32 en BO-KL 1-BO-KL 2.

1.2 Probleembeschrijving

In het kader van de planstudie 'Drempelverwijdering Boontjes' is in 2012 het effect van de drempelverwijdering in de vaargeul Boontjes onderzocht. In de prognose voor het vaargeulonderhoud werd geconcludeerd dat er weinig tot geen toename van de baggervolumes te verwachten viel, tot maximaal 20.000 m³ (Ouwerkerk en Vuik, 2012). Op basis van deze prognose is destijds besloten om de drempel te verwijderen. Deze drempelverwijdering heeft in 2012 en 2013 plaatsgevonden.

Sinds de drempelverwijdering kampt de vaargeul Boontjes echter met een toename in de baggervolumes tot ca. 300.000 m³ per jaar. Deze baggervolumes zijn een orde groter dan de prognose uit 2012. Deze toename treedt op ondanks gelijkblijvende geuldimensies.

In navolging van de bestuursovereenkomst 'Financiering en realisatie van de Werken aan de Vaarweg Harlingen – Kornwerderzand (Boontjes)' uit 2009 worden de onderliggende aspecten voor de onderhoudskosten nader onderzocht. Dit nadere onderzoek is in het huidige rapport uitgewerkt in de vorm van een morfologische analyse en analyse van de geregistreeerde baggerwerkzaamheden. Het deelproject Vaargeul Boontjes is onderdeel van het KPP-project Kennisontwikkeling morfologie Waddenzee en baggerhoeveelheden (HV09 2021).

1.3 Doelen

De doelen van dit rapport zijn:

- het in beeld brengen van de morfologische ontwikkelingen in en nabij de Vaargeul Boontjes
- het vergroten van het inzicht in de aandrijvende processen van de baggervolumes;
- het vergroten van het inzicht in oorzaken van de toename in de baggervolumes;

Dit rapport bevat een analyse van de morfologische ontwikkeling van het gebied op verschillende tijd- en ruimteschalen op basis van gemeten bodemliggingen en een analyse van de baggeractiviteiten (frequentie, sedimentsamenstelling, proces).

In 2022 zal dit project voortgezet worden met als doel om systeembegrip te vergroten door middel van de inzet van een numeriek model. Op basis van het aangescherpte conceptuele denkmodel dat hieruit volgt, schatten we in of verdere toename van de baggervolumes te verwachten valt. Daarnaast wordt onderzocht welke maatregelen kunnen worden genomen om het baggerbezwaar te verkleinen, zoals alternatieve geuldimensies of routes.

1.4 Hypotheses

De volgende werkhypotheses zijn opgesteld om de data-analyse in deze studie richting te geven. Deze hypothesen worden getoetst in de volgende hoofdstukken en besproken in de conclusies.

1. Het gebied rond Boontjes zal zich, als gevolg van steeds verdere afname van kombergingsvolume ten gevolge van de (slib)sedimentatie langs de vastelandskust, steeds verder zal ontwikkelen tot ondiep platengebied met kwelders langs de kusten.
2. De bodemsamenstelling van de geul is slibrijker geworden.
3. De gebaggerde volumes zijn wel sterk toegenomen, maar de gebaggerde massa is niet significant veranderd.
4. Sedimentatie in de geul wordt versterkt door stormen. Tijdens een storm wordt sediment op de platen gemobiliseerd, waarna het materiaal naar de geul wordt getransporteerd. Hierdoor wordt kort na een stormconditie de meeste aanzanding en/of aanslibbing waargenomen.

5. Lage afvoeren uit de spuisluis bij Kornwerderzand zorgen voor een afname van de afvoer door de Vaargeul Boontjes, waardoor meer sedimentatie in de geul ontstaat.
6. De zoetwaterafvoer vanuit de spuisluis Kornwerderzand creëert een estuarien circulatiepatroon, ten gevolge van de saliniteitsgradiënt, met een noordwaarts (zeewaarts) gerichte stroming aan het oppervlak en een zuidwaarts (landwaarts) gerichte stroming nabij de bodem. Het gebied rond Boontjes zal zich, als gevolg van steeds verdere afname van kombergingsvolume ten gevolge van de (slib)sedimentatie langs de vastelandskust, steeds verder zal ontwikkelen tot ondiep platengebied met kwelders langs de kusten.

1.5 Naamgeving geulen en platen

Het gebied rondom Boontjes vormt de overgang tussen de bekkens van het Marsdiep en het Vlie in het westelijke gedeelte van de Waddenzee (Figuur 1.2).

Het Marsdiep

Het kombergingsgebied Marsdiep is het grootste getijdebekken van de Nederlandse Waddenzee. Het zeegat van dit kombergingsgebied bestaat uit één zeer grote geul (het Marsdiep, aangeduid met nummer 1 in Figuur 1.2). In het bekken splitst het Marsdiep in de grote geul Texelstroom (2), die in eerste instantie naar het noordoosten loopt in het verlengde van het Marsdiep, vlak onder de kust van Texel, en het kleinere Malzwin (3), dat naar het zuidoosten afbuigt. De grote geul Texelstroom buigt naar het zuidoosten en draait daarbij weg van de kust van Texel. De geul Scheurrak (5) splitst af naar het oostnoordoosten en de Texelstroom gaat over in de Doove balg (4), die vrijwel tot aan de Afsluitdijk loopt. Langs de Afsluitdijk zelf loopt een kleinere geul. De Doove Balg draait naar het noorden, weg van de Afsluitdijk en waaiert dan uit in verschillende geulen, waaronder het Verversgat ten westen van de Boontjes (14). Ter hoogte van het sluzencomplex bij Kornwerderzand splitst de geul Boontjes af van de Doove Balg. De grootste plaatgebieden in het bekken zijn het Balgzand (b) en de Waarden (d), die het wantij vormt met het Eierlandse gat. Hierover loopt de grens van het kombergingsgebied Marsdiep.

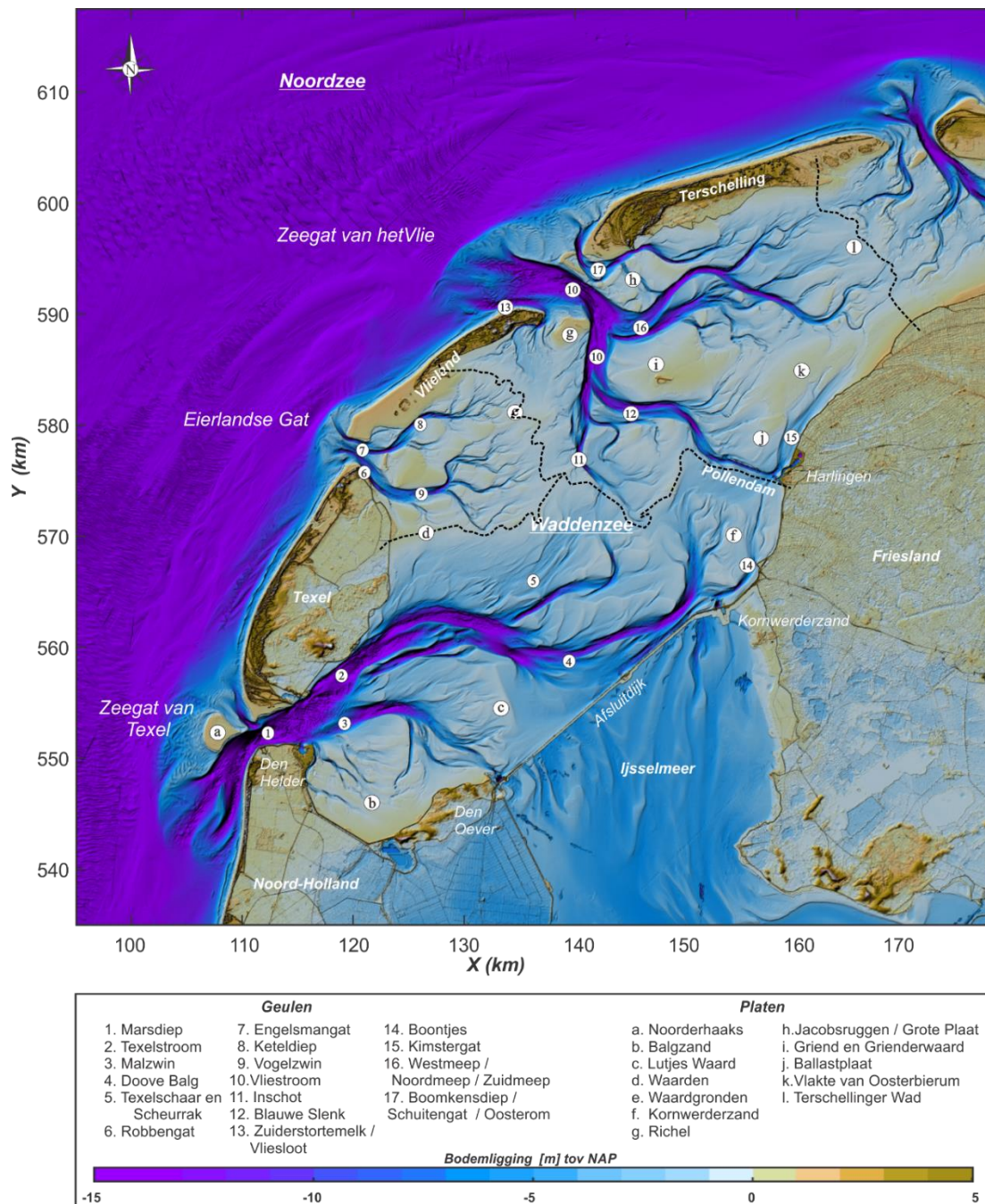
Het Vlie

Het zeegat van het Vlie omvat drie geul(system)en (zie Figuur 1.2). De centraal gelegen Vliestroom (10) is de grootste. De andere geulsystemen zijn Zuiderstortemelk – Vliestroom (13) en Boomkensdiep – Schuitengat (17). De Vliestroom splitst al snel in de geul Westmeep (16), die naar het oosten stroomt en het Pannegat, dat naar het zuiden stroomt. Het Pannegat en de daarvan vertakkende geulen bedient het zuidelijke deel van het kombergingsgebied. Het Pannegat splitst in Blauwe Slenk (12) en Inschot (11). Blauwe Slenk gaat vervolgens over in de geul langs de Pollendam. De Pollendam is de stroomgeleidingsdam die eind 19e eeuw is aangelegd om het scheepvaart verkeer naar en van Harlingen te faciliteren. Ten noordwesten van Harlingen loopt het Kimstergat (15). De belangrijkste wadplaatgebieden zijn de Grienderwaard (i), de Ballastplaat (j) en de Vlake van Oosterbierum (k), de Waardgronden (e, die worden gedeeld met het Eierlandse gat) en de verschillende platen ten zuiden van Terschelling (h).

1.6 Leeswijzer

Dit rapport is als volgt opgebouwd: na de introductie van deze studie (Hoofdstuk 1) volgt een analyse van de grootschalige ontwikkeling over de afgelopen eeuw (Hoofdstuk 2). Hierin wordt het effect van het afsluiten van de Zuiderzee besproken (op de hydrodynamica, de morfologie en de sedimentsamenstelling), de effecten van zeespiegelstijging en bodemdaling en wordt een samenvattende grootschalige sedimentbalans besproken. Hierna volgt een analyse van

de meso-schaal ontwikkeling rondom de vaargeul Boontjes (Hoofdstuk 3), waarin ook veranderingen in de hydrodynamica, morfologische ontwikkeling en menselijk ingrijpen worden besproken. Daarna zoomen we in op de vaargeul Boontjes (Hoofdstuk 4). Na een beknopte samenvatting van eerdere studies, wordt een data-analyse gepresenteerd van de baggerwerkzaamheden en dieptepeilingen in de geul sinds december 2016. Ook wordt een analyse gepresenteerd van de morfologische evolutie van de geul sinds de drempelverwijdering en rondom baggerwerkzaamheden. Daarnaast wordt ook ingegaan op de aanwezigheid van fluid mud. Vervolgens is een sedimentbalans opgesteld van de vaargeul en een aanvullende analyse van mogelijk sturende processen. Hoofdstuk 5 bevat een samenvatting van de problematiek die speelt omtrent het vaargeulonderhoud in de Boontjes. Ten slotte worden in Hoofdstuk 6 conclusies getrokken met betrekking tot de hypothesen uit paragraaf 1.3 en aanbevelingen gegeven voor zowel vervolgonderzoek in 2022 als voor de uitvoering van het vaargeulonderhoudswerkzaamheden.



Figuur 1.2 Overzicht van de Westelijke Waddenzee, bestaande uit de zeegaten en bekkens van het Marsdiep, Eierlandse Gat en het Vlie. De ligging van de belangrijkste geulen en platen is aangegeven (cijfers en letters), evenals de ligging van de wantijen (stippellijnen) (Elias & Vermaas, 2018)

2 Grootschalige ontwikkeling over de afgelopen eeuw

Dit hoofdstuk bevat analyses van de grootschalige ontwikkeling van de bekkens Marsdiep en Vlie, waartussen de geul Boontjes zich bevindt, en de oorzaken hiervan. We gaan eerst in op het afsluiten van de Zuiderzee door de aanleg van de Afsluitdijk in 1932. Deze interventie is sturend geweest voor de grootschalige ontwikkeling en de effecten ervan spelen nog altijd een rol in de huidige morfodynamica. Daarna worden de grootschalige effecten van zeespiegelstijging en bodemdaling besproken. Tenslotte bespreken we hoe de bovenstaande aspecten de sedimentbalans hebben beïnvloed.

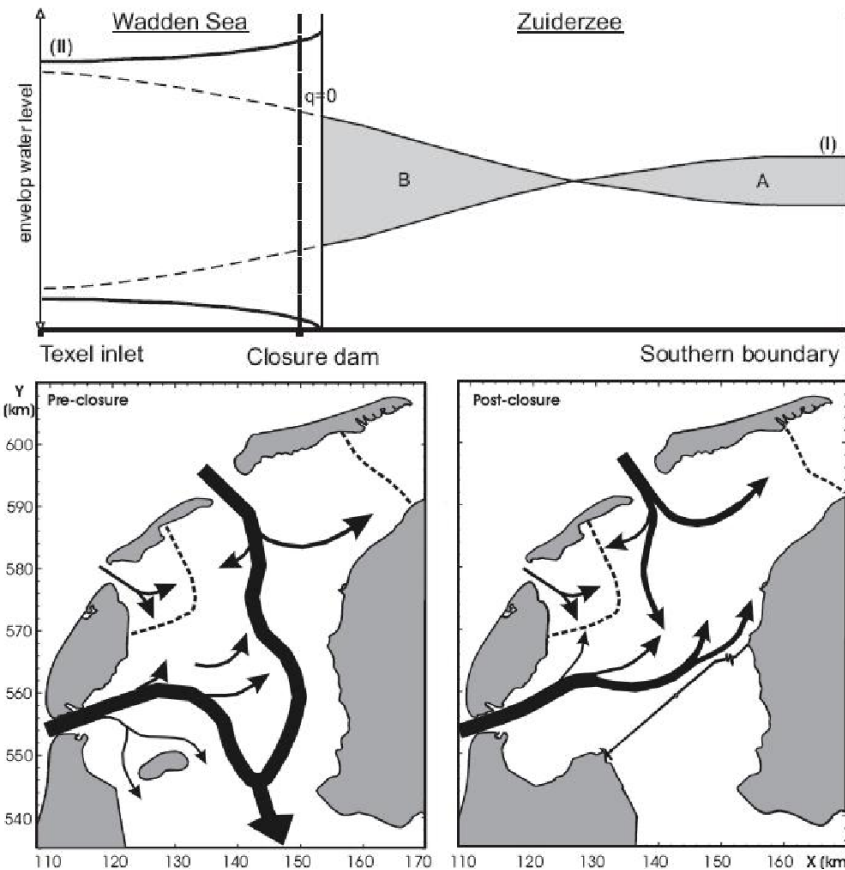
2.1 Sturend effect van de afsluiting van de Zuiderzee

De morfologische ontwikkeling van de bekkens wordt al honderden jaren beïnvloed door menselijke ingrepen, met als meest bepalende ingreep de afsluiting van de Zuiderzee door de aanleg van de Afsluitdijk (van Wieringen naar Friesland) en de Amsteldiep-dijk (van Noord-Holland naar Wieringen). De afsluiting leidde tot een sterke verandering van de getijkarakteristieken.

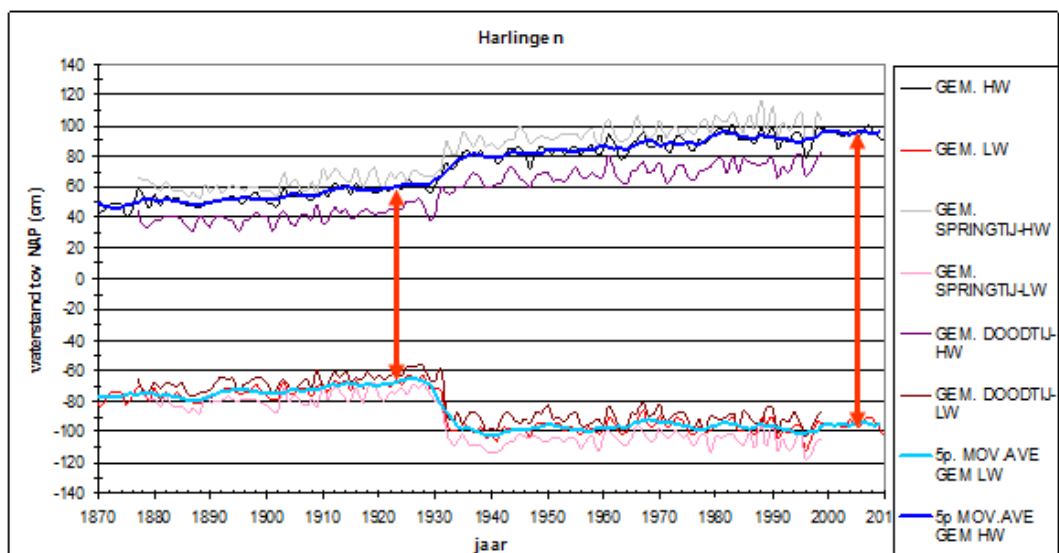
2.1.1 Veranderingen in het getij

Voor de afsluiting was het bekken relatief lang vergeleken met de getijgolf. De Afsluitdijk is net zeewaarts geplaatst van de plek waar de getijstroming (voor de afsluiting) minimaal was (zie $q=0$ in Figuur 2.1). Door de afsluiting werden de bekkens in de westelijke Waddenzee zogenaamde “korte bekkens” en kreeg de getijgolf een meer staand karakter. De getijslag nam met 15% toe in Den Helder en bijna 100% in Den Oever. Ook in Harlingen zijn waarnemingen van de plotselinge sterke verandering van de getijslag (hoger hoogwater en lager laagwater), zie Figuur 2.2. Om het effect van de vergrote getijslag te compenseren is de Afsluitdijk iets meer zeewaarts geplaatst dan de buik (zie $q=0$) van de oorspronkelijke getijgolf, zodat het getijprisma niet teveel zou worden beïnvloed door de afsluiting van de Zuiderzee. Echter nam het getijprisma toe met ongeveer 26% (Elias et al., 2003).

Naast aanpassing van het getijprisma door de zeegaten Marsdiep en Vlie, geldt dat de getijstroming door de geulen in het binnenste deel van de bekkens Marsdiep en Vlie sterk gereduceerd en aangepast zijn. Stroomsnelheden in de geulen die doorsneden zijn door de Afsluitdijk werden sterk gereduceerd. Door het toegenomen getijprisma, nam de stroming in de zeegaten toe. De Afsluitdijk blokkeert de getijstroming waardoor het getijdebiet loodrecht op de dijk is gereduceerd tot nul. Het gevolg is een vloedstroming die (lokaal) is verzwakt en die niet langer zuidwaarts is gericht (Wang & Nederhoff, 2018).



Figuur 2.1 Invloed van de afsluiting van de Zuiderzee op het getij in de Waddenzee (Elias et al., 2003). Bovenste paneel: Schematische weergave envelop van hoog- en laagwater in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee vóór I (gestippelde lijnen) en na II (getrokken lijnen) de afsluiting van de Zuiderzee. De lijn aangeduid met $q=0$ geeft de positie van de buik van het getijgolf aan. Doordat de kombergingsvolumes aangeduid met A en B gelijk zijn, is er geen getijstrooming bij de buik. Onderste panelen: Schematische weergave van de getijindringing in het westelijke deel van de Nederlandse Waddenzee vóór (links) en na (rechts) de afsluiting van de Zuiderzee.



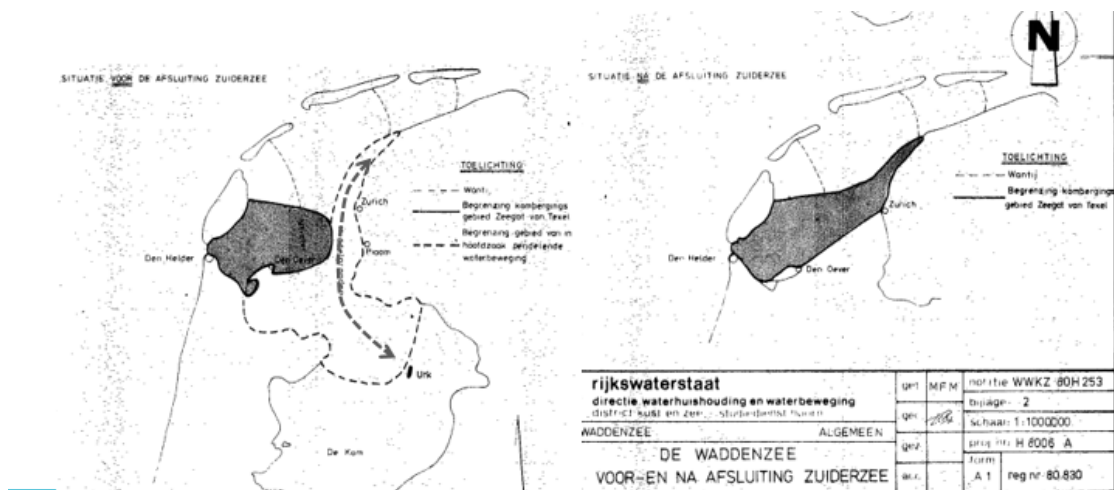
Figuur 2.2 Getijslag in Harlingen: hoger hoogwater en lager laagwater door reflectie van de getijgolf tegen de Afsluitdijk en de Friese kust.

2.1.2 Effect op het wantij

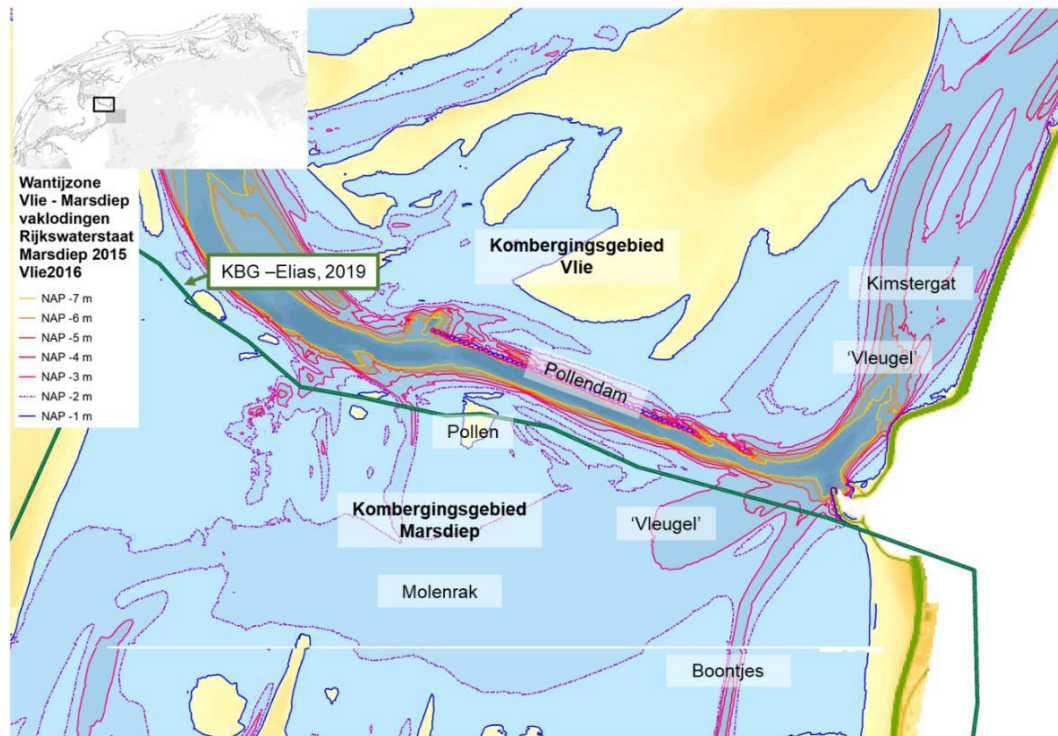
Wantijen zijn de grenzen tussen naastgelegen bekkens en geven aan welke gebied gevuld en geleidigd worden via welk zeegat of bekken. Achter de eilanden vormen wantijen zich op de plaats waar de getijgolven door de zeegaten elkaar ontmoeten. De stroomsnelheden zijn daar lager, waardoor sediment wordt afgezet. Op de plaats van het wantij liggen daardoor vaak uitgestrekte intergetijdengebieden. De gestreepte lijnen in Figuur 1.2 geven een schatting van de ligging van de wantijen op basis van de minimale diepte en de oriëntatie/helling van de bodemvormen.

De ontwikkeling van het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie is van belang, omdat de vaargeul Boontjes zich op of nabij het wantij bevindt. De morfologische ontwikkeling van de geul, de omliggende plaatgebieden en de baggervolumes worden daarom op langere termijn gestuurd door de ontwikkeling van het wantij.

Bij het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie is iets bijzonders aan de hand. Door de afsluiting van de Zuiderzee hebben grote veranderingen in de hydrodynamica plaatsgevonden, waardoor de plaats met minimale stroomsnelheden (het hydrodynamische wantij) naar het oosten is verschoven (Van Geer, 2007, zie ook Figuur 2.3). Er vindt veel uitwisseling tussen de bekkens van het Marsdiep en het Vlie plaats, en de bodemligging ter plaatse van het wantij bestaat uit sublitorale plaatgebieden. Daardoor is de positie van het (morfologische) wantij lastig vast te stellen. De hydrodynamica rondom het wantij wordt complexer door de aanwezigheid van de Pollendam, het baggeren van de vaargeul naar Harlingen en het spuien van zoet water bij Kornwerderzand. De Pollendam beïnvloedt het Kimstergat en het sublitorale gebied ten zuiden van de dam. Door het spuien vanaf de Afsluitdijk ontstaat er een gravitatiecirculatie (3D zoutgedreven dichtheidsstroming) in het Kimstergat (Schulz & Gerkema, 2018) en de Boontjes. Het Kimstergat (zie Figuur 2.4) heeft een oriëntatie haaks op de geul langs de Pollendam, waardoor een deel van het getijvolume mogelijk via het kombergingsgebied van het Marsdiep wordt aan en afgevoerd. Door de aantakking van Boontjes op Kimstergat is er een verbinding ‘achterlangs’. Het is hierdoor niet geheel duidelijk of het Kimstergat tot het kombergingsgebied van het Vlie of het Marsdiep gerekend moet worden.



Figuur 2.3 Verandering van de getijdegolf door het Marsdiep ten gevolge van de afsluiting van de Zuiderzee (voor afsluiting links, na afsluiting rechts) en effect op de ligging van de hydrodynamische wantijen (stippellijnen).



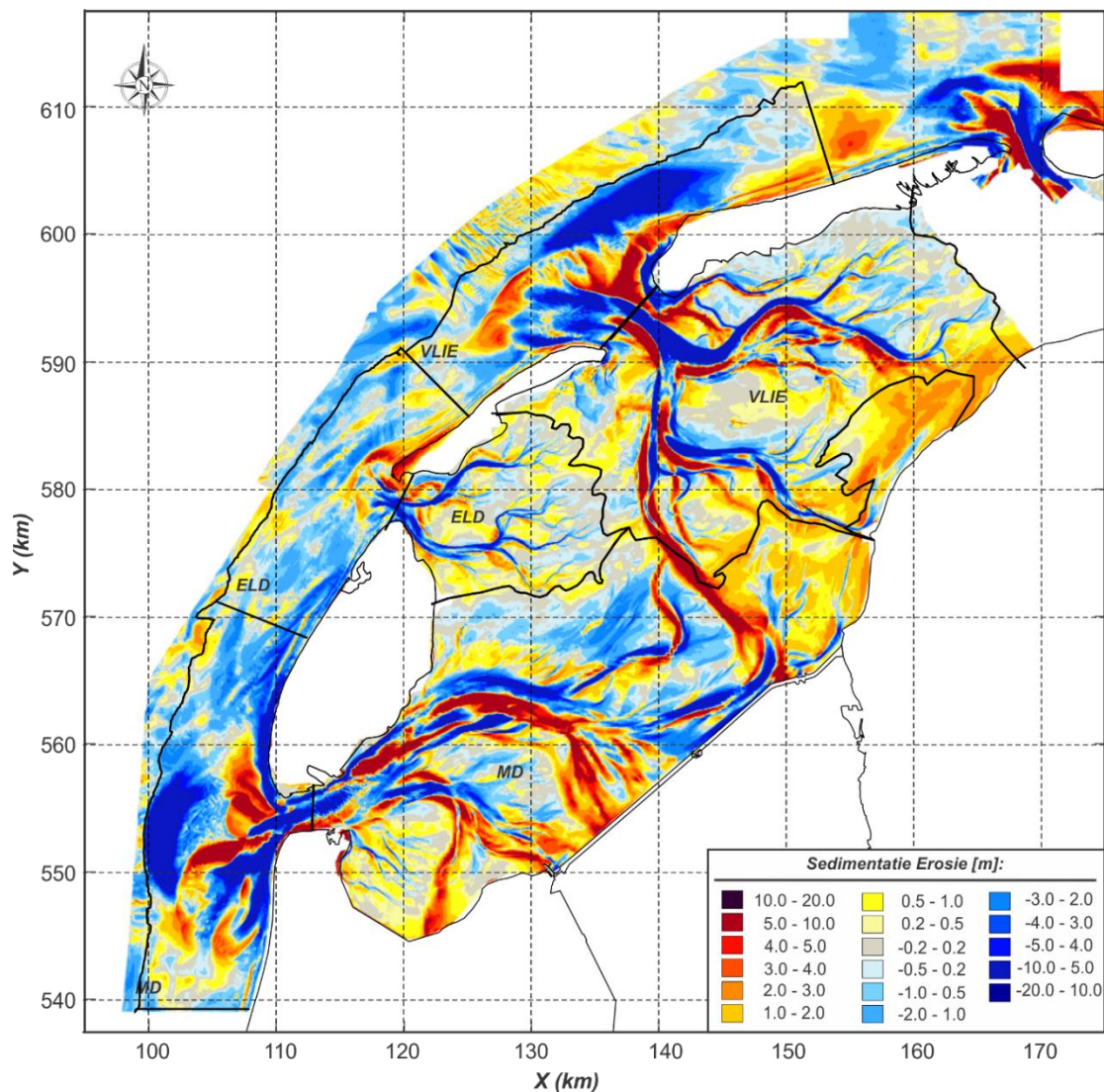
Figuur 2.4 Detail van de zone waar de komborgingsgebieden Marsdiep en Vlie aan elkaar grenzen. De groene lijn is het wantij dat is gebruikt in Elias (2019).

2.1.3 Morfologische respons

De veranderde getijkarakteristieken en getijvoortplanting, de aangepaste bekkengeometrie en het afsluiten van de hoofdgeulen hadden grote morfologische veranderingen tot gevolg, zie Figuur 2.5. De respons van de bekkens op de afsluiting wordt gekenmerkt door een sterke sedimentimport (Elias, 2019; Elias et al., 2012; Wang et al., 2018; (Elias & Vermaas, 2018)). In het bekken van het Zeegat van Texel vonden de grootste veranderingen plaats langs de Afsluitdijk, waar de afgesloten geulen (zoals Malzwin en Vlieter) sterk opvulden doordat hier de stromingen tot bijna nul reduceerden. Door de nieuwe positie van het wantij vulde ook Inschot op, die voorheen het Zeegat van het Vlie verbond met de Zuiderzee. Langs het oostelijke gedeelte van de Afsluitdijk vond voornamelijk erosie plaats doordat de geul Doove Balg zich in oostelijke richting heroriënteerde en uitbreide, eveneens als gevolg van de andere positie van het wantij en nieuwe hydrodynamische situatie.

Voor de afsluiting was er nog geen geul tussen de Doove Balg en de Boontjes. Dit gebied kenmerkte zich voor de afsluiting door de aanwezigheid van de Boontjes en sub- en intergetijdenplaten (Oost & Punte, 2003). Bij het huidige sluizencomplex van Kornwerderzand lag een complex van voornamelijk noord-zuid lopende geulen, die van elkaar gescheiden waren door zandruggen. In de jaren na de afsluiting tot op heden is een verondieping van het gebied te constateren.

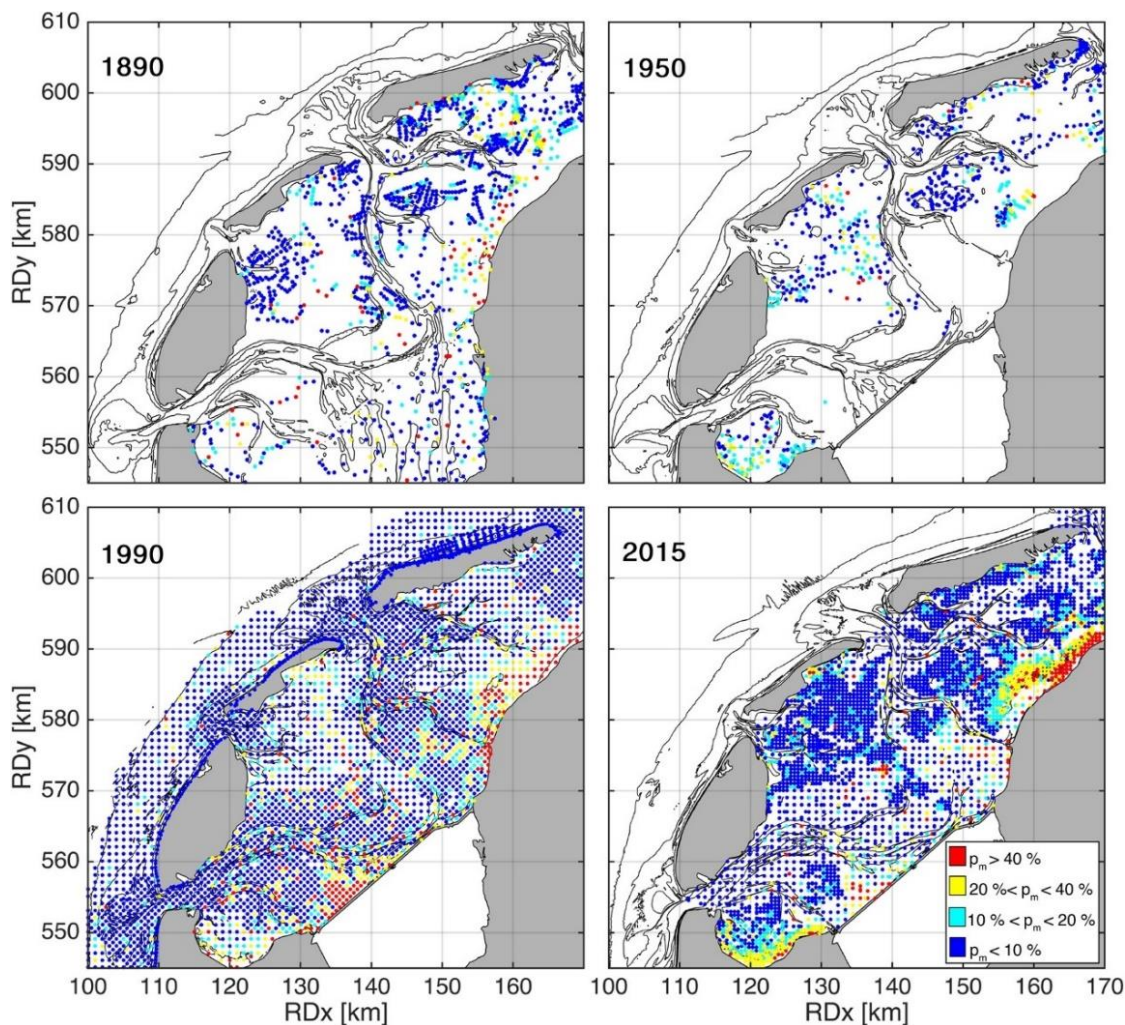
Daarnaast vond er veel sedimentatie plaats langs de kust van Friesland (Vlakte van Oosterbierum en Ballastplaat), een trend die tegenwoordig nog steeds doorzet. Ter compensatie voor de sedimentatie in de bekkens heeft erosie opgetreden buiten de zeegaten. Elias et al. (2012) laten zien dat erosie zowel op de buitendelta's als langs de Waddeneilanden is opgetreden.



Figuur 2.5 Bodemverandering tussen 1933 en 2015. Blauwe kleuren = erosie, Geel/rode kleuren = sedimentatie (Elias & Vermaas, 2018).

2.1.4 Sedimentsamenstelling bodem

De grootschalige lange-termijn sedimentsamenstelling van de bodem van de westelijke Waddenzee is over het algemeen relatief stabiel gebleven — met uitzondering van het Balgzand en de afgesloten geulen voor de Afsluitdijk die slibrijker zijn geworden en het wantij achter Terschelling dat slibbarmer is geworden (zie Figuur 2.6). De Friese kust (ten noordoosten van de vaargeul Boontjes) is het grootste aangroeiende slibstelsel in de westelijke Waddenzee. Hier was de toplaag van de bodem al slibrijk voor de afsluiting, en lijkt een gestage slibsedimentatie plaats te vinden. Diepe boringen tonen dat niet alleen de toplaag slibrijk is, maar dat ook onder de toplaag een metersdik slibpakket te vinden is (Colina Alonso A. , 2020; data van Lely, de Glopper, Sedimentatlas en SIBES).

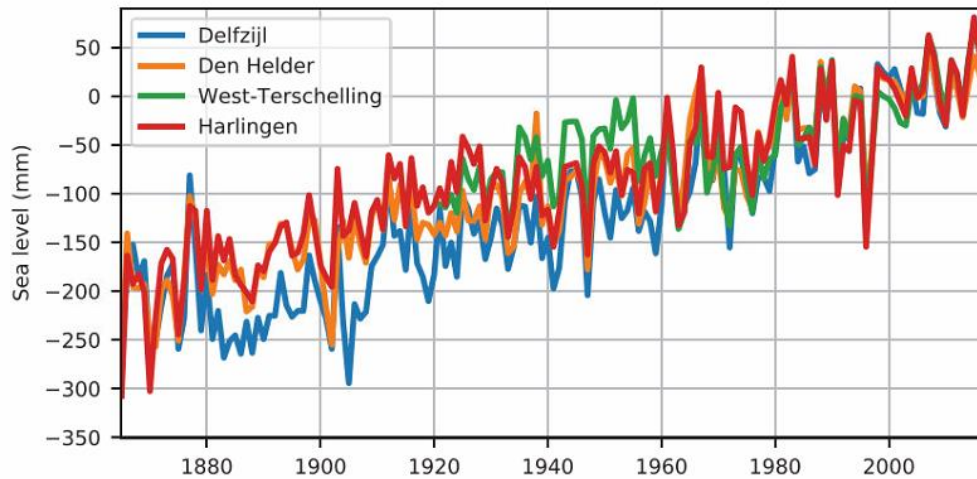


Figuur 2.6 Percentage slib (p_m) in de toplaag van de bodem van de Westelijke Waddenzee (Colina Alonso, van Maren, Elias, Holthuijsen, & Wang, 2021)

2.2 Kleiner effect zeespiegelstijging en bodemdaling

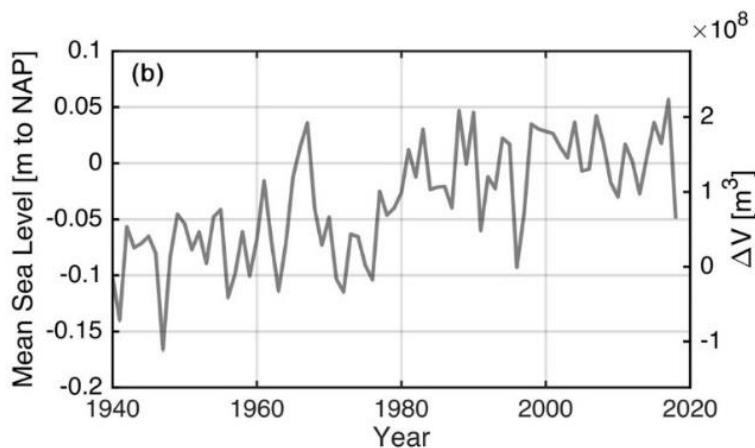
2.2.1 Zeespiegelstijging

De morfologische evolutie van de Waddenzee over de afgelopen eeuw, die sterk gekenmerkt wordt door een opvulling van de bekkens, is niet enkel het gevolg van de afsluiting van de Zuiderzee, maar wordt ook gedreven door zeespiegelstijging. Figuur 2.7 toont de jaarlijks gemiddelde zeespiegel in Delfzijl, Den Helder, West-Terschelling en Harlingen over de afgelopen 150 jaar. Er is een duidelijk stijgende trend te zien. Langs de Hollandse Kust is deze stijging ongeveer 2 mm/jaar en in de Waddenzee is dit 1,2-1,4 mm/jaar (Vermeersen, et al., 2018; Baart, et al., 2012).



Figuur 2.7 Lange termijn tijdreeks van de jaarlijkse zeespiegel in vier getijdestations in de Waddenzee. (Vermeersen et al., 2018).

Als we de waargenomen zeespiegelstijging in de Waddenzee vermenigvuldigen met het areaal van de bekkens in de westelijke Waddenzee krijgen we een indicatie van de benodigde sedimentvolumes om te compenseren voor zeespiegelstijging (zie rechter y-as in Figuur 2.8). Dit volume (~150 miljoen m³) is een stuk kleiner dan de waargenomen volumetoename in de bekkens (~350 miljoen m³). Dat komt doordat deze volumetoename niet alleen wordt veroorzaakt door zeespiegelstijging, maar vooral als respons op de afsluiting van de Zuiderzee.



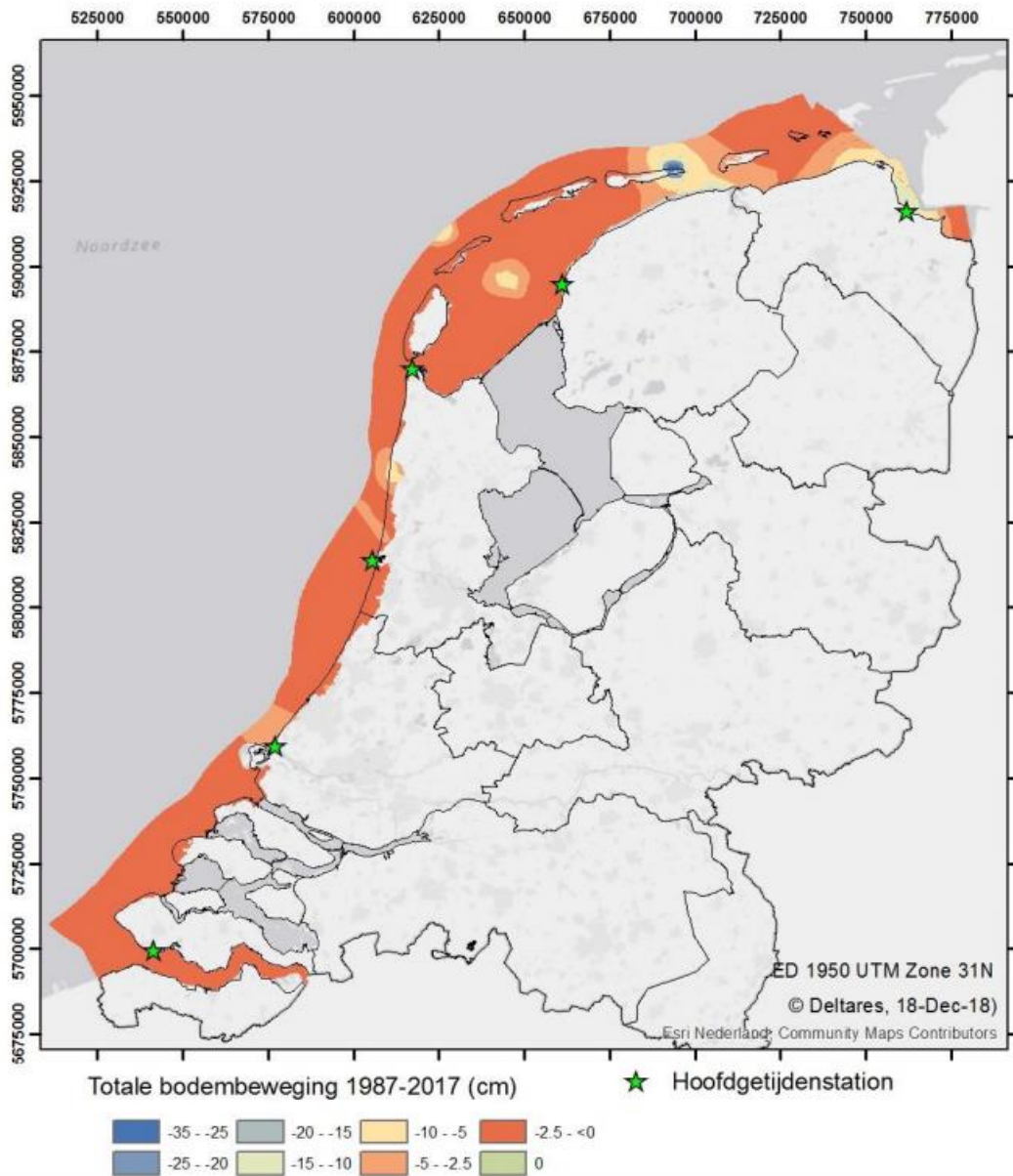
Figuur 2.8 Gemiddelde zeespiegelstijging (linker-as) en benodigde sedimentimport om hiervoor te compenseren, berekend als zeespiegelstijging maal oppervlakte westelijke Waddenzee (rechter-as). (Colina Alonso, et al., 2021; Nederhoff, et al., 2017)

2.2.2 Bodemdaling

Hijma & Kooi (2018a; 2018b) presenteren een analyse van de relevante bodemdalingscomponenten langs de Hollandse kust en in de Nederlandse Waddenzee. De oorzaken van bodemdaling kunnen worden verdeeld in 1) geologische bodemdaling en 2) bodemdaling door winning (gas, olie en zout). Geologische bodemdaling is weer op te delen in tektonische bodembeweging en glacio-isostatische bodembewegingen (GIA). Bodemdaling in de westelijke Waddenzee wordt met name veroorzaakt door geologische bodemdaling, met een gemiddelde daling van 0,564-0,611 mm/j. Door de mens veroorzaakte bodemdaling, door de winning van gas en zout, vindt op lokale schaal plaats. Deze is gemiddeld genomen voor

de westelijke Waddenzee geschat op 0,001-0,026 mm/j. Lokaal kan de door winningen veroorzaakte bodemdaling oplopen tot 1,5-3 mm/j. Figuur 2.9 toont een kaart met de berekende totale bodemdaling in de periode 1987-2017.

Bodemdaling zou in totaal een extra toename in het watervolume van de westelijke Waddenzee van 89 miljoen m³ hebben veroorzaakt over de afgelopen eeuw, waarvan 1,9 miljoen m³ als gevolg van winning (Colina Alonso, van Maren, Elias, Holthuisen, & Wang, 2021). In de vaargeul Boontjes heeft de afgelopen 30 jaar gemiddeld zo'n 0-2,5 cm bodemdaling plaatsgevonden (geologische bodemdaling). Er zijn geen duidelijke indicaties gevonden van bodemdaling in de bathymetrische data, waardoor kan worden aangenomen dat deze aanvullende accommodatieruimte relatief snel is opgevuld met sediment.



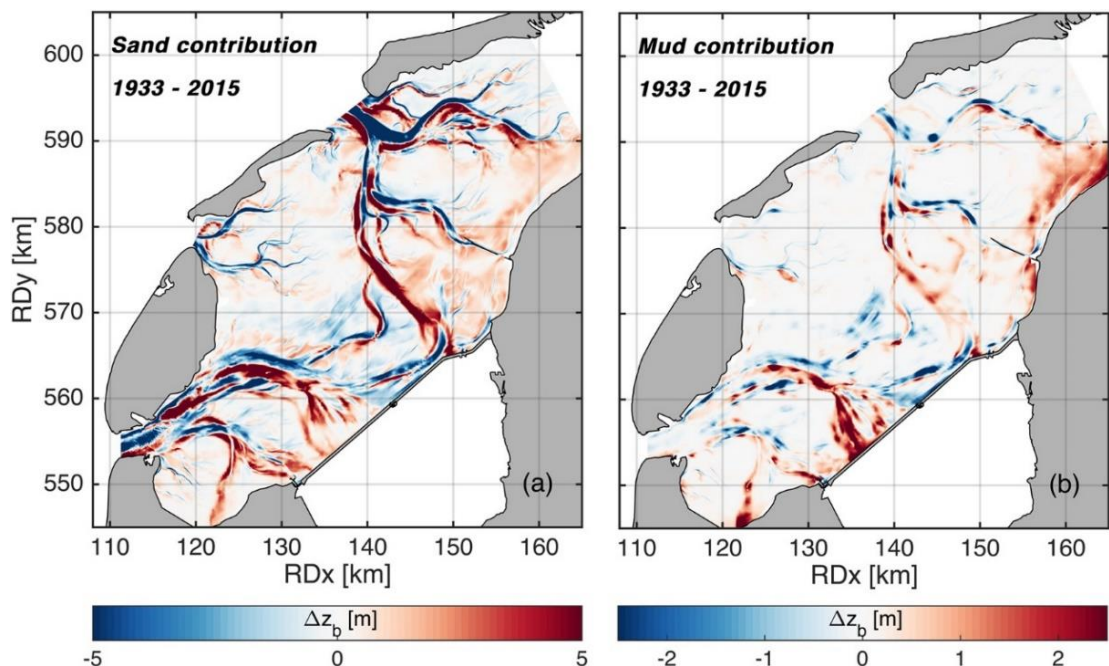
Figuur 2.9 Totale bodembeweging (winning van gas, olie en zout; geologische bodemdaling) in de periode 1987-2017.

2.3 Grootschalige sedimentbalans

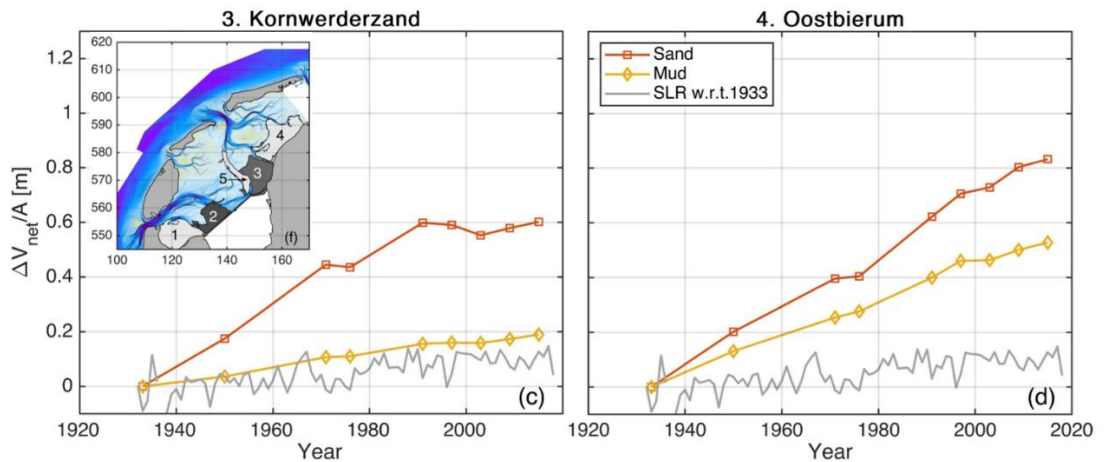
Door de morfologische ontwikkeling uit te drukken in een sedimentbalans, wordt meer inzicht verkregen in de grootte van de morfologische ontwikkelingen en de trends. Door niet alleen de bodemveranderingen te aggregeren naar deelgebieden, maar ook de sedimentsamenstelling mee te nemen, kan een onderscheid worden gemaakt in het aandeel van zand en slib in de morfologische veranderingen en of bepaalde gebieden slibrijker worden. Voor de vaargeulonderhoud (en dus ook onderhoud aan vaargeul Boontjes) is dit relevant, omdat slib grote invloed kan hebben op het baggerbezwaar (zie ook paragrafen 4.2.2 en 4.3.4).

Figuur 2.10 toont de volumeveranderingen in de westelijke Waddenzee tussen 1933 en 2015, uitgesplitst in zand en slib. Het beeld voor de bijdrage van zand wordt bepaald door geulmigraties in de zeegaten (rode en blauwe afwisselende gebieden) en sterke sedimentatie in de geulen die doorsneden zijn door de Afsluitdijk en het Inschot (zoals in de vorige paragraaf beschreven). De bijdrage van slib is het grootst in de verlaten geulen in het Balgzand, de Vlieter en rondom de Javaruggen en langs de Friese vastelandskust (en dus ook op de platen ten oosten van de Boontjes).

In de gebieden rondom Kornwerderzand (inclusief o.a. Boontjes en Molenrak) en Oostbierum (inclusief Kimstergat) tonen een min of meer constante opvulling sinds de afsluiting van de Zuiderzee tot aan 1990, waar zowel zand als slib een significante rol hebben gespeeld (Figuur 2.11). In Oostbierum is zowel de netto opvulling van zand als slib sterker dan in Kornwerderzand, en lijkt de lineaire trend nog altijd door te zetten. In Kornwerderzand is de netto sedimentatie van zand afgenomen sinds 1990. Daarentegen lijkt de aanslibbende trend nog wel door te zetten. Colina Alonso et al. (2021) berekenden dat slib een aandeel van rond de 32% heeft aan de opvulling gemiddeld over de bekkens. Lokaal kan het slib een grotere bijdrage hebben.



Figuur 2.10 Berekende bijdrage van zand (links) en slib (rechts) aan de morfologische ontwikkeling van de bekkens in de periode 1933-2015 (Colina Alonso et al., 2021).



Figuur 2.11 Zand (rood) /slib (geel) opvulling van de deelgebieden “Kornwerderzand” (polygoon 3) en “Oostbierum” (polygoon 4) (Colina Alonso et al., 2021), en vergelijking met de gemiddelde zeespiegelstijging (grijs). Zie inzet voor de definitie van de polygoonen.

De sedimentbalans laat zien dat in de westelijke Waddenzee een netto sedimentatie plaatsvindt, waarbij de import van zand als reactie op de afsluiting van de Zuiderzee in bepaalde gebieden nabij de Afsluitdijk vrijwel tot stilstand is gekomen. De slibsedimentatie gaat onverminderd door en is vooral sterk langs de Friese kust. De netto sedimentatie van zand en slib is groter dan benodigd om te compenseren voor zeespiegelstijging en bodemdaling. Dit betekent dat er een verlanding van dit deel van de Waddenzee gaande is, vooral aan de achterzijde van de bekkens.

2.4 Samenvatting van de belangrijkste bevindingen

De grootschalige ontwikkeling van de kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie, waartussen de Boontjes zich bevindt, is sterk gestuurd door de afsluiting van de Zuiderzee. Door de afsluiting namen de getijslag en het getijprisma toe en veranderde de getijstrooming in de bekkens significant. Het hydrodynamische wantij (de plaats met minimale stroomsnelheden) tussen de bekkens van het Marsdiep en Vlie verschoof naar het oosten. Er vindt echter veel uitwisseling tussen de bekkens van het Marsdiep en het Vlie plaats en de positie van het morfologische wantij is lastig vast te stellen.

De morfologische respons op de afsluiting van de Zuiderzee wordt gekenmerkt door een sterke netto sedimentimport in deze bekkens. Aangesloten geulen vulden (grotendeels met slib) op terwijl langs het oostelijke deel van de Afsluitdijk erosie plaatsvond doordat de geul Doove Balg zich in oostelijke richting heroriënteerde en uitbreidde. In de jaren na de afsluiting tot op heden is een verondieping van het sublitorale gebied rondom de Boontjes te constateren. Daarnaast vond en vindt er veel slibsedimentatie plaats langs de kust van Friesland. Ook zeespiegelstijging en bodemdaling hebben de afgelopen eeuw tot een sedimentimport in de bekkens geleid, maar de bijdrage hiervan aan de import is aanzienlijk kleiner dan effect van de afsluiting.

3 Meso-schaal ontwikkeling rondom de Boontjes

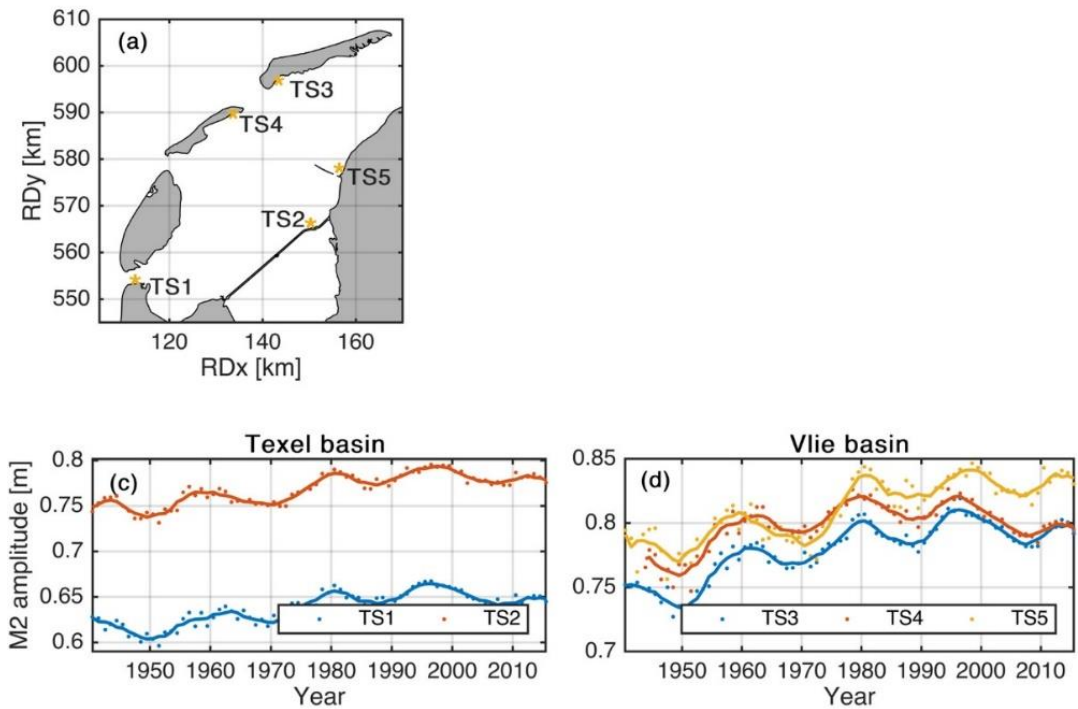
3.1 Recente veranderingen in de getijslag

Waterstandsmetingen in de Waddenzee tonen een toename in de getijslag rond de jaren '70. Dit blijkt uit de ontwikkelingen van de amplitude van de M₂-component (grootste component van het getij, veroorzaakt door de aantrekkingskracht van de maan) bij alle stations binnen de bekkens van het Zeegat van Texel en het Zeegat van het Vlie (zie Figuur 3.1). Deze toename wordt veroorzaakt door de toename van de hoogwaters (Figuur 3.2). De laagwaterstanden in de westelijke Waddenzee zijn de afgelopen decennia ook toegenomen, maar in veel minder sterke mate. Naast de toename in getijslag, hoogwaters en laagwaters is het effect van de zogenaamde 18.6-jarige cyclus zichtbaar als een golvende beweging. Deze langjarige fluctuatie veroorzaakt tijdelijke verhoging of verlaging van de getijslag en hoog- en laagwaters. De toename van de getijslag is ook geconstateerd in de Noordzee en vindt zijn oorsprong dus niet in de Waddenzee. De reden ervan is nog altijd onbekend (Nederhoff, Smits, & Wang, 2017; Hollebrandse, 2005).

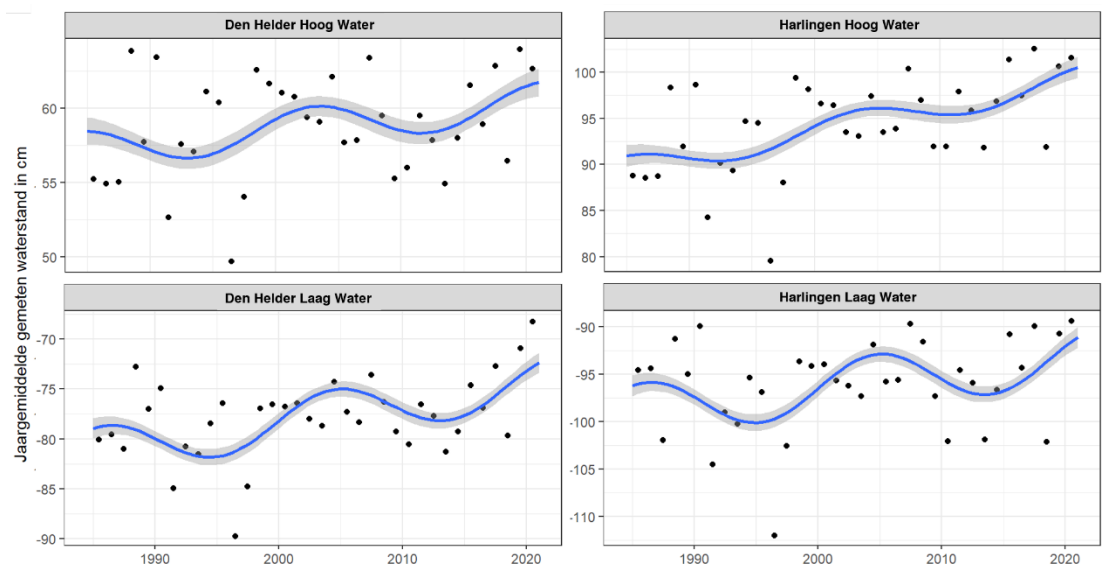
Toename van de getijslag leidt tot toename van het getijprisma. Daardoor nemen de stroomsnelheden toe en wordt de sedimenttransportcapaciteit verhoogd. Dit kan leiden tot meer dynamiek (bijvoorbeeld sterkere geulmigratie, meer transport van sediment). Toename van de getijslag kan ook leiden tot een toename in (intergetijden)accommodatieruimte, waar sediment kan bezinken. Indien de stijging van het gemiddeld hoogwater leidt tot grotere waterdieptes op de platen met grotere stroomsnelheden en/of golfwerking, wordt de sedimentatie belemmerd. Analyse op lokaal niveau kan uitwijzen welk proces (toename intergetijdengebied vs. toename dynamiek) sturend is voor de morfologische respons.

In het westelijke deel van de Waddenzee is het getij meer vloeddominant¹ geworden. Hiermee wordt hier bedoeld dat de maximale stroomsnelheden tijdens vloed hoger zijn dan tijdens eb, waardoor er meer sediment in vloedrichting kan worden getransporteerd. Vooral het transport van zand is gevoelig voor de asymmetrie in pieksnelheden. In theorie zou dit voor meer sedimentimport kunnen zorgen, maar Nederhoff et al. (2017) beargumenteren dat de waargenomen temporele veranderingen van de getijasymmetrie over de afgelopen decennia geen verklaring bieden voor de waargenomen veranderingen van de sedimentimport. In het westelijke deel van de Waddenzee is de import in de tijd immers afgenomen, maar de vloeddominantie van het getij is juist toegenomen. Dit betekent dat de veranderingen in getijasymmetrie niet sturend zijn voor de veranderingen in het netto sedimenttransport.

¹ volgens de definitie van het faseverschil $2\theta_{M_2} - \theta_{M_4}$, zie Nederhoff et al. (2017).



Figuur 3.1 Amplitude van de M2-component van het getij in Den Helder (TS1), Kornwerderzand (TS2), Harlingen (TS5), Vlieland haven (TS4) en West-Terschelling (TS3). Afkomstig uit: Colina Alonso et al. (2021).

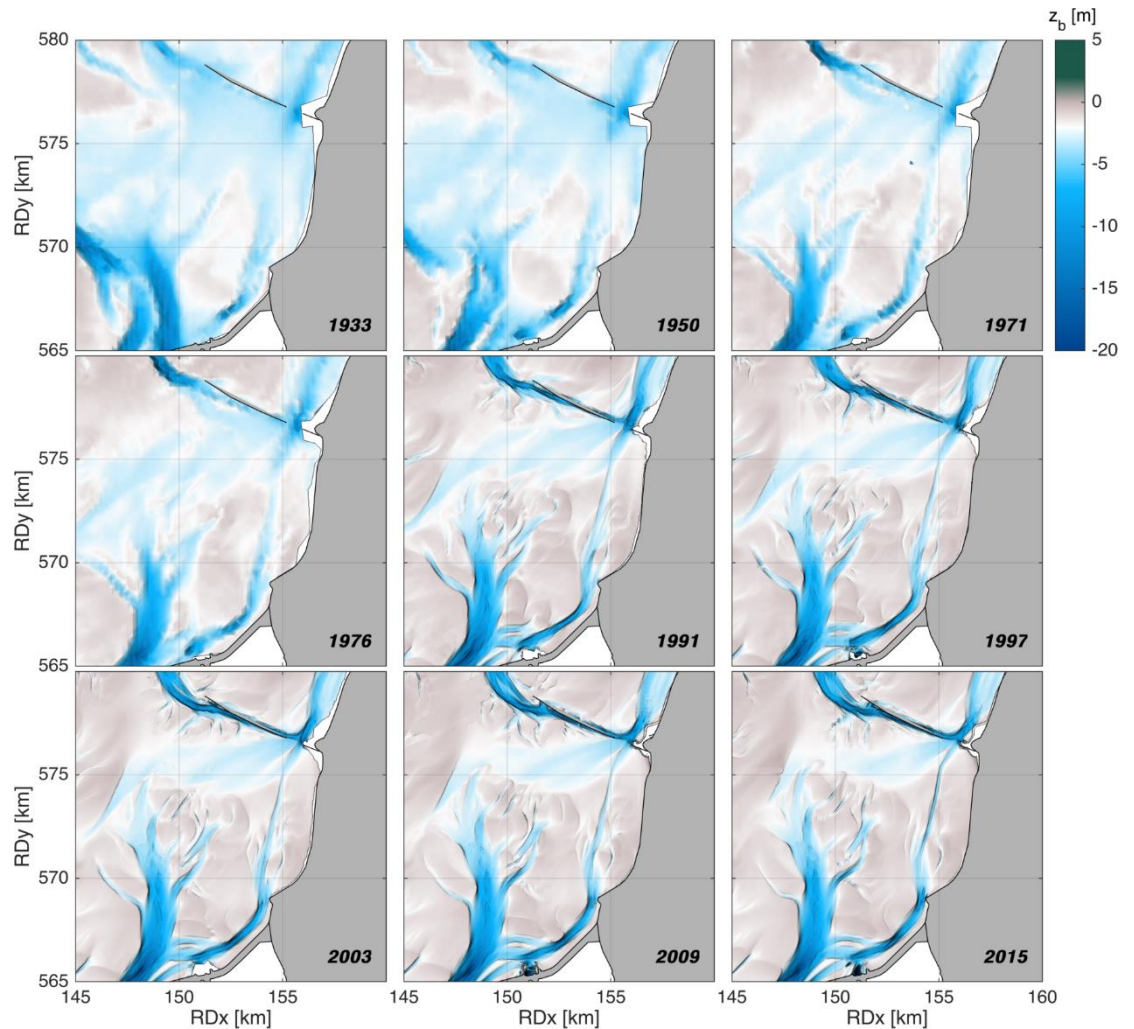


Figuur 3.2 Gemiddeld Hoog Water en Gemiddeld Laag Water in Den Helder en Harlingen. Afkomstig uit: Digitale Systeemrapportage Wadden (concept Deltares, 2021).

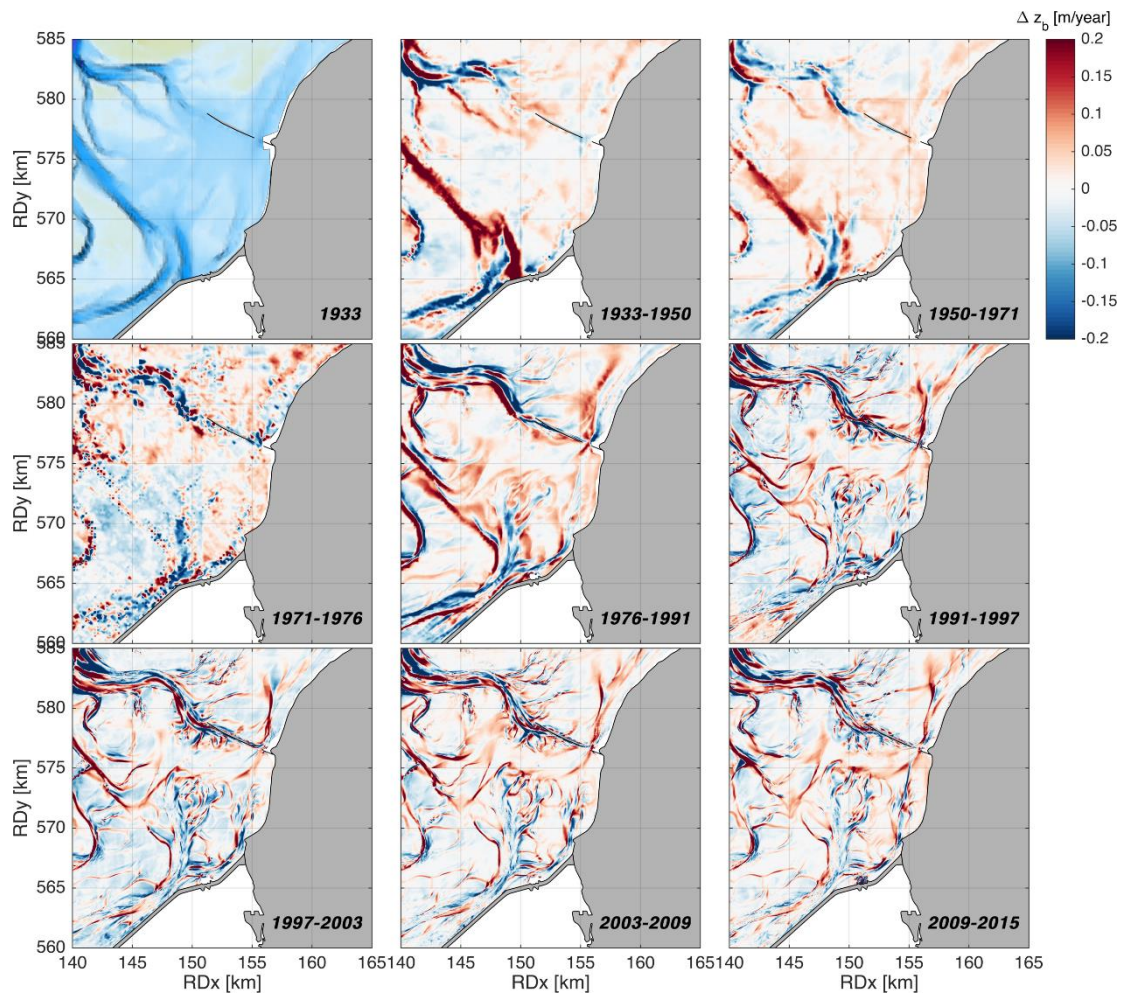
3.2 Morfologische ontwikkeling

Figuur 3.3 toont de bodemkaarten van het gebied rondom de Boontjes sinds de afsluiting van de Zuiderzee en Figuur 3.4 toont de erosie/sedimentatiekaarten voor verschillende periodes. Ook hier in de grootschalige sedimenterende trend van het gebied (zoals besproken in paragraaf 2.1.3 en 2.3) goed te zien. Daarbinnen vallen een aantal trends op:

1. De opvulling van wat voorheen ondieptes waren (rondom het huidige Molenrak bijvoorbeeld).
2. De al bestaande platen zijn opgehoogd en zijwaarts uitgebreid, met als gevolg een afname van het areaal aan sublitorale gebieden.
3. De geul Boontjes is aanzienlijk smaller geworden en na de drempelverwijdering ook dieper.
4. Er lijken lokale verdiepingen te zijn opgetreden in sommige geulen, zoals de Doove Balg en de zuidelijke delen van de Boontjes.



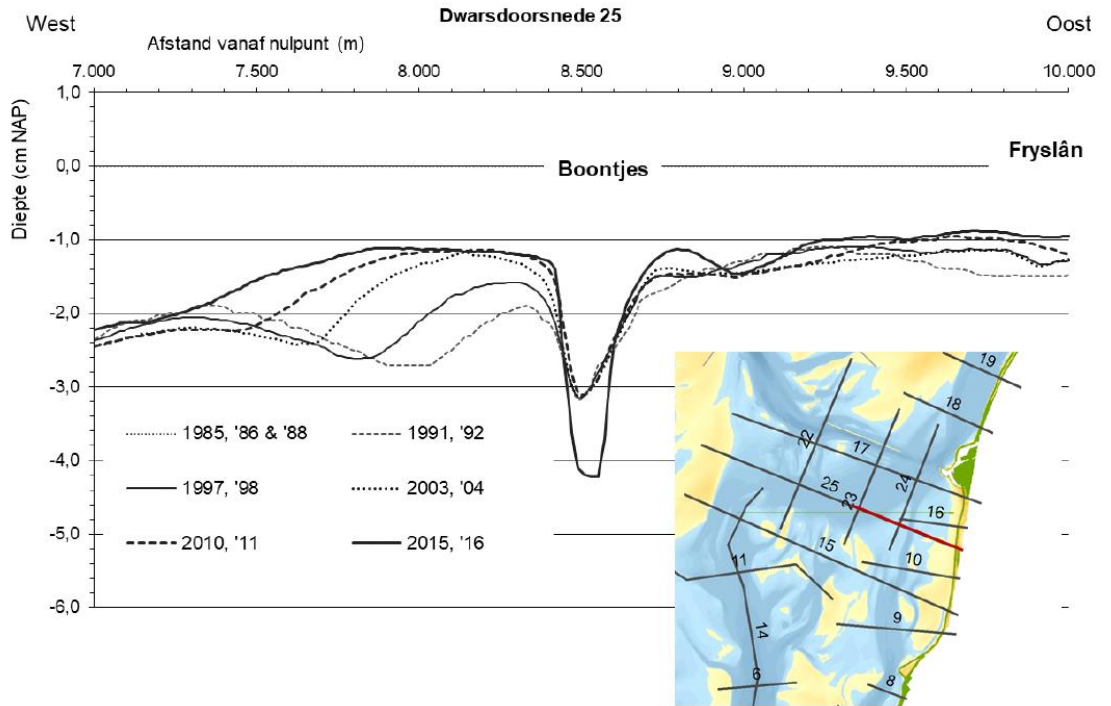
Figuur 3.3 Bodemligging van de meso-schaal morfologie rondom de vaargeul Boontjes (Vaklodingen data).



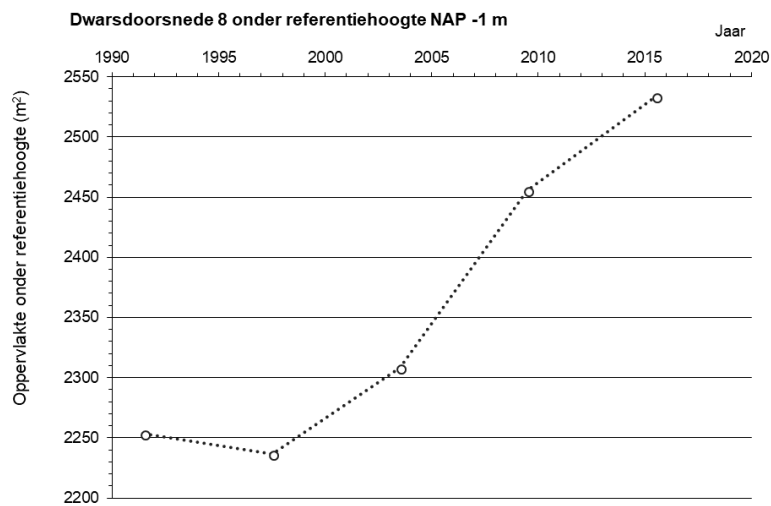
Figuur 3.4 Overzicht van de sedimentatie/erosie rondom de Boontjes sinds de afsluiting van de Zuiderzee, berekend voor de individuele periodes tussen de lodingen. De figuur linksboven toont de bodemligging in 1933.

Figuur 3.5 toont dwarsdoorsnede 25, die dwars door het drempelgebied loopt waar het meeste aanlegbaggerwerk heeft plaatsgevonden. Het gevolg van het baggeren is de verdieping van de geul in de bodemopname van 2015-2016 ten opzichte van alle voorgaande opnames (van voor de drempelverwijdering). In deze dwarsdoorsnede is ook zichtbaar dat ten westen van de vaargeul het ondiep gebied van jaar op jaar omhoog komt en aan het uitbreiden is. Ten oosten van de vaargeul is de ondiepte geleidelijk steeds ondieper geworden. Dit is niet alleen in deze dwarsdoorsnede het geval: in het hele noordelijk deel van de Boontjes is sprake van sedimentatie. In dit gebied van de Boontjes was voordat de baggerwerkzaamheden plaatsvonden ook sprake van een afname van het doorstroomoppervlakte van de geul.

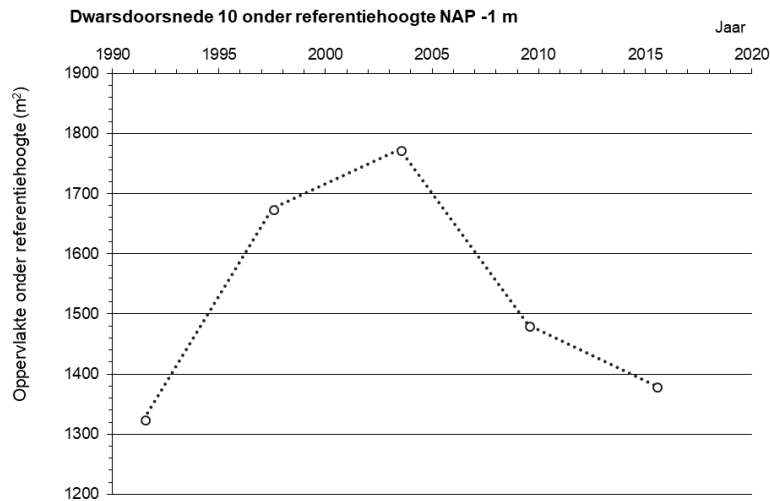
Het zuidelijke deel van de Boontjes laat een tegenovergestelde trend zien: hier neemt de omvang van de geul toe. Figuur 3.6 laat in een grafiek de toename van de doorstroomoppervlakte zien na 1997/1998. Deze ontwikkeling gaat gelijk op met een toename van de omvang van de meer westelijk gelegen Doove Balg. Het knippunt in de ontwikkeling van de Boontjes, met in het noorden afname van de geuldoorsnede en in het zuiden toename van de geuldoorsnede, lijkt geleidelijk naar het zuiden op te schuiven. Dit is zichtbaar in de grafiek met de doorstroomoppervlakte van dwarsdoorsnede 10 (Figuur 3.7), die in eerste instantie een toename laat zien van de doorstroomoppervlakte, gevolgd door een afname.



Figuur 3.5 Dwarsdoorsnede 25 door de vaargeul Boontjes en de aangrenzende ondieptes (zie inzet voor locatie) (Oost et al., 2019).

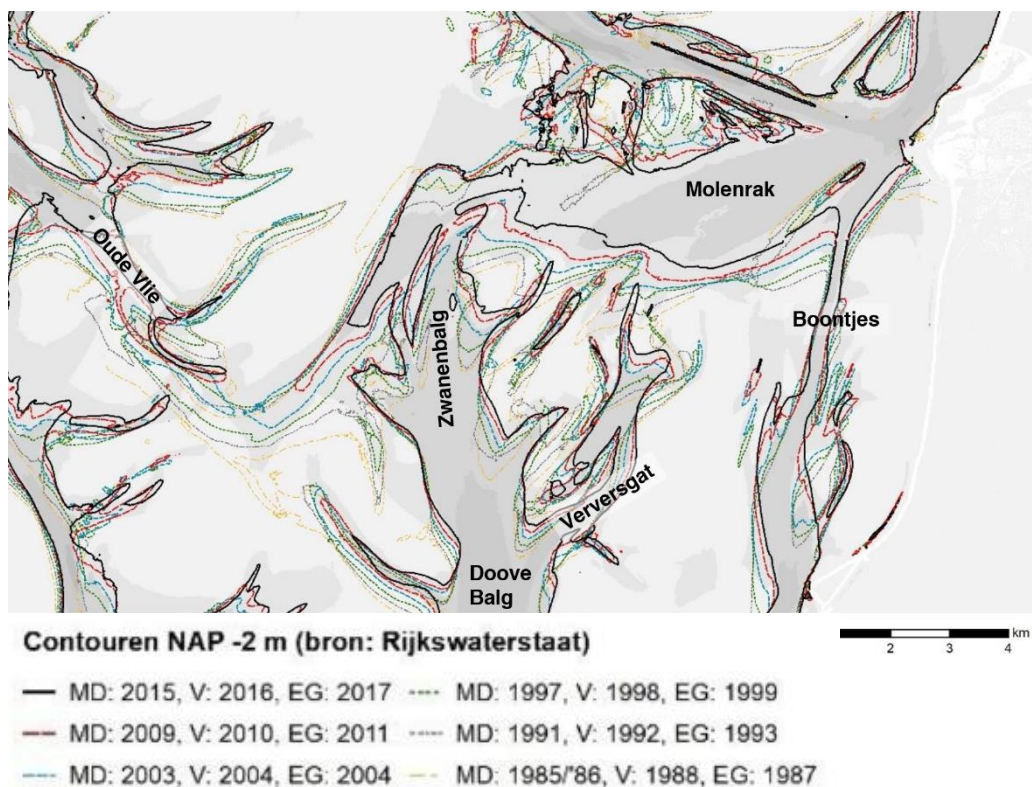


Figuur 3.6 Doorstroomoppervlakte van de Boontjes in dwarsdoorsnede 8 (zie voor locatie de inzet in Figuur 3.5)(Oost et al., 2019).



Figuur 3.7 Doorstroomoppervlakte van de Boontjes in dwarsdoorsnede 10 (zie voor locatie inzet in Figuur 3.5). (Oost et al., 2019).

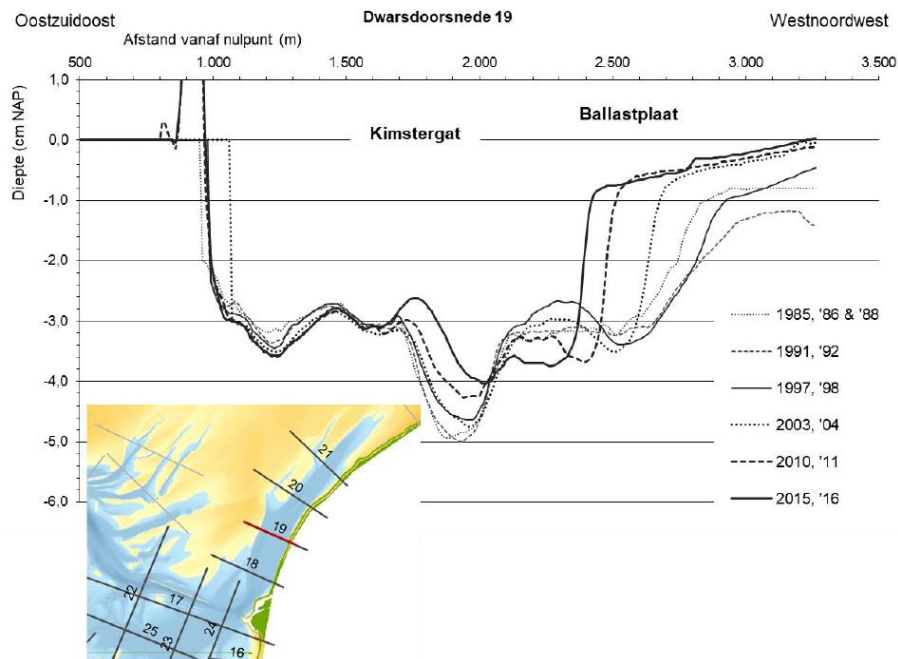
Als we kijken naar de andere geulen ten zuiden van de Pollendam, dan is hier een trendmatige verandering zichtbaar: vrijwel alle geulen verplaatsen naar het noordoosten/noordnoordoosten (zie Figuur 3.8). Dit geldt ook voor de zuidrand van het Molenrak, die daarnaast ook smaller wordt omdat de aan de noordzijde grenzende ondiepte juist naar het zuiden uitbreidt (zie ter aanvulling ook Figuur 3.3).



Figuur 3.8 Kaart met de NAP -2 m contour in de omgeving ten zuiden en zuidwesten van de Pollendam voor verschillende jaren (Oost et al., 2019).

De evolutie van de noordelijke Boontjes toont belangrijke overeenkomsten met de morfologische evolutie van de in het verlengde liggende Kimstergat (Figuur 3.9). Hier is de doorstroomoppervlakte zeer gestaag is afgenomen. Waarschijnlijk is deze afname gerelateerd

aan de afname van het kombergingsvolume door sedimentatie op de Vlakte van Oosterbierum (zie ook Figuur 2.11). Een soortgelijk fenomeen lijkt ook te spelen in de Boontjes, waar door het ophogen en uitbreiden van de omliggende platen het kombergingsvolume afneemt. Het is (nog) niet duidelijk welke effect de sedimenterende trend in het Kimstergat heeft op de ontwikkeling van de Boontjes.



Figuur 3.9 Dwarsdoorsnede 19 van het Kimstergat ten noordoosten van Harlingen (zie inzet voor locatie). (Oost et al., 2019).

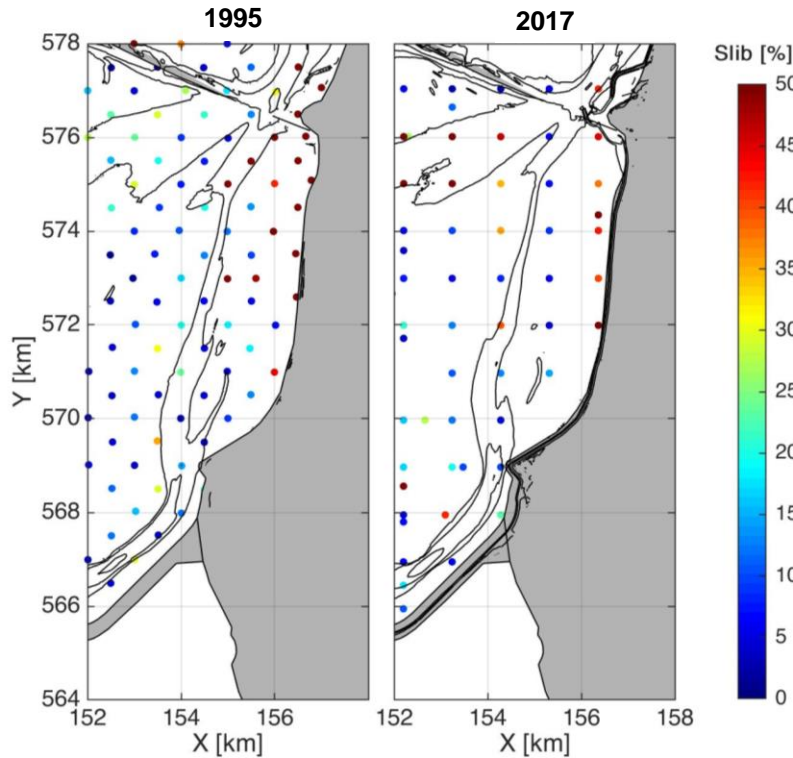
De sedimentatie in het Kimstergat is, evenals de sedimentatie in de vaargeul Boontjes, waarschijnlijk onderdeel van de zeer langjarige aanpassingen die plaatsvinden in de westelijke Waddenzee na de afsluiting van de Zuiderzee. Vanwege verschillende complementaire processen (zoals getij asymmetrie, lag effecten, resuspensie door golven, biologische activiteit en estuarine circulatie) vindt vooral veel sedimentatie van slib plaats in dit gebied dat aan het landwaartse einde van de kombergingsgebieden ligt. Dezelfde processen leiden ook tot de sedimentatie van slib (en een beetje zand) in de haven van Harlingen. Die sedimentatie maakt het nodig om de haven op diepte te brengen door baggeren. Oost et al. (2019) beargumenteren dat het niet zo is dat het baggeren van de haven van Harlingen en het vervolgens verspreiden van de baggerspecie in het Kimstergat leidt tot het sedimenterende gedrag in het Kimstergat en op de Vlakte van Oosterbierum. Het baggeren en verspreiden is echter wel een herverdeling van het sediment die de sedimenttoevoer naar het Kimstergat vergroot. De verdieping van de geul Boontjes is te verklaren door de omhoog komende platen, die leiden tot een geconcentreerde afvoer door een kleiner gebied. Door verkleining van het getijvolume bij ophogende platen, neemt het debiet door de Boontjes naar verwachting ook af. De gestaagde verschuiving naar het zuiden van het knikpunt van de ontwikkeling in de Boontjes (met in het noorden afname van de geul en in het zuiden toename van de geul) lijkt een voorstadium voor algehele verondieping van het gebied en terugtrekking van de geul.

3.3 Sedimentsamenstelling bodem

In Figuur 3.10 is verder ingezoomd op de bodemsamenstelling rondom de vaargeul Boontjes voor de periode rondom 1995 (Sedimentatlas Waddenzee) en 2017 (data van de meetcampagnes SIBES & Waddenmozaïek). In beide periodes is het gemeten

bodemsediment in en rondom de Boontjes voornamelijk zandig (niet-cohesieve zand-silt-klei mengsels). Uitzondering hierop is het plaatgebied ten oosten van de geul, waar slibgehaltenes (silt + klei) oplopen tot meer dan 50%. In 1995 zijn deze slibgehaltenes ook in de geul zelf waargenomen. In recente metingen zijn deze locaties niet bemonsterd.

Folmer et al., (2017) toonden aan dat de intergetijdenplaten in de Waddenzee (en dus niet het subgetijdengebied rondom de Boontjes) gemiddeld genomen iets slibarmer zijn geworden in de periode 2008-2013. Dit is een korte termijn trend, die afwijkt van de lange termijn ontwikkeling waarbij we langs de Friese kust een sterke slibsedimentatie zien.



Figuur 3.10 Lokaal slibgehalte in de toplaag van de bodem. Links: 1995, *Sedimentatlas Waddenzee*. Rechts: 2017, *SIBES & Waddenmozaïek*.

Een kwantitatieve analyse van veranderingen in het bodemslibgehalte is voor het studiegebied niet mogelijk om twee redenen:

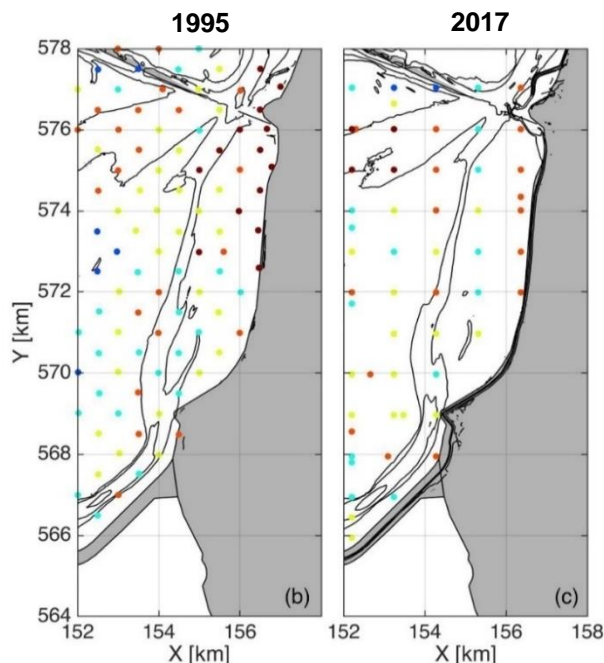
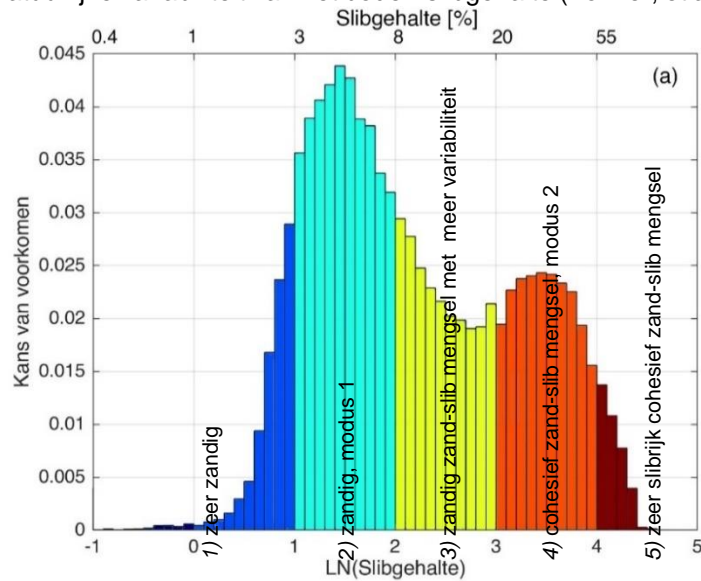
1. Er is maar van twee momenten bodemdata beschikbaar. Gezien de sterke natuurlijke variabiliteit van het slibgehalte, is dit niet voldoende voor een analyse van veranderingen ten opzichte van natuurlijke fluctuaties.
2. De data van 1995 en 2017 zijn op verschillende locaties bemonsterd. Interpretatie van geïnterpoleerde data (om beide periodes kwantitatief te vergelijken) zou door de geringe ruimtelijke resolutie van de metingen (500-1000 m) ten opzichte van de schaal van het interessegebied (enkele kilometers) kunnen leiden tot verkeerde conclusies die sterk beïnvloed zijn door data-artefacten afkomstig van de interpolatiemethode.

Om de datasets op een robuuste manier met elkaar te kunnen vergelijken, zijn deze omgezet in sedimentklassen, gebaseerd op de bimodale verdeling van het slibgehalte. Herman et al. (2018) toonden aan dat het slibgehalte in de Waddenzee bimodaal verdeeld is: slibgehaltenes zijn ofwel laag, ofwel relatief hoog en slibgehaltenes daartussenin komen minder voor. Deze bimodaliteit is zowel in het litoraal als in het sublitoraal te vinden (Colina Alonso, et al., in prep.). Figuur 3.11 (bovenste paneel) toont deze verdeling voor de Nederlandse Waddenzee en de hieruit afgeleide sedimentklassen:

- (1) zeer zandig;
- (2) zandig, modus 1
- (3) zandig zand-slib mengsel met minder kans van voorkomen en meer variabiliteit;
- (4) cohesief zand-slib mengsel, modus 2;
- (5) zeer slibrijk cohesief zand-slib mengsel.

De onderste panelen van Figuur 3.11 tonen de data omgezet naar deze klassen.

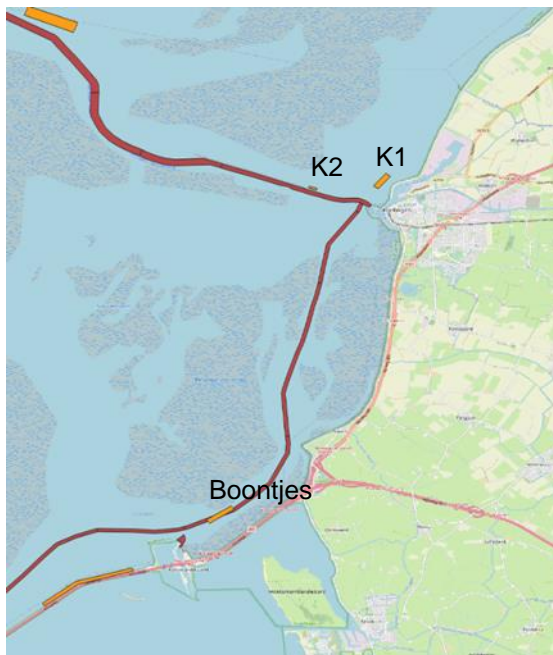
Het gebied rondom de noordelijke Boontjes (bij X=155 km, Y=575 km) en ten oosten ervan lijkt slibarmer te zijn geworden, terwijl het gebied ten westen van de vaargeul Boontjes slibrijker is geworden: in jaren '90 was dit gebied niet-cohesief terwijl er nu duidelijk cohesief sediment te vinden is (slibgehaltenes > 30%). In het gebied rondom de zuidelijke Boontjes zijn er geen opvallende verschillen waargenomen (enkel een lichte toename van de slibgehaltenes ter hoogte van X=152 km). Echter blijft dit niet-cohesief sediment en de toename kan te wijten zijn aan de natuurlijke variabiliteit van het bodemslibgehalte (Folmer, et al., 2017; Colina Alonso A. , 2020).



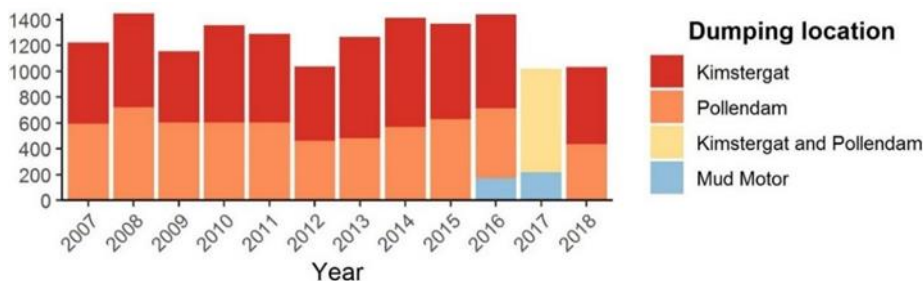
Figuur 3.11 Totale kans van voorkomen in de Nederlandse Waddenzee (a) en ruimtelijke verdeling (b,c) van het slibgehalte in de bodem, na log-transformatie (b: Sedimentatlas. c: SIBES & Waddenmozaïek)

3.4 Baggeren en verspreiden rondom de Boontjes

In hoofdstuk 4 wordt in detail ingegaan op de baggervolumes in de Boontjes sinds de drempelverwijdering. Voor de drempelverwijdering werd er in de Boontjes niet gebaggerd. De gebaggerde volumes worden verspreid op twee locaties ten noorden en zuiden van de Boontjes (zie Figuur 3.12). Daarnaast wordt in de haven van Harlingen zo'n 1 – 1,4 miljoen m³/j gebaggerd. Dit wordt verspreid vlakbij de haveningang op K1 en K2 (zie Figuur 3.13).



Figuur 3.12 Bagger- en stortlocaties in de buurt van de vaargeul Boontjes, respectievelijk weergegeven in rood en oranje



Figuur 3.13 Verspreide volumes en locaties K1 (Kimstergat) en K2 (Pollendam) van de haven van Harlingen in 1.000 m³/jaar. Bron: Baptist et al. 2019.

3.5 Samenvatting van de belangrijkste bevindingen

Rondom de vaargeul Boontjes waren de belangrijkste morfologische ontwikkelingen in het decennium vóór de drempelverwijdering sedimentatie in het noordelijke gebied rond de vaargeul (uitbreiding van de westelijke platen en ophoging van het intergetijdengebied ten oosten ervan) en erosie van het zuidelijke gebied (toename van geulomvang). De verdieping van de geul is te verklaren door de omhoog komende platen, die leidden tot een geconcentreerde afvoer door een kleinere doorsnede. De overgang van de ontwikkeling in de Boontjes, met in het noorden afname van de geuldoorsnede en in het zuiden toename van de geuldoorsnede, verschuift geleidelijk naar het zuiden. Dit lijkt een voorstadium voor algehele verondieping van het gebied en terugtrekking van de geul.

Het gemeten bodemsediment in en rondom de Boontjes was zowel in 1995 als in 2017 voornamelijk zandig, behalve het plaatgebied ten oosten van de geul, waar slibgehalten oplopen tot meer dan 50%. Het gebied rondom de noordelijke Boontjes en ten oosten ervan lijkt slibbarmer te zijn geworden, terwijl het gebied ten westen van de vaargeul Boontjes slibrijker is geworden. In het gebied rondom de zuidelijke Boontjes zijn er geen opvallende verschillen in bodemsamenstelling waargenomen. Door het beperkte aantal metingen in de tijd en de verschillende locaties van de metingen is het niet goed mogelijk om trends kwantitatief te onderzoeken.

4 Vaargeul Boontjes en de rol van baggeren

In dit hoofdstuk wordt ingezoomd op de vaargeul Boontjes. Eerst worden de aanpak en bevindingen van eerdere studies naar de drempelverwijdering en de baggerwerkzaamheden samengevat (paragraaf 4.1). Vervolgens wordt een analyse gepresenteerd van de ontwikkeling van de baggerwerkzaamheden (paragraaf 4.2). Vervolgens worden recente dieptepeilingen geanalyseerd en wordt het voorkomen van fluid mud bestudeerd (paragraaf 4.3). De bovenstaande bevindingen komen samen in een sedimentbalans van de vaargeul (paragraaf 4.4). Tenslotte worden de mogelijk studerende processen besproken die zouden kunnen leiden tot de waargenomen sedimentatie in de vaargeul (paragraaf 4.5).

4.1 Eerdere studies en analyses

4.1.1 Inschatting vóór drempelverwijdering

In de planstudie die voorafging aan de drempelverwijdering is met een modelstudie onderzocht hoe groot het verwachte baggervolume voor vaargeulonderhoud zou zijn na verwijdering van de drempel. Hierbij is gebruik gemaakt van een Waqua-model met een roosterresolutie van 30x20 m en bodemdata uit de Vaklodingen 2009. De hydrodynamica werd gemodelleerd voor één springtij-doodtijcyclus in combinatie met drie representatieve windrichtingen met mediane windsnelheid. Sedimenttransport werd gemodelleerd aan de hand van de Van Rijn-transportformule, waarschijnlijk zonder terugkoppeling in de morfologie. Uit de resultaten bleek dat de afvoer door de geul na drempelverwijdering zou toenemen. Op basis hiervan werd geconcludeerd dat er weinig tot geen toename van de baggervolumes voor vaargeulonderhoud te verwachten viel, te weten 0 m³ tot maximaal 20.000 m³ per jaar (Ouwkerk en Vuik, 2012).

4.1.2 Inschatting op basis van gerealiseerde baggervolumes direct na drempelverwijdering

Herman Mulder heeft in een eerdere analyse (Mulder & Overbeek, 2019) verschillende constatering gedaan:

- Tijdens de aanleg is er in 2013 een groter volume gebaggerd dan het aanlegvolume (ca. 170.000 m³ meer op een totaal volume van ca. 700.000 m³). Vermoedelijk is daarbij een overdiepte aangebracht, waardoor een marge is ontstaan die voor meer dan een jaar toereikend was.
- De relatief geringe sedimentatie in 2014 (in verhouding tot de jaren erna) maakt het aannemelijk dat er in 2014 niet gebaggerd werd, al voldeden de geuldimensies ook in 2014 niet aan de streefdiepte.
- Het overschot van gebaggerd volume tijdens de aanleg is ongeveer even groot als het baggervolume aan onderhoudswerkzaamheden in 2015 (ca. 170.000 m³).

Op basis van deze constatering werd ingeschat dat het benodigde baggervolume voor onderhoudswerkzaamheden ca. 160.000 m³ per jaar zou bedragen, wat aanzienlijk meer is dan de 20.000 m³ per jaar uit de planstudie.

4.2 Ontwikkeling baggervolumes: 2012 tot heden

Om te kunnen begrijpen waarom de baggervolumes zijn toegenomen en veel groter zijn dan vooraf ingeschat, wordt in detail gekeken naar de ontwikkeling van de baggervolumes en de dichtheid van het gebaggerde materiaal. Veranderingen in de dichtheid van het materiaal zijn aanwijzing dat er ander materiaal wordt gebaggerd (bijv. meer slib dan vooraf ingeschat). Dit

heeft effect op de baggervolumes. Er zijn hiervoor verschillende databronnen gecombineerd, die helaas niet allemaal de volledige periode na drempelverwijdering beslaan.

4.2.1 Databronnen en methode

Voor de analyse van de baggervolumes sinds de drempelverwijdering wordt gebruikt gemaakt van een drietal databronnen:

1. Voor de periode vanaf de drempelverwijdering tot december 2016 zijn enkel geschatte volumes beschikbaar.
2. De Reizen-database, waarin de baggerwerkzaamheden sinds december 2016 (toen Gebroeders Van der Lee begon met het vaargeulonderhoud) worden geregistreerd. Hierin zijn het tijdstip, het vaartuig, het type werkzaamheid (zuigen, agiteren of ploegen) en het gemeten beunvolume geregistreerd. De locatie van baggeren en verspreiden wordt geregistreerd met gebiedsaanduidingen. Voor de Vaargeul Boontjes gaat het om één baggergebied en twee verspreidingslocaties: verspreidingsvak Boontjes ten zuiden en verspreidingsvak Kimstergat (K1) ten noorden van de geul (zie Figuur 3.12 en Figuur 3.13).
3. In de MARS-database worden de GPS-coördinaten van de sleephopperzuiger Mette Maria, die verantwoordelijk is voor het merendeel van de baggerwerkzaamheden in dit gebied, geregistreerd sinds 2017. Dit maakt het mogelijk per vaartocht terug te zien waar het materiaal is opgezogen en waar het naartoe is gebracht. Het MARS-systeem registreert de massa in tds en de soortelijke dichtheid (op basis van inzinking van het schip t.o.v. het beunvolume) volautomatisch. De soortelijke dichtheid wordt sinds 31 juli 2019 geregistreerd en is dus niet voor de gehele periode 2016 tot heden beschikbaar. Daarnaast ontbreken een aantal waardes voor de soortelijke dichtheid van werkzaamheden in oktober en november 2020. De baggeraar (Gebroeders Van der Lee) geeft aan dat het MARS-systeem wat problemen heeft gekend vanwege de ondieptes nabij de vaargeul Boontjes, waarvoor het systeem niet ontworpen is (i.e. druksensoren geven afwijkende waardes wanneer met de buik van het schip door slib wordt gevaren).

Door deze registratie in twee losse databases ontbreekt de directe koppeling tussen de locatie aan de ene kant en het type werkzaamheden en volume aan de andere kant. Dit wordt – vanwege de grote omvang van de data en beperkte automatische leesbaarheid – enkel steekproefsgewijs bekeken voor de maanden waarin veel materiaal gebaggerd is (niet gerapporteerd) en meegenomen in de interpretatie.

Daarnaast heeft een aantal keer overleg met de baggeraar waardevolle informatie opgeleverd over de baggerwerkzaamheden.

Dichtheid van het gebaggerde materiaal en omrekening naar massa (tds)

Om het gemeten beunvolume om te rekenen naar een massa in tonnen droge stof (tds) wordt er voor de Reizen-database gebruik gemaakt van een vaste omrekenfactor. Deze omrekenfactor is dus niet bepaald aan de hand van in-situ metingen en ook niet afhankelijk van de precieze locatie of het tijdstip van de baggerwerkzaamheden. Voor de baggerwerkzaamheden in de Vaargeul Boontjes wordt als dichtheid $1,65 \text{ ton/m}^3$ (ex-situ, achteraf bepaald in het lab) aangenomen en een omrekenfactor van $1,056 \text{ tds/m}^3$ (ex-situ) gehanteerd.

De soortelijke dichtheid in de beun uit het MARS-systeem wordt vergeleken met de aangenomen dichtheid uit de Reizen-database (omrekenfactor van $1,056 \text{ tds/m}^3$) om een idee te krijgen van de samenstelling van het opgezogen sedimentmengsel. Voor 42% van het totaal gebaggerde volume is de soortelijke dichtheid in de beun gemeten.

Voor zover de soortelijke dichtheid is geregistreerd in het MARS systeem kan deze worden gebruikt om de gebaggerde massa nauwkeuriger in te schatten. Dit geeft een redelijk beeld van de in-situ bodemsamenstelling, maar geen exacte waarde voor de in-situdichtheid vanwege *overflow* van de beun en verschillen in pakkingsdichtheid.

Voor de omrekening van soortelijke dichtheid naar droge dichtheid van het mengsel (i.e. gebaggerde droge sedimentmassa per eenheid volume) wordt de volgende formule gebruikt:

$$\rho_{droog,bulk} = \frac{\rho_{nat} - \rho_w}{\rho_s - \rho_w} * \rho_s$$

Met:

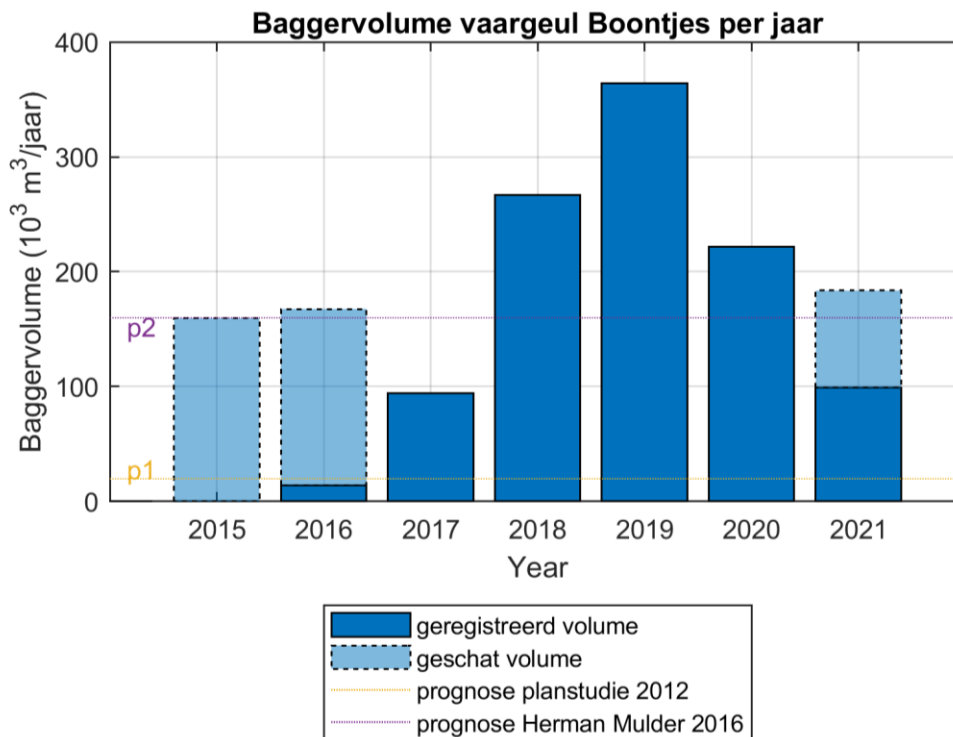
- ρ_s droge dichtheid van het sediment ($\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$)
- ρ_w dichtheid van water ($\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$)

Het omrekenen van de baggervolumes naar massa's is niet triviaal, omdat de gegevens niet compleet zijn. Op basis van de beschikbare gegevens worden twee inschattingen met een ondergrens en een bovengrens gemaakt:

- Eerste inschatting, het gemiddelde van de onder- en bovengrens, die als volgt bepaald zijn:
 - Ondergrens: De geregistreerde massa aan gebaggerd materiaal (geregistreerde tds uit het MARS-systeem). Omdat niet alle baggerwerkzaamheden zijn geregistreerd in MARS, geeft dit een aanzienlijke onderschatting van de daadwerkelijk gebaggerde massa.
 - Bovengrens: Massa bepaald op basis van omrekening van beunvolume naar tds middels een vaste omrekenfactor van $1,056 \text{ tds/m}^3$, dit volgt direct uit de Reizen-database. Deze omrekenfactor is echter niet nauwkeurig, aangezien de soortelijke dichtheid uit de MARS-database een stuk lager is dan 1056 kg/m^3 . Het gebruik van de vaste omrekenfactor geeft daardoor een overschatting van de gebaggerde massa.
- Verbeterde inschatting: dit is het totaal van de geregistreerde massa (d.w.z. de ondergrens, 42% van het totaalvolume) plus de inschatting van de massa voor het ontbrekende deel op basis van de geregistreerde soortelijke dichtheid. Voor de 58% van het gebaggerde materiaal waarvoor de massa niet in MARS geregistreerd was, is een aanname gemaakt voor de droge dichtheid op basis van de 42% waarvoor dit wel bekend is. Voor de verbeterde inschatting is hiervoor 500 kg/m^3 gebruikt. Dit is het *gemiddelde* van de geregistreerde soortelijke dichtheid omgerekend naar droge dichtheid. Hiernaast wordt ook een onder- en een bovengrens aangegeven:
 - Ondergrens: aanname voor ontbrekende soortelijke dichtheden is de mediane waarde voor de geregistreerde soortelijke dichtheden omgerekend naar een droge dichtheid van 353 kg/m^3 (zie Figuur 4.2).
 - Bovengrens: aanname voor ontbrekende soortelijke dichtheden is de vaste omrekenfactor van $1,056 \text{ tds/m}^3$. Dit is anders dan de bovengrens uit de eerste inschatting, omdat deze omrekenfactor daar voor alle data werd gehanteerd en voor de verbeterde inschatting alleen voor de ontbrekende data.

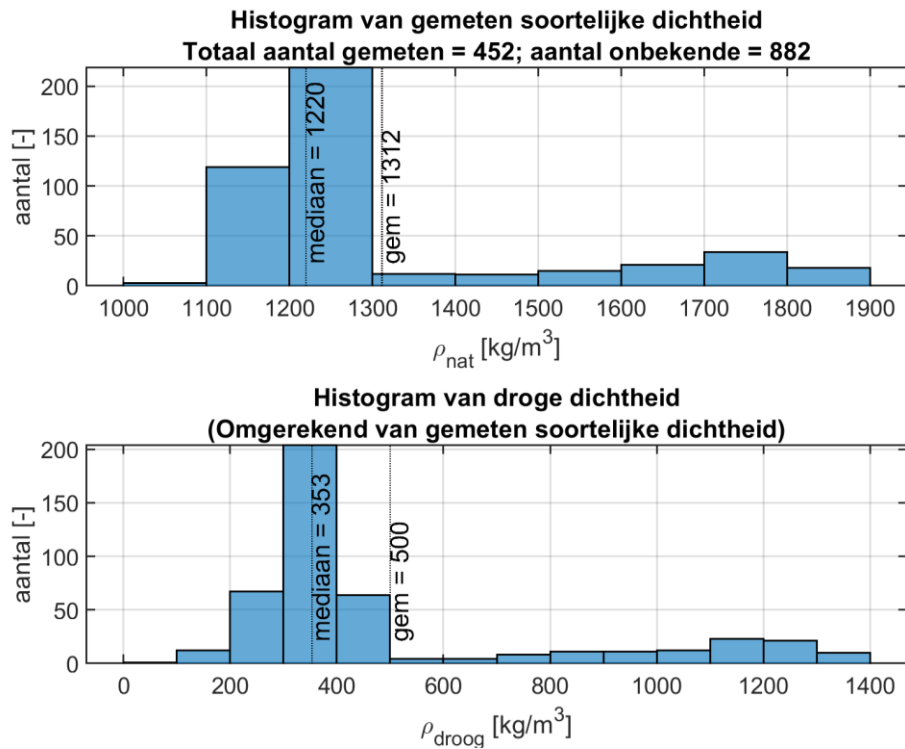
4.2.2 Baggervolume en gebaggerde massa

Door de gegevens uit de Reizen-database per jaar te sommeren blijkt dat de gebaggerde volumes tussen 2017 en 2019 sterk zijn toegenomen van 94.000 m³/j naar 364.000 m³/j (zie Figuur 4.1). In 2020 is het gebaggerde volume weer iets afgenomen naar 222.000 m³/j, nog altijd een orde groter dan de 20.000 m³/j uit de planstudie. De baggeraar (Gebroeders Van der Lee) is toen vermoedelijk minder diep gaan baggeren en heeft het doorvaarbare slib meer laten zitten. Verder zijn ook de geschatte volumes uit 2015 en 2016 meegenomen in de figuur en de data tot juli 2021 geëxtrapoleerd tot het einde van het jaar.



Figuur 4.1 Geregistreerd beunvolume per jaar in de Vaargeul Boontjes. Let op: de data van 2016 bevat enkel baggerwerkzaamheden uit december 2016; de data van 2021 bevat de werkzaamheden tot juli 2021 plus een eenvoudige daggemiddelde prognose voor de rest van het jaar.

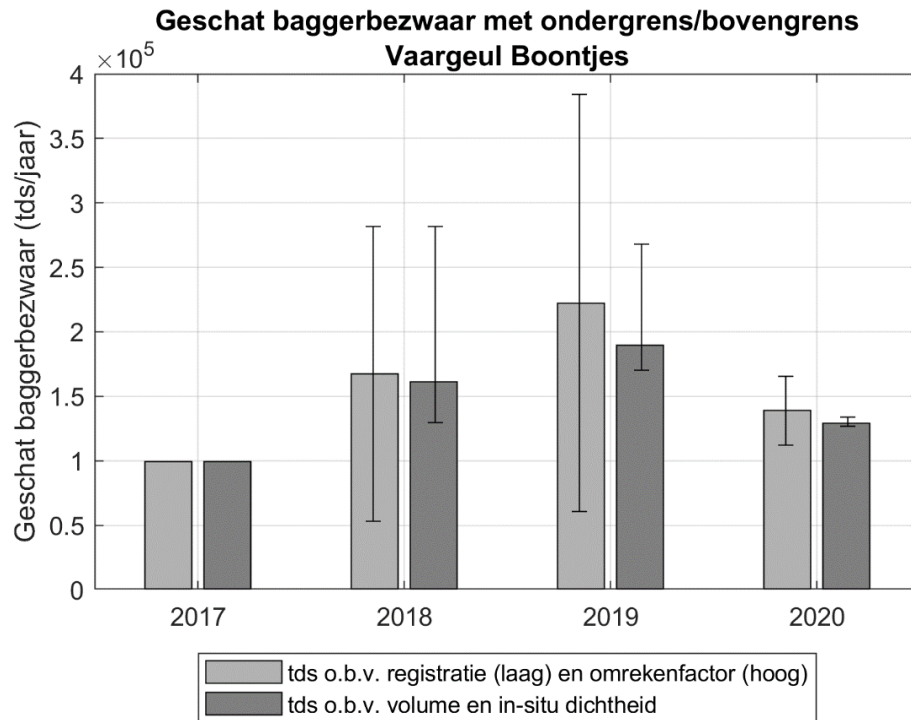
De in de beun bepaalde soortelijke dichtheden uit het MARS-systeem suggereren dat er naast zandig materiaal met een natte dichtheid van ongeveer 1650 kg/m³ veel slibrijk materiaal met een natte dichtheid van 1100-1300 kg/m³ wordt gebaggerd (zie histogram in Figuur 4.2). De relatief lage geregistreerde dichtheden zijn veroorzaakt door een andere samenstelling van het gebaggerde materiaal. Het is niet duidelijk of dit veroorzaakt wordt door een veranderde samenstelling van het bodemsediment, of bijvoorbeeld doordat baggerwerkzaamheden zijn uitgevoerd op andere locaties dan voorheen of op een andere diepte is gebaggerd. De baggeraar (Gebroeders Van der Lee) geeft aan dat het systeem naar hun indruk slibrijker is geworden in recente jaren (pers. comm. Teun Lassche). Sinds 2020 wordt hierop geanticipeerd door dieper te baggeren, vermoedelijk zijn hierdoor de baggervolumes vanaf 2020 weer licht afgenomen.



Figuur 4.2 Histogrammen van alle in-situ gemeten dichtheden (bovenste paneel) en omgerekend naar droge dichtheden (onderste paneel) volgens formule uit paragraaf 0 met mediane dichtheid en gemiddelde dichtheid weergegeven als stippellijnen

In Figuur 4.3 zijn de gebaggerde massa per jaar bepaald voor de volledig geregistreerde jaren 2017 tot en met 2020 op basis van de omrekening uit paragraaf 4.2.1. Het totaal betreft 0,7 miljoen ton droge stof indien de geregistreerde massa's worden gebruikt (minimaal 0,34 miljoen tds en maximaal 1,05 miljoen tds) tussen 2016 en 2021. De verbeterde inschatting op basis van volumes heeft voor dezelfde periode een totaal van 0,73 miljoen ton droge stof (minimaal 0,57 miljoen tds en maximaal 0,88 miljoen tds).

De geschatte toename tussen 2017 en 2019 is niet langer ongeveer een factor 4 zoals op basis van volume wordt ingeschat, maar eerder richting een factor 2-2,5. Dit betekent dat een deel van de volumetoename kan worden verklaard door een gewijzigde sedimentsamenstelling van het gebaggerde materiaal. Daarnaast laten de massa's (in tds) ook nog steeds een toename zien, ofwel meer sedimentatie sinds de drempelverwijdering.

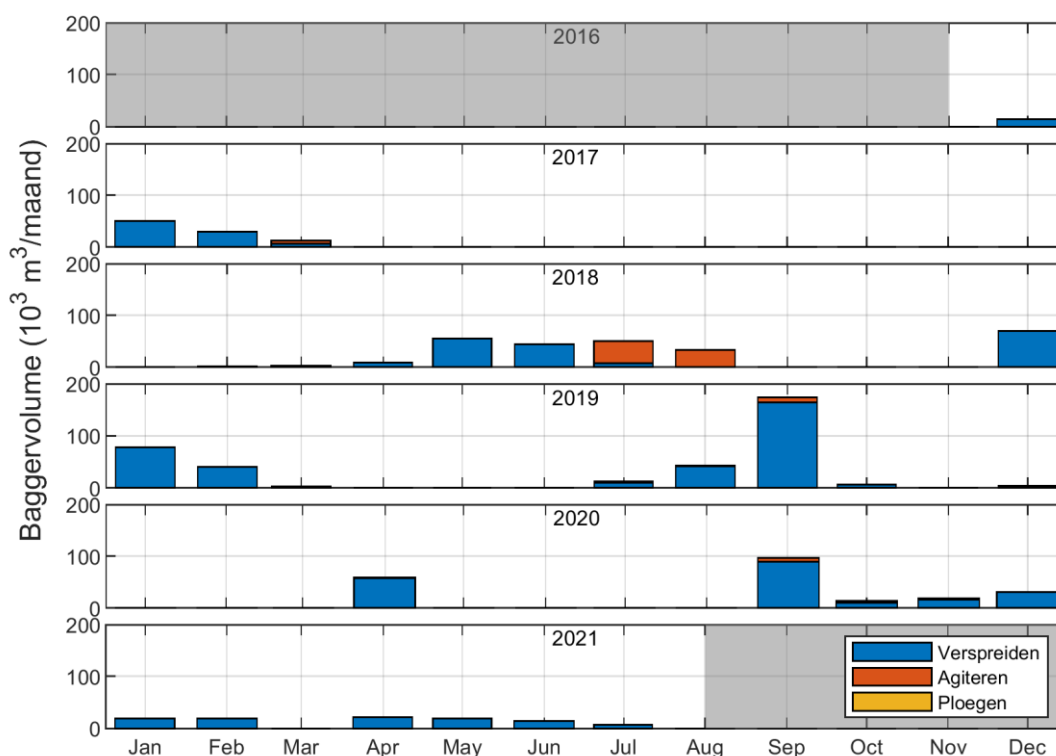


Figuur 4.3 Geschatte baggerbezwaar in tonnen droge stof (tds) per jaar in de Vaargeul Boontjes, inclusief onzekerheidsmarges. Eerste schatting op basis van geregistreeerde tds en omgerekend op basis van de vaste omrekenfactor; aangescherpte schatting op basis van gemeten soortelijke dichtheden.

4.2.3 Variaties in baggervolume binnen het jaar

De verdeling van gebaggerde volumes binnen de jaren laat zien dat de werkzaamheden niet op vaste momenten in het jaar uitgevoerd worden (zie Figuur 4.4). Ook is er geen constante frequentie te herleiden uit de baggerwerkzaamheden: in sommige jaren wordt vooral in de winter gebaggerd, terwijl in andere jaren juist in de lente of in de (na)zomer gebaggerd wordt. Bijvoorbeeld in 2019 werden de grootste volumes gebaggerd in januari en in september. In 2020 werden de grootste volumes gebaggerd in april en september. Dit heeft waarschijnlijk te maken met de contractvorm voor vaargeulonderhoud in de Boontjes (prestatiecontract). Indien uit dieptepeiling blijkt dat niet wordt voldaan aan de streefdiepte, dan wordt het benodigde baggervolume bepaald en opdrachtverlening aangevraagd. Tussen het moment van peilen en de uitvoer van de werkzaamheden zit daardoor ongeveer één maand. Verder is er geen direct verband gevonden tussen de duur van de voorafgaande periode waarin niet is gebaggerd en het gebaggerde beunvolume van de opvolgende baggeractiviteit.

Baggervolume vaargeul Boontjes per maand



Figuur 4.4 Geregistreerd beunvolume per maand in de Vaargeul Boontjes van december 2016 tot juli 2021. De gehanteerde methodes (verspreiden, agiteren en ploegen) zijn weergegeven met verschillende kleuren.

4.3 Erosie en sedimentatie in de vaargeul

Om meer inzicht te krijgen in het moment van sedimentatie (het moment van baggeren loopt door de contractvorm immers hierop achter) en de locatie van sedimentatie, worden de dieptepeilingen van de baggeraar in detail geanalyseerd. Dit geeft een beter beeld van eventuele seizoensdynamiek en het effect van stormen. Ook geeft dit inzicht of er op bepaalde momenten erosie vanuit de vaargeul plaatsvindt, dat is een indicatie dat de geul zich onder bepaalde omstandigheden meer stroom trekt. Omdat met verschillende frequenties is gemeten, kan ook de aanwezigheid van fluid mud worden geanalyseerd.

4.3.1 Databron

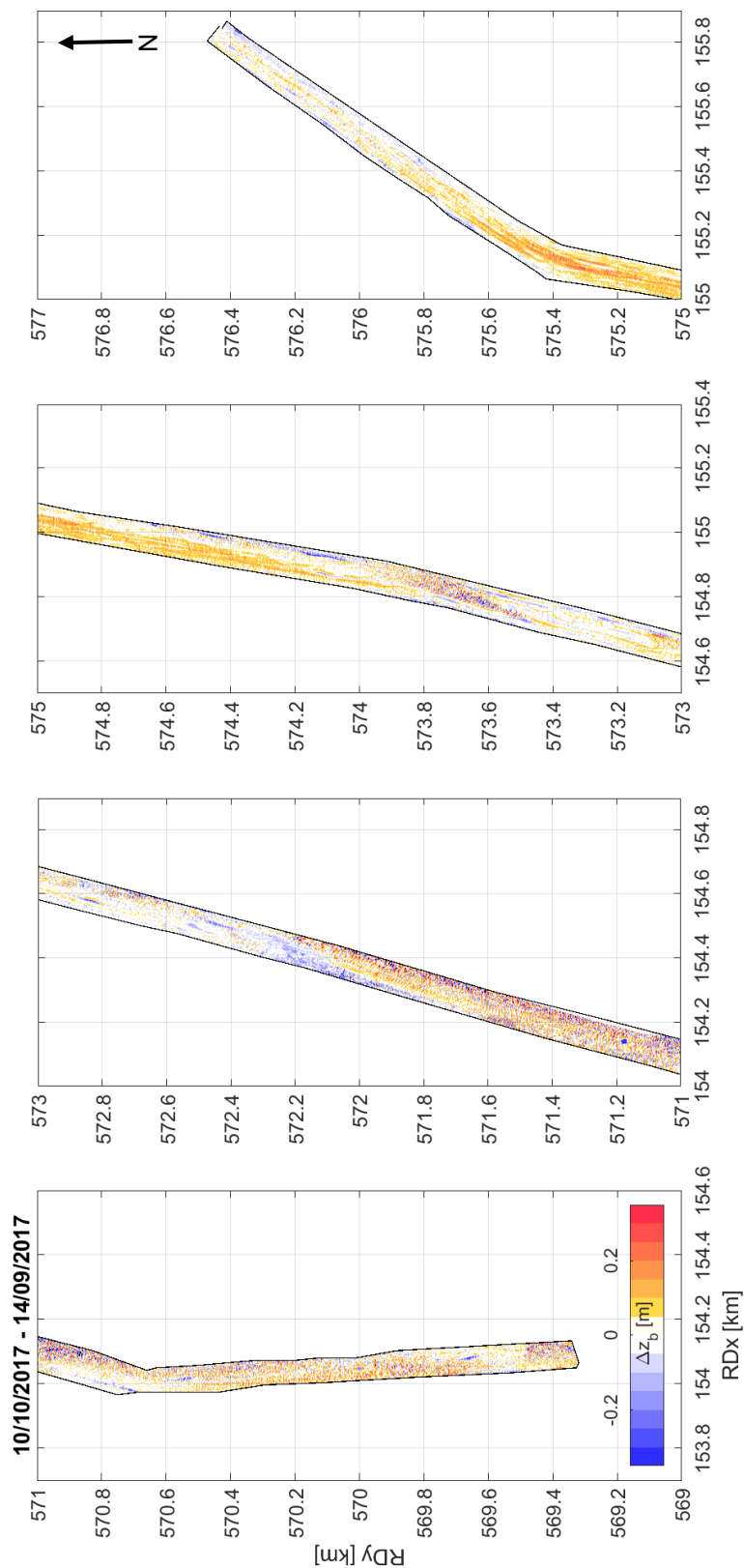
Vanaf augustus 2017 voert de baggeraar maandelijks dieptepeilingen uit in de vaargeul Boontjes. De peilingen worden met een multibeam echolood met een andere frequentie (meestal 300 Hz, incidenteel ook 200/400). Daarnaast is men sinds 2020 de bodemligging van de noordelijke Boontjes ook gaan meten met een singlebeam echolood uitgevoerd (frequentie van 24 Hz) in dwarsraaien van 10-15 m, om de sliblaag te kunnen meten.

Doordat sinds 2020 met twee verschillende frequenties wordt gemeten, kan fluid mud gedetecteerd worden. Een hoogfrequent meetsignaal geeft de bovenste grens van een fluid mud laag weer, gezien deze niet door de laag heen meet, terwijl het laagfrequente signaal de ondergrens aangeeft. Door deze metingen met elkaar te vergelijken kunnen fluid mud lagen worden gedetecteerd. De aanwezigheid van fluid mud kan alleen worden onderzocht voor de noordelijke Boontjes, aangezien in de zuidelijke Boontjes enkel metingen zijn uitgevoerd met een multibeam echolood.

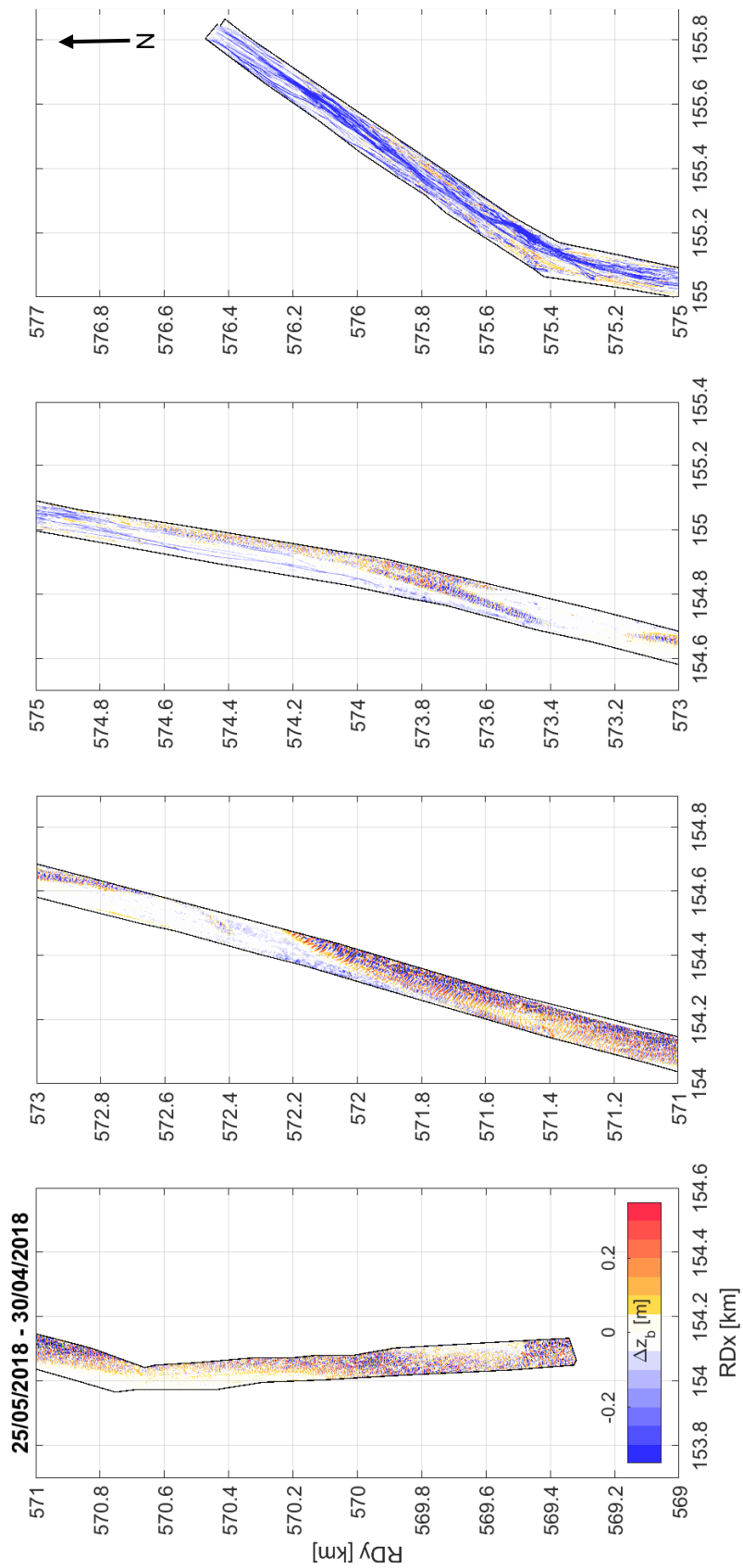
Deze data is geïnterpoleerd op een rooster van 1 m x 1 m en als ASCII vergrid geleverd door Rijkswaterstaat. De singlebeam metingen zijn niet uitgevoerd in de zuidelijke Boontjes, gezien de baggeraar ervan uit gaat dat hier geen fluid mud is vanwege zandribbels die hier regelmatig worden waargenomen. De laagste bodemligging is maatgevend voor de beslissing of onderhoudsbaggerwerk nodig is. Tussen het moment van peilen en van baggeren zit vaak een maand, hoewel dit ook meer kan zijn.

4.3.2 Morfologische respons

Figuur 4.5 en Figuur 4.6 tonen de gemeten sedimentatie/erosie patronen voor twee verschillende periodes, respectievelijk september – oktober 2017 en april – mei 2018. In de figuren is de vaargeul opgeknipt in vier delen ten behoeve van de zichtbaarheid (van links naar rechts toont de vaargeul van zuid naar noord). Daar waar in Figuur 4.5 veel sedimentatie in de noordelijke Boontjes te zien is (omdat er in deze periode niet is gebaggerd), zien we in Figuur 4.6 juist een verdieping door de uitgevoerde baggerwerkzaamheden. Daarnaast is het opvallend dat er in de zuidelijke Boontjes een sterke migratie is van bodemvormen, die in het meest noordelijke deel (vanaf $Y = 573$ km, met uitzondering van een klein stuk bij $573,5 < Y < 573,8$) afwezig is. Door de aanwezigheid en migratie van bodemvormen in het zuiden en de afwezigheid hiervan in het noorden is het aannemelijk dat de bodemsamenstelling in de noordelijke Boontjes slibrijker is (en fluid mud bevat, zoals besproken in paragraaf 4.3.4).

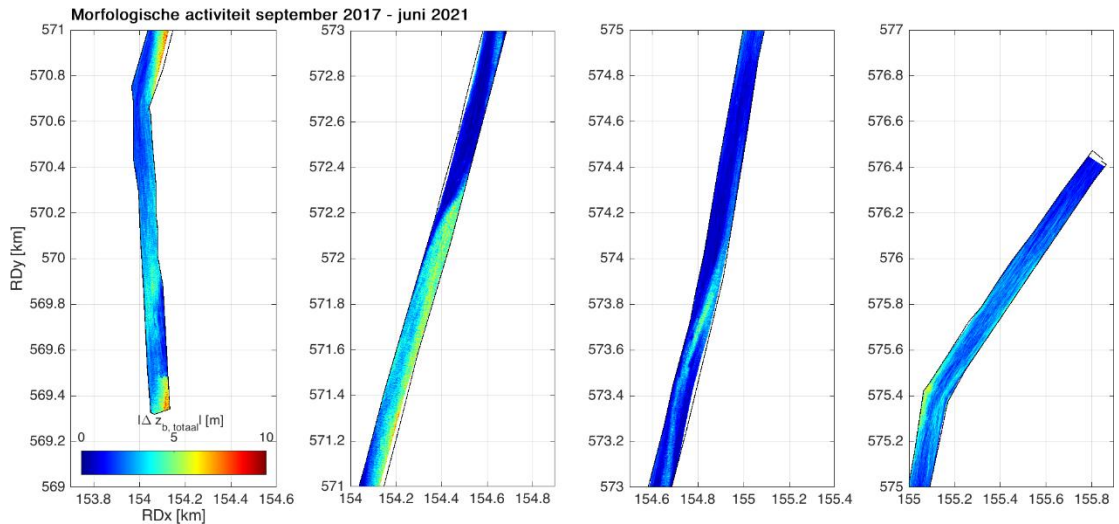


Figuur 4.5 Verschil peilingen september 2017 - oktober 2017. In deze periode zijn geen baggerwerkzaamheden uitgevoerd en is sedimentatie van de noordelijke Boontjes duidelijk zichtbaar. In de zuidelijke Boontjes vindt migratie van bodemvormen plaats. De vaargeul is opgeknipt in vier delen t.b.v. de zichtbaarheid (v.l.n.r. tonen de panelen de vaargeul van zuid naar noord), het noorden wijst naar boven in de leesrichting van de figuur.



Figuur 4.6 Verskil peilingen april 2018 - mei 2018. In deze periode zijn in de noordelijke Boontjes onderhoudsbaggerwerkzaamheden uitgevoerd. De vaargeul is opgeknipt in vier delen t.b.v. de zichtbaarheid en een kwart slag gedraaid.

Het verschil tussen de noordelijke en zuidelijke Boontjes komt ook naar voren bij het bepalen welke delen van de vaargeul het meest dynamisch zijn. Hiervoor is de morfologische activiteit bepaald, welke berekend is als de som van de absolute bodemveranderingen per periode (zie Figuur 4.7). In de zuidelijke boontjes (twee linker panelen) is de morfologische activiteit hoog waar zich veel bodemvormen bevinden (door de migratie hiervan). Dit geldt ook voor het gebied $573,4 \text{ km} < Y < 574 \text{ km}$. Het meest noordelijke deel bevat weinig bodemvormen, en de verhoogde morfologische activiteit hier (met name bij de knik rondom $575,2 \text{ km} < Y < 575,6 \text{ km}$) toont waar veel sedimentatie plaatsvindt en veel materiaal wordt gebaggerd).



Figuur 4.7 Morfologische activiteit, berekend als de som van de absolute bodemveranderingen (erosie en sedimentatie)

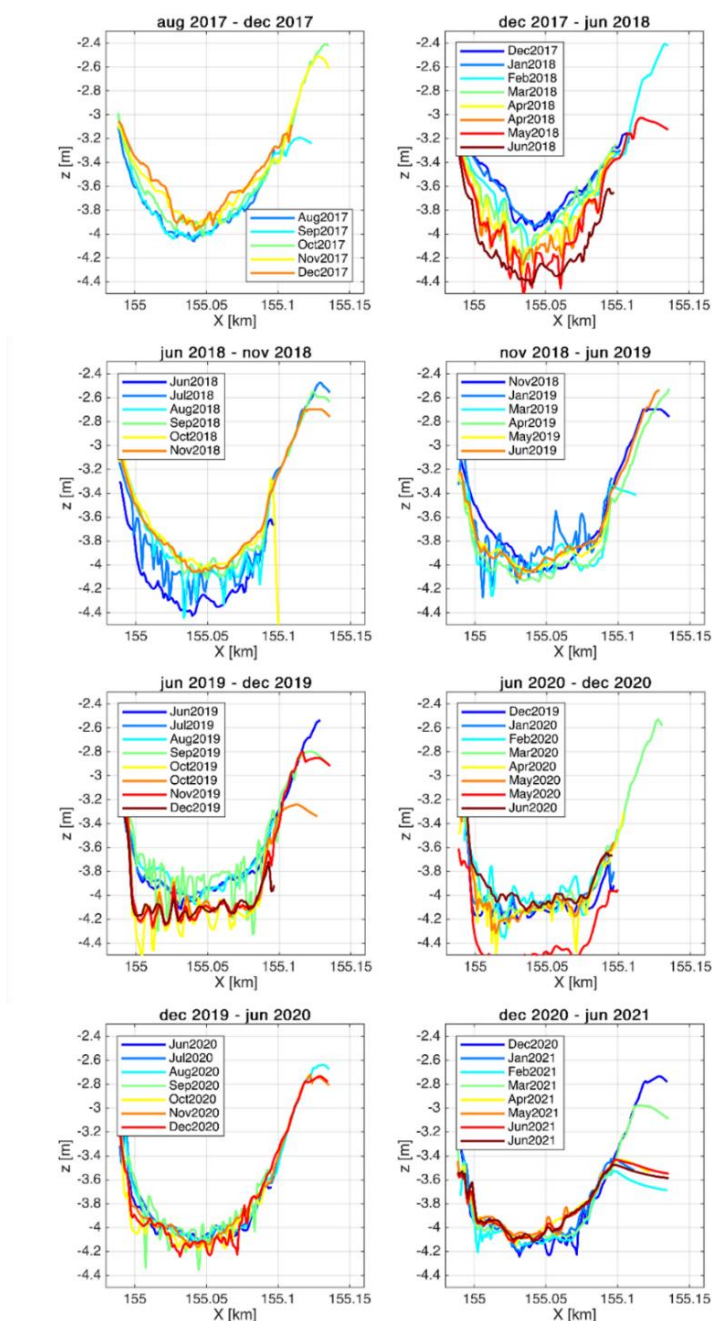
Figuur 4.8 toont de maandelijkse bodemligging in de geul ter hoogte van $Y = 575 \text{ km}$. Deze doorsnede loopt dwars door het drempelgebied waar het meeste aanlegbaggerwerk heeft plaatsgevonden (zie ook dwarsdoorsnede 25 in Figuur 3.5). De figuren worden chronologisch besproken:

- In 2017 zijn enkel in januari-maart baggerwerkzaamheden uitgevoerd (zie Figuur 4.4). In dit jaar is een sedimenterende trend te zien in de maanden van september tot december.
- In de eerste helft van 2018 zien we erosie, zonder dat er baggerwerkzaamheden worden uitgevoerd. In de maanden mei-augustus 2018 is de geul gebaggerd, waarbij lokaal een overdiepte is gecreëerd tot NAP -4,4 m. Tussen juni en augustus heeft er juist weer sedimentatie ter plaatse van de doorsnede plaatsgevonden. In de maanden september-november zijn geen baggerwerkzaamheden uitgevoerd en is de diepte zo goed als stabiel gebleven. In januari 2019 zijn grote volumes gebaggerd. Dit was waarschijnlijk nodig als gevolg van de sterke lokale sedimentatie elders, bijvoorbeeld ter hoogte van $X = 155,06 \text{ km}$ en $X = 155,08 \text{ km}$. Ter plaatse van de doorsnede is de bodemligging redelijk stabiel gebleven tussen november 2018 en juni 2019.
- Ook de grote baggervolumes van september 2019 zijn terug te zien in de dieptepeilingen, waar hierna lokaal de dieptes meer dan NAP -4,4 m waren. In de maanden november en december 2019 is slechts zeer klein onderhoud gepleegd, en de diepte van de doorsnede bleef rond de NAP -4,1 m.
- In 2020 is in mei een grote overdiepte te zien; de geul heeft over 100 m breedte een diepte van meer dan NAP -4 m en over een breedte van 75 m een diepte van meer

dan NAP -4,4 m. Dit is opvallend omdat volgens de baggergegevens alleen in april 2020 relatief grote volumes zijn gebaggerd, terwijl in mei geen werkzaamheden zijn uitgevoerd. In de rest van 2020 is de bodemligging redelijk stabiel.

- In 2021 is met name rond $X=155,05$ tot $X = 155,075$ km sedimentatie te zien.

Samenvattend toont het drempelgebied over het algemeen een sedimenterende trend, met lokale sedimentatiesnelheden tot 40 cm/maand. Deze sedimentatie wordt verwijderd met baggerwerkzaamheden, waarna lokaal overdieptes van meer dan NAP -4,4 m te zien zijn. Het is niet duidelijk of deze overdieptes zijn aangebracht, of dat dit het resultaat is van natuurlijke erosie nadat er is gebaggerd. In sommige periodes is de geul relatief stabiel. Er zit geen duidelijke toename in de sedimentatie in bepaalde maanden.



Figuur 4.8 Maandelijkse peilingen in 2017-2021 ter hoogte van $Y = 575$ km (waar de drempelverwijdering is uitgevoerd, zie ook dwarsdoorsnede 25 in Figuur 3.5).

4.3.3 Morfodynamiek rondom grote baggerwerkzaamheden

Uit paragraaf 4.2.3 kunnen drie momenten worden onderscheiden waarin grote baggervolumes zijn gerealiseerd ($> 80.000 \text{ m}^3/\text{maand}$), namelijk: januari 2019, september 2019 en september 2020. Om te begrijpen waar en hoe de geul aanzandde voorafgaand aan en na deze werkzaamheden, zijn voor deze momenten de peilingen op meerdere doorsnedes in de geul geanalyseerd. Deze peilingen zijn in Appendix B.1 weergegeven.

Januari 2019

In januari 2019 vonden grote baggerwerkzaamheden plaats in de noordelijke Boontjes (rondom de voormalige drempel), zie Figuur B.1. Opvallend is dat de meest noordelijke doorsnede ($X=576 \text{ km}$) destijds is verdiept, terwijl deze al aan de streefdiepte leek te voldoen. Ook vallen de lokale dieptes op rond $X = 155,48 \text{ km}$ en $155,54 \text{ km}$. Verder blijkt dat met name de randen (west en oost) van de geul ter hoogte van $Y = 575,5 \text{ km}$ zijn verdiept, omdat de geul hier niet aan de streefdiepte voldeed. In Figuur 4.7 was eerder al te zien dat de rand van de geul rond deze hoogte een verhoogde morfologische activiteit heeft, waaruit we kunnen opmaken dat deze vaker/snelser sedimenteert dan het centrale deel van de geul.

September 2019

Ook in september 2019 is de noordelijke Boontjes verdiept met grote baggervolumes tot gevolg (zie Figuur B.2 en paragraaf 4.2.2). Opvallend zijn de grote overdieptes ter hoogte van $Y = 574,5 \text{ km} - Y = 576 \text{ km}$.

September 2020

In de maanden voorafgaand aan september 2020 zijn geen baggerwerkzaamheden uitgevoerd (zie paragraaf 4.2.2). Figuur B.3 toont dat de (waarschijnlijk aangebrachte) overdiepte in september 2020 rond $Y = 574,5-575 \text{ km}$ binnen een maand weer is aangezand. Anderzijds heeft een verdieping plaatsgevonden in de zuidwestelijke boontjes ($Y = 572,5-573 \text{ km}$) die in oktober nog zichtbaar is. De verschillen tussen de peilingen gemeten met de singlebeam echolood zijn groter dan de verschillen gemeten met de multibeam echolood (zie Figuur B.3 en Figuur B.4). Dit kan duiden op de aanwezigheid van fluid mud in sommige maanden. Dit wordt nader besproken in de volgende paragraaf.

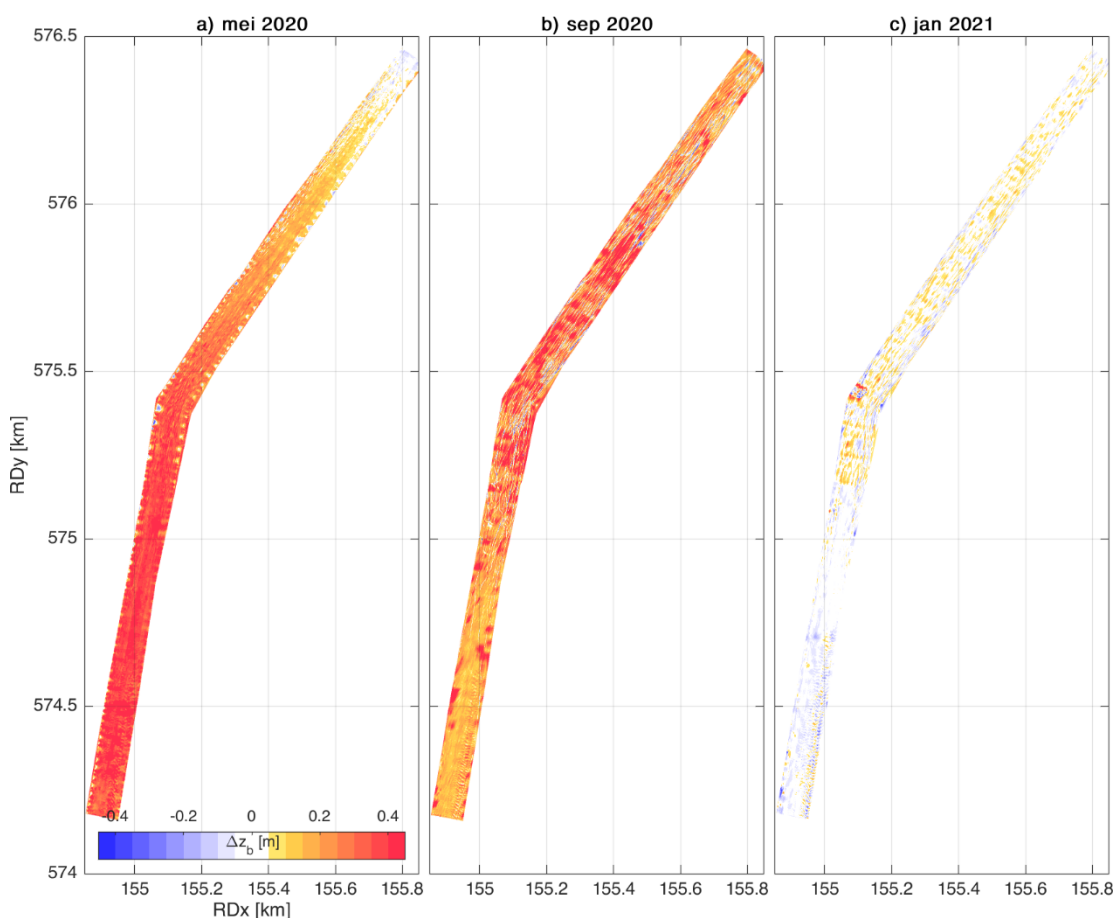
Samenvattend zien we in alle drie gevallen met name sedimentatie ten noorden van $Y = 574 \text{ km}$. Hier worden dan ook de meeste baggerwerkzaamheden uitgevoerd. Op sommige momenten zijn met name de randen van de noordelijke Boontjes verdiept (januari 2019), terwijl op andere momenten de vaargeul langs de hele breedte moest worden onderhouden (september 2019, 2020). Lokale overdieptes lijken soms te zijn aangebracht tijdens het baggeren, hoewel deze ook op natuurlijke wijze kunnen zijn ontstaan. We zien dat ze binnen een maand weer kunnen aanzanden.

4.3.4 Aanwezigheid van fluid mud

Figuur 4.9 toont de verschillen in gemeten bodemligging met de singlebeam en de multibeam echolood voor drie verschillende peilmomenten. Dit verschil, dat wordt veroorzaakt door de verschillende meetfrequenties waarop de echoloden zijn ingesteld, toont of er fluid mud aanwezig is en geeft een indicatie van hoe dik deze laag is. Alle peilingen die tegelijkertijd met meerdere frequenties zijn gemeten, zijn opgenomen in Appendix B.

Over het algemeen is in het voorjaar en de zomer over het hele gemeten stuk een fluid mud laag te zien van 20-50 cm dik. In de periode van november 2020 tot maart 2021 is deze laag afwezig, op een lokale uitzondering na, waar zo'n 10 cm fluid mud te zien is. Dit wordt bevestigd door de peilingen die hier standaard (migrerende) zandribbels tonen, wat erop duidt dat hier geen fluid mud aanwezig is.

Omdat er maar één jaar data met fluid mud beschikbaar is, kunnen we niet met zekerheid vaststellen of fluid mud altijd of meestal in het voorjaar en de zomer in de noordelijke Boontjes aanwezig is. Indien fluid mud alleen in een bepaalde periode van het jaar aanwezig is, is de vorming ervan waarschijnlijk gekoppeld aan sturende processen die ook een jaarcyclus vertonen. Mogelijk spelen zoutgedreven dichtheidsstromingen en/of flocculatie door algen een rol bij de vorming van fluid mud.



Figuur 4.9 Dieptepeilingen Boontjes, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag.

4.4 Sedimentbalans Boontjes inclusief baggeren

Een sedimentbalans voor de vaargeul Boontjes geeft inzicht in hoe de natuurlijke erosie en sedimentatie in de vaargeul zich verhouden tot de baggervolumes. Ook kunnen we de combinatie van erosie en sedimentatie én baggervolumes gebruiken om te bepalen of er in bepaalde periodes van het jaar meer sedimentatie in de vaargeul plaatsvindt.

4.4.1 Methode

Met de maandelijks uitgevoerde dieptepeilingen en de baggervolumes kan een eerste sedimentbalans worden opgesteld van de vaargeul voor de periode augustus 2017 tot juni 2021. Deze sedimentbalans bestaat uit drie onderdelen:

1. Het berekenen van de sedimentatie/erosie volumes tussen twee peilmomenten voor de hele periode waarover gemeten is. Er is een drietal (foutieve) bodemkaarten uitgesloten van de analyse van de sedimentatie/erosie volumes, zie voor meer detail Appendix D.2.
2. Het bepalen van de baggevolumes (in de beun) in deze periodes en deze omzetten naar in-situ volumes.
3. De netto sedimentvolumeveranderingen worden bepaald door de baggevolumes op te tellen bij de sedimentatie/erosie volumes.

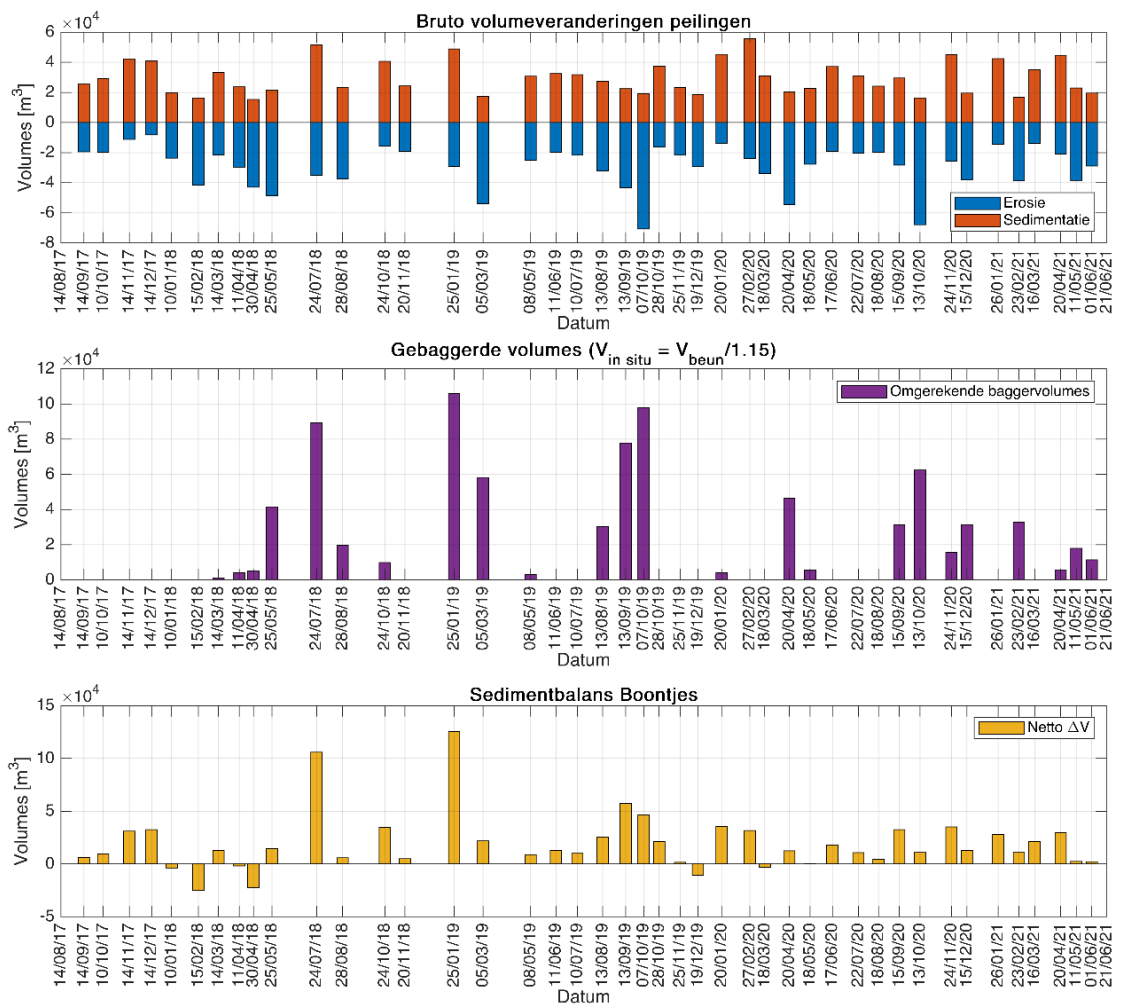
De baggevolumes (gemeten in de beun) zijn omgerekend naar in-situ sedimentvolumes gebruikmakend van de omrekenfactor 1,15 (volume beun is 15% groter dan volume in-situ), dat geldig is bij gemiddelde zandeigenschappen waartoe het zuidelijk deel van de Boontjes toe behoort. Voor de meer slibrijke wordt geen vaste vuistregel gehanteerd. Dit introduceert een onzekerheid in de berekende netto volumes. Om deze onzekerheid nader te onderzoeken is de analyse ook uitgevoerd met de omrekenfactor 1,0 en 1,5 (zie resultaten in Appendix D.2). Hieruit is gebleken dat de omrekenfactor weliswaar een groot effect heeft op de netto volumes, omdat deze sterk gestuurd worden door de baggerwerkzaamheden, maar de kwalitatieve resultaten van de te onderscheiden sterk sedimenterende periodes blijven onveranderd, evenals of de periodes gekenmerkt worden door netto erosie of sedimentatie. Dit is dan ook hoe deze resultaten verderop zullen worden geïnterpreteerd.

4.4.2 Resultaat

Figuur 4.10 toont de resultaten van de sedimentbalans, met in het bovenste paneel de bruto gemeten volumeveranderingen, daaronder de omgerekende baggevolumes en daaronder de netto sedimentvolumeveranderingen. Merk op dat de periodes waarop de volumes zijn bepaald over het algemeen rond een maand zit, maar dat hierop uitzonderingen zijn (zoals bijvoorbeeld de volumes berekend voor 20/11/18 - 25/01/19).

De sedimentbalans geeft de volgende inzichten:

- Over bijna de hele periode vindt netto aanzanding plaats, met sedimenttoenames van tussen 10.000 en 40.000 m³ per maand gesommeerd over de gehele vaargeul Boontjes.
- Echter is ook een zestal periodes geweest waarover netto erosie heeft plaatsgevonden (waarvan twee met 10.000-20.000 m³ per maand en de overige vier < 5.000 m³ per maand).
- In juli 2018 en januari 2019 zijn de berekende volumes afwijkend hoog, maar deze volumes zijn over een periode van twee maanden zijn. Als we de maandelijks gemiddelde volumeverandering beschouwen, wijken deze periodes niet af. Echter valt niet uit te sluiten dat de volumeveranderingen over een kortere periode hebben plaatsgevonden.
- Een groot deel van de bruto (sedimentatie/erosie) volumes resulteert niet in een netto volumeverandering omdat deze voortkomt uit de migratie van bodemvormen.
- De bijdrage van baggervolume is een orde groter dan de bijdrage van de gemeten bodemveranderingen. Een belangrijk deel van de netto volumeverandering wordt dus veroorzaakt door het baggervolume en is daardoor niet terug te zien in de peilingen (d.w.z. het aangezande/aangeslibde materiaal was tijdens de peiling reeds verwijderd).



Figuur 4.10 Sedimentbudget van de vaargeul Boontjes. Het bovenste paneel toont de totale gemeten sedimentatie/erosie volumes per periode. Het middelste paneel toont de berekende in-situ baggervolumes. Het onderste paneel toont de netto sedimentvolumeveranderingen (= sedimentatie-erosie-baggervolumes). De kolommen zijn geplaatst aan het eind van de beschouwde periode (voorbeeld: de kolom op 14/09/2017 toont de volumeveranderingen voor de periode 14/08/2017 – 14/09/2017).

4.5 Mogelijk sturende processen

De belangrijkste morfologische ontwikkeling van de vaargeul voorafgaand aan de drempelverwijdering bestond uit sedimentatie in de noordelijke Boontjes en ophoging van de platen rondom de hele Boontjes, zoals beschreven in paragraaf 3.2. Deze ontwikkeling heeft zich ook na de drempelverwijdering voortgezet, waarbij sterke sedimentatie rondom het drempelgebied te zien is. Gegeven de continue sterke sedimentatie rondom dit gebied, lijkt het erop dat de vaargeul de neiging heeft terug te gaan naar de situatie van vóór de drempelverwijdering en mogelijk zelfs verder te versmallen en uiteindelijk verondiepen, en dit wordt tegengehouden door de baggerwerkzaamheden. Als mogelijk sturende processen voor de sedimentatie in de vaargeul (en dus voor de toename in de baggervolumes) worden de volgende processen beschouwd:

- Stromingspatronen
- Wind en golfwerking
- Zoetwaterafvoer en gravitatiecirculatie
- Vorming van fluid mud

4.5.1 **Stromingspatronen**

Stromingspatronen rond de vaargeul Boontjes zijn over langere tijdschaal beïnvloed door de morfologische ontwikkeling van het gebied. De afsluiting van de Zuiderzee heeft een toename van de getijslag en sterke verandering van de lokale stromingspatronen veroorzaakt, zoals beschreven in paragrafen 2.1.1, 2.1.2 en 3.1. Wellicht heeft de drempelverwijdering de getijstroming ook beïnvloed. De stromingspatronen worden beïnvloed door omliggende gebieden, zoals het Kimstergat, de vaargeul langs de Pollendam naar Harlingen en de zoetwaterafvoer vanaf de sluizen van Kornwerderzand. Het primaire effect van stromingspatronen op de morfologie van de vaargeul is relatief eenvoudig: een afname van de stroomsnelheid leidt tot sedimentatie in de vaargeul. Daarnaast spelen echter ook complexere processen, zoals getijasymmetrie en de interactie met omliggende gebieden. Aangezien de stroomsnelheid in en rond de vaargeul niet wordt gemeten, kunnen de stromingspatronen niet op basis van data worden bestudeerd. De invloed van stromingspatronen op de sedimentatie in de vaargeul (inclusief het effect van de drempelverwijdering) wordt in 2022 onderzocht met een numeriek model.

4.5.2 **Wind en golfwerking**

De lokale windcondities zijn gebruikt als inschatting voor de golfwerking, aangezien er in dit deel van de Waddenzee geen golfmetingen worden gedaan. De hypothese is dat tijdens en kort na een stormconditie de meeste sedimentatie wordt waargenomen, als resultaat van toegenomen plaat-geulinteractie. In de baggervolumes is dit naar verwachting met enige vertraging waar te nemen, omdat eerst een vergunning moet worden aangevraagd en er een schip beschikbaar moet zijn. In lijn met deze hypothese zou de verwachting ook zijn dat er (net als in de windcondities) een sterke seizoensvariatie in de netto sedimentatie zou zitten. Een dergelijke seizoensvariatie in de baggervolumes is echter afwezig. De windsnelheid en windrichting (invloed op golfhoogte via de strijklengte) zijn geanalyseerd tijdens de vijf meest stormachtige condities in de periode 2016-2020, zie de uitwerking van deze analyse in bijlage D.1. Daarnaast is er ook gekeken naar maanden met grote baggervolumes, waarin geen stormconditie is opgetreden, omdat dit aanwijzingen geeft voor andere, event-gebaseerde aandrijvende processen.

De resultaten uit deze analyse hangen samen met de windrichting. Dat is te verklaren vanuit de geografische ligging van de vaargeul nabij de vastelandskust, waardoor stormen uit het oosten, zuidoosten en zuiden relatief weinig effect hebben op dit gebied. Stormen uit het zuidwesten en zuidzuidwesten (november 2016, september 2017 en februari 2020) hebben vermoedelijk een direct verband met netto sedimentatie en/of grote baggervolumes in opvolgende maanden. Bij stormen uit zuidzuidoosten is het beeld wisselend: de ZZO-storm van januari 2018 lijkt geen noemenswaardig effect te hebben gehad, maar de ZZO-storm van januari 2019 leidde tot relatief veel netto sedimentatie en vrij grote baggervolumes. In de geanalyseerde periode zijn overigens geen grote noordwesterstormen voorgekomen.

4.5.3 **Zoetwaterafvoer en gravitatiecirculatie**

De zoetwaterafvoer van de spuisluis bij Kornwerderzand kan een grote invloed hebben op de afvoer door de vaargeul Boontjes. In het algemeen is de zomerafvoer twee tot drie keer zo laag als de winterafvoer. De hypothese is dat lage afvoeren uit de spuisluis bij Kornwerderzand voor een afname van de afvoer door de Vaargeul Boontjes zorgen, waardoor meer sedimentatie in de geul ontstaat. Mogelijk hebben de extreem lage spuitdebieten in de droge zomers van 2017, 2018 en 2019 dit effect versterkt. Het effect van de spuidebieten op de sedimentbalans en op de baggervolumes is geanalyseerd in bijlage D.2. Sommige momenten met grote netto sedimentatie en grote baggervolumes vallen inderdaad samen met een laag spuitdebiet (juli-augustus 2018 en april 2020), maar andere momenten hebben geen

uitzonderlijk spuidebiet (gemiddeld winterdebiet in januari 2019 en gemiddeld herfstdebiet in september 2020). Concluderend lijken grote baggervolumes soms samen te vallen met lage spuidebieten bij Kornwerderzand, maar op andere momenten lijkt er geen direct verband tussen de afvoer en de baggervolumes aanwezig. Mogelijk zijn andere sturende processen op die momenten dominant.

Naast een effect op het debiet, leidt de zoetwaterafvoer door dichtheidsverschillen ook tot gravitatiecirculatie in de vaargeul Boontjes, die een zuidwaarts gerichte stroming nabij de bodem veroorzaakt, waardoor slib vanaf de noordelijke verspreidingslocaties de Boontjes in wordt gebracht. Door de drempelverwijdering is dit circulatiepatroon mogelijk sterker geworden. De invloed van het spuidebiet bij Kornwerderzand op de afvoer en gravitatiecirculatiepatronen in de vaargeul Boontjes wordt in 2022 nader onderzocht aan de hand van een modelstudie.

4.5.4 Vorming van fluid mud

De vorming van fluid mud is het enige proces waarin een duidelijke seizoensvariatie waarneembaar is (hoewel slechts gebaseerd op twee jaar meetdata), namelijk opbouw van de fluid mudlaag in het voorjaar, een maximum laagdikte in de zomer en een afname van de fluid mudlaag in het najaar (zie paragraaf 4.3.4). Dit proces zou een belangrijk effect kunnen hebben gehad op de grote baggervolumes in september 2019 en september 2020, omdat er hierdoor materiaal met een veel lagere dichtheid is gebaggerd.

De seizoensdynamiek in de fluid mudlaag is anders dan te verwachten valt op basis van wind en golfwerking (dan zou de piek namelijk in de winter liggen). Dat duidt erop dat het materiaal niet afkomstig is van de platen en dat wind en golfwerking niet de oorzaak zijn van de vorming van de fluid mudlaag. Mogelijke processen die wel dezelfde seizoensvariatie vertonen zijn flocculatie door biologische processen en scheepvaart. Flocculatie als gevolg van biologische processen (algengroei) kan leiden tot een hogere valsnelheid van samengeklonterde slibdeeltjes, waardoor nabij de bodem fluid mud kan ontstaan. Scheepvaart kan agitatie van bodemsediment veroorzaken, waardoor fluid mud wordt gevormd. In de zomer wordt de vaargeul intensiever bevaard dan in de winter (o.a. door toerisme), wat de seizoensvariatie in fluid mudvorming zou kunnen verklaren. Naast deze processen bestaat hier mogelijk nog een koppeling met de lagere afvoer en veranderde gravitatiecirculatie tijdens (droge) zomers, zoals beschreven in paragraaf 4.5.3.

5 Samenvatting systeemwerking

In dit hoofdstuk wordt een samenvatting gegeven van de systeemwerking met de aandrijvende processen achter het vaargeulonderhoud in de Boontjes. Dit vormt een aanzet voor een conceptueel denkmodel, dat op basis van nieuwe inzichten (bijvoorbeeld uit de modelstudie die volgend jaar gaat plaatsvinden) verder kan worden aangescherpt. Het geeft weer hoe wij nu denken dat het abiotisch systeem reageert, op basis van de nu beschikbare kennis en data-analyses. De systeemwerking is gevisualiseerd in Figuur 5.1.

De werkelijke baggervolumes zijn een orde groter dan de prognose uit de planstudie. In de planstudie werd op basis van een modelstudie geconcludeerd dat de geul stroom zou trekken, waardoor baggervolumes beperkt zouden zijn. Het model was gebaseerd op bodemhoogtedata uit 2009 en bevatte als forcering enkel getij en wind (mediane windsnelheid). De invloed van golven en 3D zoutgedreven stromingen bleef dus buiten beschouwing. Sedimenttransport werd wel gemodelleerd, maar zonder slibtransport (enkel met transportformules die representatief zijn voor zandtransport).

De vaargeul Boontjes wordt sterk beïnvloed door de volgende grootschalige processen:

- De vaargeul Boontjes wordt grootschalig gestuurd door de afsluiting van de Zuiderzee en autonome ontwikkeling van het gebied. Na de afsluiting heeft het Marsdiep zich verder in noordoostwaartse richting uitgestrekt tot voorbij Harlingen. Hierdoor is ook het wantij tussen het Marsdiep en het Vlie verplaatst. Vóór de afsluiting van de Zuiderzee was het deel van de Waddenzee tussen Kornwerderzand en Harlingen relatief diep en waren hier geulsystemen aanwezig die zorgden voor de drainage van de Zuiderzee. Vanwege deze historische ontwikkeling zijn er rondom de Boontjes nog geen hoge intergetijdenplaten aanwezig, maar lagergelegen subgetijdengebied. Dit subgetijdengebied is zich echter trendmatig aan het ophogen en ontwikkelt zich mogelijk tot intergetijdengebied. Hierdoor is de positie van het wantij onzeker, terwijl de ligging ervan invloed heeft op de toekomstige morfologische ontwikkeling en daarmee baggerwerk van de Boontjes. Het is aannemelijk dat de geul Boontjes de toekomstige positie van het wantij doorkruist, waardoor sedimentatie als gevolg van afnemende stroomsnelheden ter plaatse van het wantij zal blijven plaatsvinden en vermoedelijk toenemen. Een modelstudie kan meer inzicht verschaffen in de lokale hydrodynamica en de positie van het wantij.
- De bekkens van het Marsdiep en het Vlie laten een sedimentimport zien, die veel groter is dan nodig om te compenseren voor zeespiegelstijging en bodemdaling. Er treedt dus verlanding op, die het sterkst is achterin de bekkens, waar langs de Friese kust gestage sedimentatie optreedt. Hier wordt veel zand én slib afgezet. Zodra dit deel van de Waddenzee zich van sublitoraal naar litoraal ontwikkelt kunnen deze afzettingen leiden een versnelde afname van het kombergingsvolume en wordt ook het Kimstergat kleiner. Omdat het kombergingsvolume van het Kimstergat vermoedelijk deels via de Boontjes wordt aan- en afgevoerd, zal dit ook invloed hebben op de ontwikkeling van de Boontjes. Analyse van stromingspatronen (zoals voorzien voor volgend jaar met behulp van een numeriek model) kan hier meer uitsluitsel over geven.
- Omdat de subgetijdenplaten rondom de Boontjes ophogenwordt de geul Boontjes samengedrukt en verdiept deze lokaal. Vermoedelijk is dit van tijdelijke aard. Als de sedimentatie blijft doorzetten, zullen de platen in de komende jaren droogvallen gedurende de getijcyclus, waardoor het kombergingsvolume zal afnemen en het profiel van de geul zal afnemen.
- De stromingspatronen zijn niet alleen sterk veranderd door de afsluiting, maar vermoedelijk ook beïnvloed door de aanwezigheid van de Pollendam, en mogelijk ook

het op diepte houden van de vaargeul langs de Pollendam naar Harlingen, de zoetwaterafvoer vanaf de sluizen van Kornwerderzand en mogelijk vanaf de spuisluizen in Harlingen.

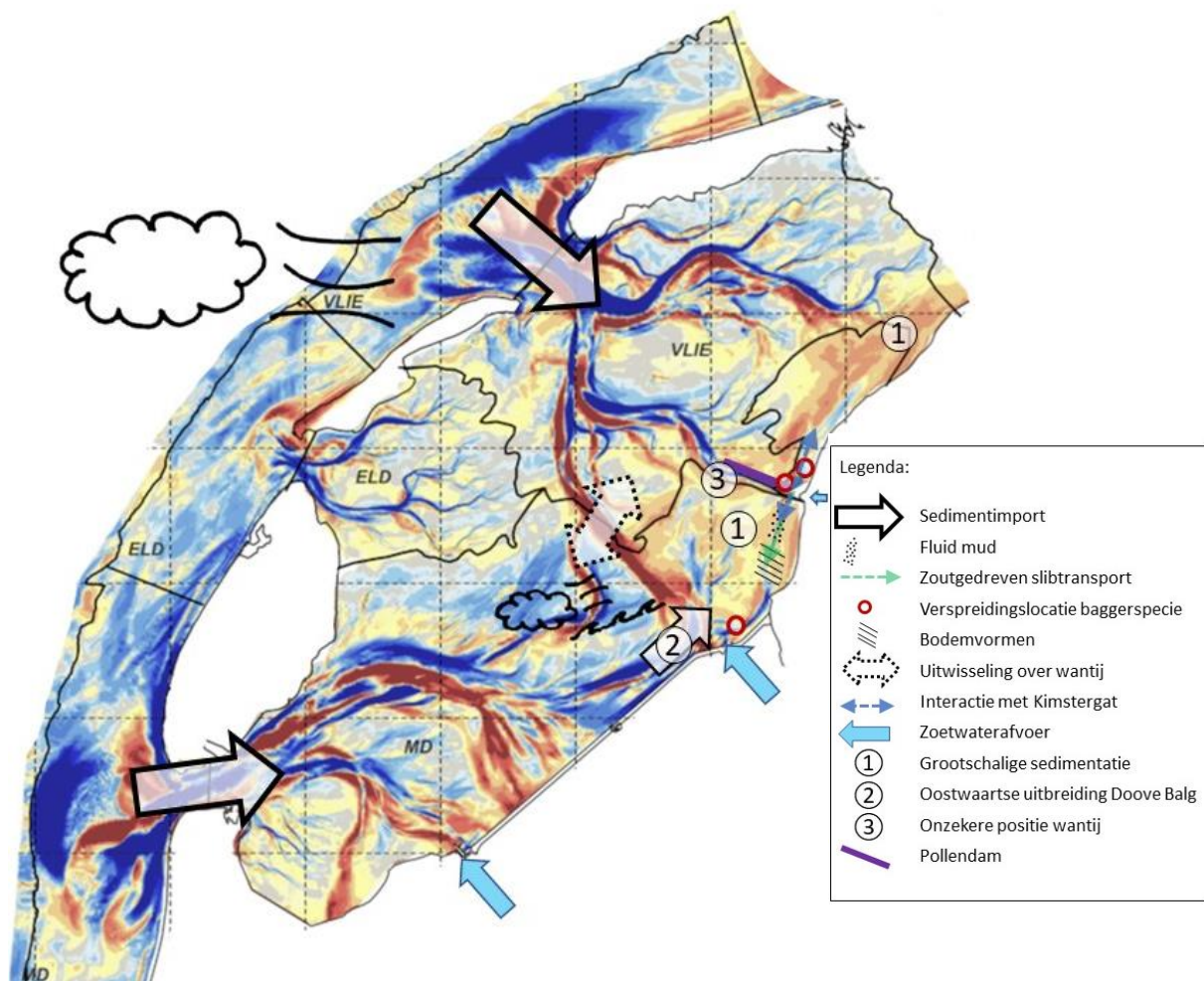
- Zand en slib wordt vanaf buiten (Hollandse kust, eilanden en met de slibrivier langs de Franse, Belgische en Nederlandse kust) aangevoerd en lokaal in de Waddenzee herverdeeld. Baggeren en verspreiden van baggerspecie uit de haven van Harlingen en de vaargeulen waaronder de Boontjes en Vaarwater langs de Pollendam leiden tot een andere herverdeling van het slib en lokaal tot een groter sedimentaanbod. Aanbevolen wordt om de impact daarvan op het onderhoud van de Boontjes met een modelstudie nader te onderzoeken.
- Wind en windgolven zijn belangrijk voor het afzetten van sediment in de vaargeul. Vanwege de geometrie en ligging van de vaargeul speelt dit vooral bij wind uit het zuidwesten, westen en noordwesten. Waarschijnlijk in mindere mate uit het noorden en oostelijke richtingen omdat dan de Pollendam en de Friese kust voor beschutting zorgen.
- Zoetwaterafvoer leidt tot gravitatiecirculatie in de vaargeul Boontjes, wat vermoedelijk zorgt voor een zuidwaarts gerichte stroming nabij de bodem, waarbij slib vanaf het Kimstergat, en dus ook vanaf de daar aanwezige verspreidingslocatie, de Boontjes in wordt gebracht. Door de drempelverwijdering is de residuele stroming nabij de bodem in de Boontjes mogelijk sterker geworden. Dit kan een oorzaak zijn van de toegenomen sedimentatie en de periodiek optredende fluid mud in het noordelijke deel van de Boontjes.
- Flocculatie als gevolg van biologische processen (algengroei) kan leiden tot een hogere valsnelheid van samengeklonterde slibdeeltjes, waardoor nabij de bodem fluid mud kan ontstaan. Het is nog onbekend waarom vorming van fluid mud alleen in de noordelijke Boontjes lijkt op te treden.
- Scheepvaart kan agitatie van bodemsediment veroorzaken, waardoor fluid mud kan ontstaan.

Onze huidige inzichten en hypothesen met betrekking tot de baggerwerkzaamheden zijn:

- De gebaggerde *volumes* nemen sterker toe dan de baggerde *massa*. Dit betekent dat er meer water wordt gebaggerd. Slib bevat meer water dan zand. Het gebaggerde materiaal in de vaargeul Boontjes (en vermoedelijk ook het bodemsediment) is dus slibrijker geworden. In het voorjaar en tijdens de zomer wordt fluid mud aangetroffen in het noordelijke deel van de vaargeul.
- De recente afname in de baggervolumes is mogelijk het gevolg van een in het verleden gebaggerde overdiepte en/of beter inzicht in de aanwezigheid van fluid mud. Volgens Rijkswaterstaat werd fluid mud in de eerste jaren na de drempelverwijdering nog weggebaggerd, maar sinds 2020 niet meer. Zolang het fluid mud doorvaarbaar is en geen hinder oplevert voor de scheepvaart wordt er niet dieper gebaggerd. Dat betekent dat sindsdien het baggerwerk zich richt op de toplaag van de compactere ondergrond met hogere dichtheid.
- In de zuidelijke Boontjes is de bodem minder slibrijk en zijn bodemvormen aanwezig die bij een zandig systeem passen, die met hun migratie tot een extra baggerinspanning leiden.
- De drempelverwijdering heeft de toename van de baggervolumes waarschijnlijk versterkt. Het vooraf voorspelde effect, van het stroomtrekken van de Boontjes als reactie op de drempelverwijdering, blijkt niet te zijn uitgekomen. Door de grootschalige morfologische veranderingen en mogelijk veranderde zout-gedreven stromingen als gevolg van de drempelverwijdering, vindt er meer sedimentatie van zand en slib plaats dan vooraf voorzien.
- De algehele verwachting is dat de sedimentatie in de vaargeul Boontjes niet zal afnemen. Verwacht wordt dat de benodigde baggervolumes voor vaargeulonderhoud (bij ongewijzigde baggerstrategie) juist verder toenemen als gevolg van de

grootschalige morfologische ontwikkeling, omdat verwacht wordt dat de debieten door grootschalige sedimentatie afnemen, waardoor tevens de geulen in omvang zullen afnemen.

- Het is de vraag welke mogelijkheden er zijn om de sedimentatie in de vaargeul tussen Kornwerderzand en Harlingen te verminderen. In een vervolgonderzoek zal worden bekeken of optimalisatie van de geuldimensies en bagger- en verspreidingsstrategie (met het oog op eventuele retourstroom) verbetering kan betekenen. Daarnaast kan ook nader onderzoek worden gedaan naar het baggeronderhoud indien gekozen zou worden voor een ander tracé (bijvoorbeeld via het Molenrak) en of een andere spuistrategie bij Kornwerderzand enige verbetering kan betekenen. De effectiviteit van (een deel van) deze maatregelen zal middels een numeriek model verder worden onderzocht. Overigens moet hier benadrukt worden dat het Molenrak aan dezelfde grootschalige morfologische ontwikkeling onderhevig is als de Boontjes. Ook daar vinden trendmatige verondiepingen plaats.



Figuur 5.1 Samenvatting van de systeemwerking. Ontwikkeling van de Boontjes wordt gestuurd door grootschalige processen: sedimentimport door de zeegaten, sedimentatie langs de vastelandskust (1), de morfologische ontwikkeling van de Doove Balg (2), de initiële uitbreiding van het Marsdiep naar het oosten en de (onzekere) positie van het wantij (3) en de grote uitwisseling over het wantij. De stromingspatronen zijn complex door de aanwezigheid van de Pollendam, de zoetwaterafvoer en samenhangend zuidwaarts sedimenttransport nabij de bodem. In de noordelijke Boontjes is fluid mud aanwezig, terwijl de zuidkant juist wordt gekenmerkt door zandige bodemvormen. Door wind en golven gedreven sedimenttransport leiden tot sedimentatie in de vaargeul, waarbij onder dynamische condities sediment vanaf de omringende platen wordt opgewoeld en in de vaargeul wordt afgezet. Verspreiding van baggerspecie kan bijdragen aan lokaal grotere sedimentbeschikbaarheid nabij de Boontjes en aan verhoogd baggerbezwaar.

6 Conclusie en aanbevelingen

In dit hoofdstuk worden de bevindingen uit de voorgaande hoofdstukken samengevat en wordt gereflecteerd op de hypothesen en doelstelling uit hoofdstuk 1. Tot slot worden aanbevelingen gegeven voor vervolgonderzoek in 2022 en voor de uitvoering van het vaargeulonderhoud.

6.1 Morfologische ontwikkeling

Hypothese 1: *Het gebied rond Boontjes zal zich, als gevolg van steeds verdere afname van kombergingsvolume ten gevolge van de (slib)sedimentatie langs de vastelandskust, steeds verder zal ontwikkelen tot ondiep platengebied met kwelders langs de kusten.*

In de decennia voor de verwijdering van de drempel was in het noordelijk deel van de Boontjes sprake van sedimentatie en dientengevolge een afname van het doorstroomoppervlakte van de geul. Dit is in lijn met de grootschalige morfologische ontwikkeling, die laat zien dat de omliggende platen sterk sedimenteren met zand (ten oosten en ten westen van de geul) en slib (met name ten oosten van de geul, aangrenzend aan het vasteland). Het zuidelijke deel van de Boontjes laat een tegenovergestelde trend zien: hier nam de omvang van de geul toe, nog voor de drempelverwijdering. Echter tonen de omliggende platen ook hier een langjarige sedimenterende trend. De verdieping van de geul is te verklaren door de omhoog komende platen, die leidden tot een geconcentreerde afvoer door een kleiner gebied. De overgang van de ontwikkeling, met in het noorden verkleining van de geuldoorsnede en in het zuiden vergroting van de geuldoorsnede, verschuift geleidelijk naar het zuiden. Dit is mogelijk een voorstadium van terugtrekking van de geul.

Recente dieptepeilingen tonen dat met name sedimentatie plaatsvindt in de noordelijke Boontjes, rond het drempelgebied waar het meeste aanlegbaggerwerk heeft plaatsgevonden. Gegeven de continue sterke sedimentatie rondom dit gebied, lijkt het erop dat de vaargeul de neiging heeft terug te gaan naar zijn oude toestand van vóór de drempelverwijdering.

Conclusie: De grootschalige sedimentatie aan de landwaartse zijde van de bekkens leidt tot verkleining van het kombergingsvolume van de geul Boontjes en leidt tot toenemende sedimentatie in de vaargeul.

6.2 Sedimentsamenstelling op de bodem

Hypothese 2: *De bodemsamenstelling van de geul is slibrijker geworden.*

Data uit 1995 en 2017 laten zien dat het bodemsediment in en rondom de Boontjes voornamelijk zandig is. Uitzondering hierop is het plaatgebied ten oosten van de geul, waar slibgehalten oplopen tot meer dan 50%. In 1995 zijn deze hoge slibgehalten ook in de geul zelf waargenomen. In recente metingen zijn deze locaties niet bemonsterd. De databeschikbaarheid (zowel de resolutie in de tijd als in de ruimte) is onvoldoende om te kunnen zeggen of (en hoeveel) de vaargeul Boontjes slibrijker of juist zandiger is geworden. Wel zien we dat het gebied rondom de noordelijke Boontjes (X=155 km, Y=575 km) en ten oosten ervan slibarmer lijkt te zijn geworden, terwijl het gebied ten westen van de vaargeul Boontjes slibrijker is geworden. Echter is nog niet duidelijk in hoeverre deze verschillen te wijten zijn aan de natuurlijke variabiliteit van het bodemslibgehalte. In het gebied rondom de zuidelijke Boontjes zijn er geen opvallende verschillen waargenomen.

Uit een vergelijking van dieptepeilingen in de vaargeul met verschillende meetfrequenties, blijkt dat met name in het voorjaar en in de zomermaanden er een fluid mud laag van 20- 50 cm dik aanwezig kan zijn in de noordelijke Boontjes. Het zuidelijke deel van de vaargeul is niet gemeten. Echter zijn hier zandribbels aanwezig (die niet aanwezig zijn in het noordelijke deel), en deze zijn goed zichtbaar in de dieptepeilingen, wat duidt op de afwezigheid van fluid mud. In de gemeten wintermaanden is de fluid mud laag in de noordelijke Boontjes afwezig, op een lokale uitzondering na, waar zo'n 10 cm fluid mud te zien is.

Conclusie: Er zijn aanwijzingen (aanwezigheid fluid mud, toename baggervolumes, observaties baggeraar) dat het noordelijke deel van de Boontjes slibrijker is geworden. De oorzaken van de verslibbing en fluid mud vorming zijn nog niet met zekerheid vastgesteld.

6.3 Ontwikkeling baggerwerkzaamheden

Hypothese 3: *De gebaggerde volumes zijn wel sterk toegenomen, maar de gebaggerde massa is niet significant veranderd.*

De baggervolumes tonen een sterke toename tussen 2017 en 2019 (en een lichte afname in 2020, vermoedelijk omdat de baggeraar de uitvoermethode van de werkzaamheden toen heeft aangepast). De waargenomen toename in gebaggerde volumes kan gedeeltelijk worden verklaard uit een veranderde samenstelling van het gebaggerde materiaal op basis van de geregistreerde soortelijke dichtheden. Deze gemeten dichtheden laten zien dat het gebaggerde materiaal een veranderde samenstelling heeft ten opzichte van het zandige materiaal dat er in het verleden werd gebaggerd en nog steeds door de baggeraar wordt aangenomen in de omrekening van volume naar massa.

Doordat er steeds slibrijker materiaal wordt gebaggerd, nemen de *volumes* zeer sterk toe, maar de gebaggerde *massa* minder sterk. De dichtheid is niet voor alle baggerwerkzaamheden gemeten, waardoor de gebaggerde massa enkel geschat kan worden. Uit die schatting blijkt dat er wel degelijk ook een toename waarneembaar is in de gebaggerde massa, namelijk een groei van 100.000 tds (ton droge stof) in 2017 naar ongeveer 170.000-270.000 tds in 2019 (toename met een factor 1.7-2.7).

Conclusie: Het gebaggerd volume toont ca. een factor 4 toename en de gebaggerde massa ca. een factor 2 toename ten opzichte van 2017. Het verschil kan verklaard worden door het baggeren van meer slibrijk materiaal.

6.4 Mogelijk sturende processen

Hypothese 4: *Sedimentatie in de geul wordt versterkt door stormen. Tijdens een storm wordt sediment op de platen gemobiliseerd, waarna het materiaal naar de geul wordt getransporteerd. Hierdoor wordt kort na een stormconditie de meeste aanzanding en/of aanslibbing waargenomen.*

Uit de analyse van windcondities komt naar voren dat sommige stormen, met name stormen afkomstig uit het zuidwesten of zuidzuidwesten, direct in verband lijken te staan met sedimentatie in de geul en vervolgens een groot baggervolume. Stormen uit andere windrichtingen hebben relatief weinig effect op de vaargeul Boontjes vanwege de geografische ligging van de vaargeul nabij de vastelandskust. In de geanalyseerde periode zijn overigens geen grote noordwesterstormen voorgekomen.

Concluderend lijken stormen vanuit bepaalde windrichtingen inderdaad bij te dragen aan de netto sedimentatie in de geul, die primair wordt gestuurd door de grootschalige sedimentatiepatronen. Deze event-gedreven sedimentatie wordt niet opgeruimd door de relatief hoge stroomsnelheden in de Boontjes, zoals voor aanvang van de drempelverwijdering was aangenomen, maar wordt weggebaggerd. Deze hypothese kan nader worden bestudeerd met behulp van een numeriek model, als onderdeel van de geplande werkzaamheden voor 2022.

Conclusie: Stormen uit bepaalde richtingen (ZZW-W) kunnen leiden tot extra sedimentatie en baggerinspanning in de vaargeul Boontjes.

Hypothese 5: Lage afvoeren uit de spuisluis bij Kornwerderzand zorgen voor een afname van de afvoer door de Vaargeul Boontjes, waardoor meer sedimentatie in de geul ontstaat.

Lage spuidebieten bij Kornwerderzand lijken voor een aantal momenten samen te vallen met grote baggervolumes. De lagere spuitdebieten in de zomerperiode van de jaren 2018 en 2019 hebben mogelijk gezorgd voor een afname van de stroomsnelheden in de vaargeul Boontjes. Vermoedelijk heeft hierdoor meer sedimentatie heeft plaatsgevonden in de geul. In deze zomerperiodes werd ook een fluid mud laag van 20-50 cm waargenomen in de vaargeul Boontjes die hiermee samen kan hangen. Het is niet duidelijk of dit fenomeen ook voor de drempelverwijdering al een rol speelde. Er zijn echter ook grote baggervolumes tijdens meer gemiddelde afvoeren geregistreerd. Mogelijk speelt op deze momenten een ander fenomeen, ofwel gerelateerd aan de afvoeren (bijv. estuariene circulatie, zie hypothese 6, of de aanvoer van algen), of aan een ander sturend proces (bijv. stormcondities). Ook deze hypothese wordt in 2022 verder bestudeerd met behulp van een numeriek model.

Hypothese 6: De zoetwaterafvoer vanuit de spuisluis Kornwerderzand creëert een gravitatiecirculatie, ten gevolge van de saliniteitsgradiënt, met een noordwaarts (zeewaarts) gerichte stroming aan het oppervlak en een zuidwaarts (landwaarts) gerichte stroming nabij de bodem. Door de drempelverwijdering kan slib vanaf de verspreidingslocaties nabij Harlingen gemakkelijker door zoutgedreven stroming naar de Boontjes worden getransporteerd, waar het wordt afgezet.

Op basis van de data analyse in dit rapport is het niet mogelijk om deze hypothese goed te toetsen. De invloed van het spuidebiet bij Kornwerderzand op estuariene circulatiepatronen in de vaargeul Boontjes wordt in 2022 nader onderzocht aan de hand van een modelstudie.

6.5 Aanbevelingen

Voor het vervolg van dit onderzoek in 2022 worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Het toepassen van een numeriek model om het systeembegrip te vergroten en de sturende processen beter in beeld te brengen, specifiek het onderscheid tussen de macro- en meso-schaal morfologische ontwikkeling t.o.v. de drempelverwijdering, de invloed van de veranderde getijstroming, het effect van stormen en de werking van gravitatiecirculatie.
- Het toepassen van een numeriek model om een verbeterde prognose te maken van de benodigde onderhoudsbaggerwerkzaamheden bij gelijkblijvende geuldimensies en bij een aantal realistische alternatieven.
- Op basis van de resultaten van de numerieke modelstudie die meer inzicht verschaffen in de sturende processen kan de noodzaak voor aanvullende metingen (bijvoorbeeld

saliniteits- en of SSC profielen of hoogfrequente saliniteit en SSC metingen) worden ingeschat.

- Onderzoek de invloed van agitatie van bodemslib door scheepvaart op aanslibbing en vorming van fluid mud.
- Nader onderzoek naar de hydrodynamische en morfologische effecten van de Pollendam op het Kimstergat-Boontjes systeem. De vraag is of de sedimentatie rond Molenrak en Boontjes versterkt wordt door de aanwezigheid van de Pollendam. Modelstudie kan uitwijzen of aanpassing van Pollendam kan leiden tot optimalisatie.
- De in dit rapport gepresenteerde samenvatting van de systeemwerking uitwerken tot een conceptueel denkmodel en deze aanscherpen op basis van de resultaten van de numerieke modelstudie.

Op basis van de analyses in dit rapport van het gedrag van het systeem worden de volgende aanbevelingen gedaan voor het uitvoeren van de onderhoudsbaggerwerkzaamheden:

- De analyse van de baggerwerkzaamheden toonde aan dat de volumes zeer sterk zijn toegenomen, maar de gebaggerde massa een minder sterke toename hebben gekend. Dit komt doordat er steeds slibrijker materiaal wordt gebaggerd. Daarom adviseren wij om de verandering van de sedimentsamenstelling mee te nemen in prognoses voor de onderhoudswerkzaamheden en dus af te stappen van de vaste omrekenfactor van beunvolume naar tonnen droge stof. Daarnaast is onze aanbeveling om de massa als uitgangspunt te nemen in plaats van het volume. Tot slot is het voor verdere analyse van groot belang om de soortelijke dichtheid van het gebaggerde sediment te (blijven) registreren voor alle baggervrachten.
- De dieptepeilingen laten zien dat er in het voorjaar en tijdens de zomer een fluid mud laag ontwikkelt. Sinds 2020 wordt hier rekening mee gehouden door dieptepeilingen in de noordelijke Boontjes met zowel singlebeam als multibeam te bemeten. Door meer inzicht te hebben in de aanwezigheid van fluid mud, kan worden onderzocht in hoeverre deze sliblaag doorvaarbaar is en de noodzaak van verwijdering van fluid mud worden onderzocht.
- Om uit te sluiten dat er in het zuidelijke deel van de vaargeul fluid mud is, adviseren wij de hele geul met multibeam te meten. Dit zal ook inzicht geven in hoe ver de fluid mud laag verspreid is.

Referenties

- Baart, F., Gelder, P. v., Ronde, J. d., Koningsveld, M. v., & Wouters, B. (2012). The effect of the 18.6-year lunar nodal cycle on regional sea-level rise estimates. *J. Coast. Res.*, 28, 511-516.
- Baptist et al. 2019 Beneficial use of dredged sediment to enhance salt marsh development by applying a 'Mud Motor': evaluation based on monitoring <https://doi.org/10.18174/500109>
- Colina Alonso, A. (2020). Evolutie van het bodemslib in de Waddenzee. Data analyse. Deltares rapport 11205229-001-ZKS-0003.
- Colina Alonso, A., van Maren, D., Elias, E., Holthuijsen, S., & Wang, Z. (2021). The contribution of sand and mud to infilling of tidal basins in response to a closure dam. *Marine Geology*.
- Colina Alonso, A., van Maren, D., Herman, P. M., van Weerdenburg, R., Huismans, Y., Holthuijsen, S., . . . Wang, Z. (in prep.). Feedback mechanisms segregating sand and mud deposits.
- Elias, E. (2019). Een actuele sedimentbalans van de Waddenzee. Deltares rapport 11203683-001-ZKS-0002.
- Elias, E., & Vermaas, T. (2018). Een actuele sedimentbalans van de Westelijke Waddenzee (1933-2015).
- Elias, E., Stive, M., Bonekamp, J., & Cleveringa, J. (2003). Tidal inlet dynamics in response to human interventions. *Journal of Coastal Engineering* 45(4), 629-658.
- Elias, E., Van der Spek, A., Wang, Z., & De Ronde, J. (2012). Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century. *Netherlands Journal of Geosciences*, 91(03), 293-310.
- Folmer, E., Dekinga, A., Holthuijsen, S., Meer, J. v., Mosk, D., Piersma, T., & Veer, H. v. (2017). Species Distribution Models of Intertidal Benthos. Tools for Assessing the Impact of Physical and Morphological Drivers on Benthos and Birds in the Wadden Sea. Texel: NIOZ Royal Netherlands Institute for Sea Research.
- Herman, P. M., van Kessel, T., Vroom, J., Dankers, P., Cleveringa, J., Vries, B. d., & Villars, N. (2018). Mud dynamics in the Wadden Sea: Towards a conceptual model. Deltares rapport 11202177-000-ZKS-0011.
- Hijma, M., & Kooi, H. (2018a). Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens. Technical Report Deltares.
- Hijma, M., & Kooi, H. (2018b). Bodemdaling in het kustfundament en de getijdenbekkens (deel 2). Technical Report Deltares.
- Hollebrandse, F. (2005). Temporal development of the tidal range in the southern North Sea. TU Delft MSc thesis.
- Mulder, H., & Overbeek, S. (2019, 7 24). Analyse baggervolumes en morfologische ontwikkelingen Boontjes. Memo. Rijkswaterstaat.
- Nederhoff, C., Smits, B., & Wang, Z. (2017). KPP Waddenzee Kennisontwikkeling morfologie en baggerhoeveelheden: Data analyse hypsometrie en getij. Deltares rapport.
- Oost, A., & Punte, P. K. (2003). Autonome morfologische ontwikkeling westelijke Waddenzee. Een doorkijk naar de toekomst. Rapport RIKZ/2004.021.
- Oost, A., Cleveringa, J., & Taal, M. (2019). Morfologie Kombergingsgebieden Marsdiep en Vlie. Beheerbibliotheek Waddenzee, versie 2019 Deltares rapport 1203669-000-ZKS-0006.
- Schulz, K.; Gerkema, T. (2018). An inversion of the estuarine circulation by sluice water discharge and its impact on suspended sediment transport. *Est., Coast. and Shelf Sci.* 200: 31-40. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.09.031>
- van Geer, P. (2007). Long-term morphological evolution of the Western Dutch Wadden Sea. WLJ Delft Hydraulics rapport Z4169.00.

- Vermeersen, B., Slangen, A., Gerkema, T., Baar, F., Cohen, K., Dangendorf, S., . . . Slobbe, D. (2018). Sea-level change in the Dutch Wadden Sea. *Geologie en Mijnbouw/Netherlands J. Geosci.*, 97, 79-127.
- Wang, Z., & Nederhoff, K. (2018). Witboek: Het sedimentdelende systeem van de Nederlandse Waddenzee. Deltares rapport 11202177-000.
- Wang, Z., E.P.L., E., A.J.F., v. d., & Q.J., L. (2018). Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100. *Netherlands Journal of Geosciences Volume 97*, pag. 183-214.
- Wang, Z., Vroom, J., Van Prooijen, B., Labeur, R., & Stive, M. (2013). Movement of tidal watersheds in the Wadden Sea and its consequences on the morphological development. *International Journal of Sediment Research* 28: 162-171.

Appendices

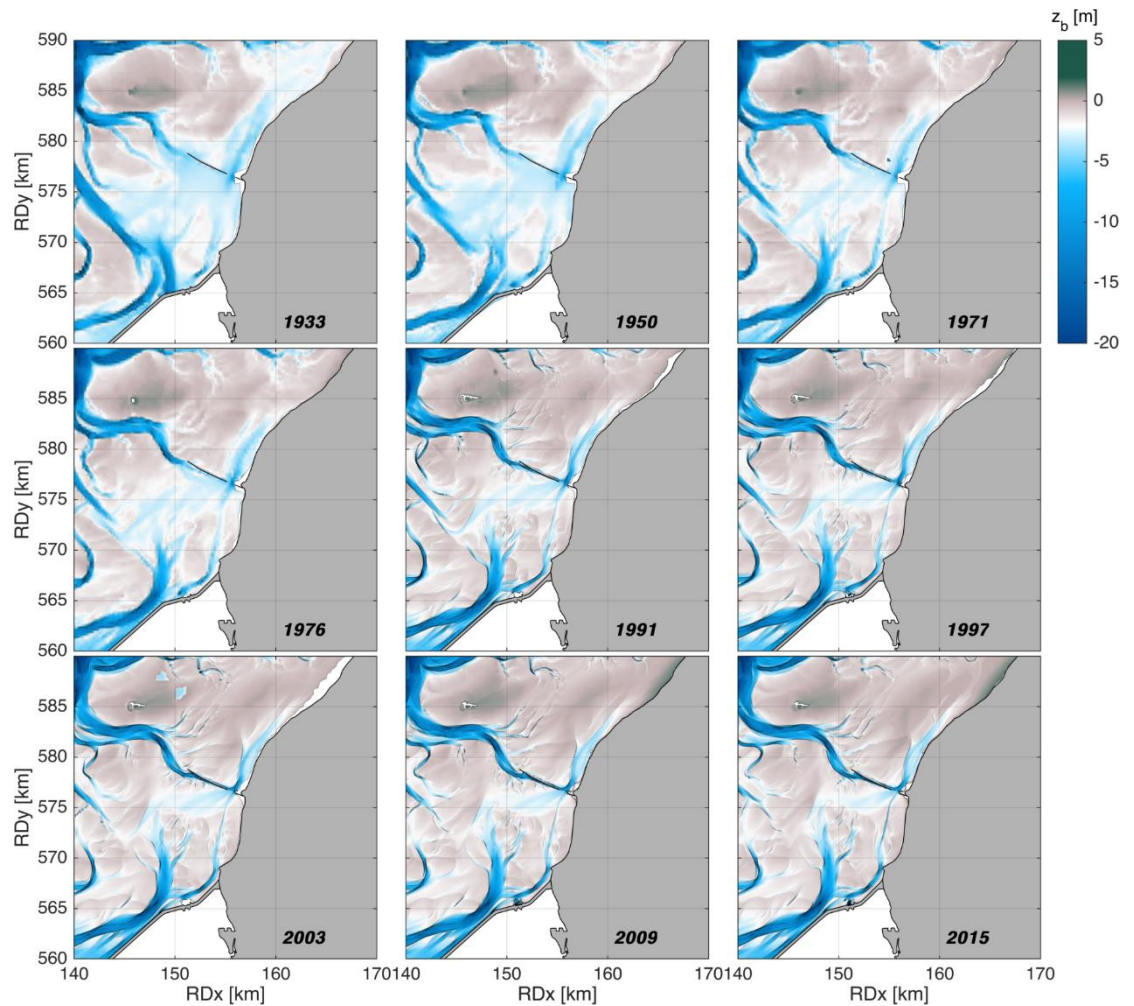
A Aanvullende kaarten van de westelijke Waddenzee

B Dieptepeilingen vaargeul Boontjes

C Aanvullende resultaten sedimentbalans

D Aanvullende analyse mogelijk sturende processen

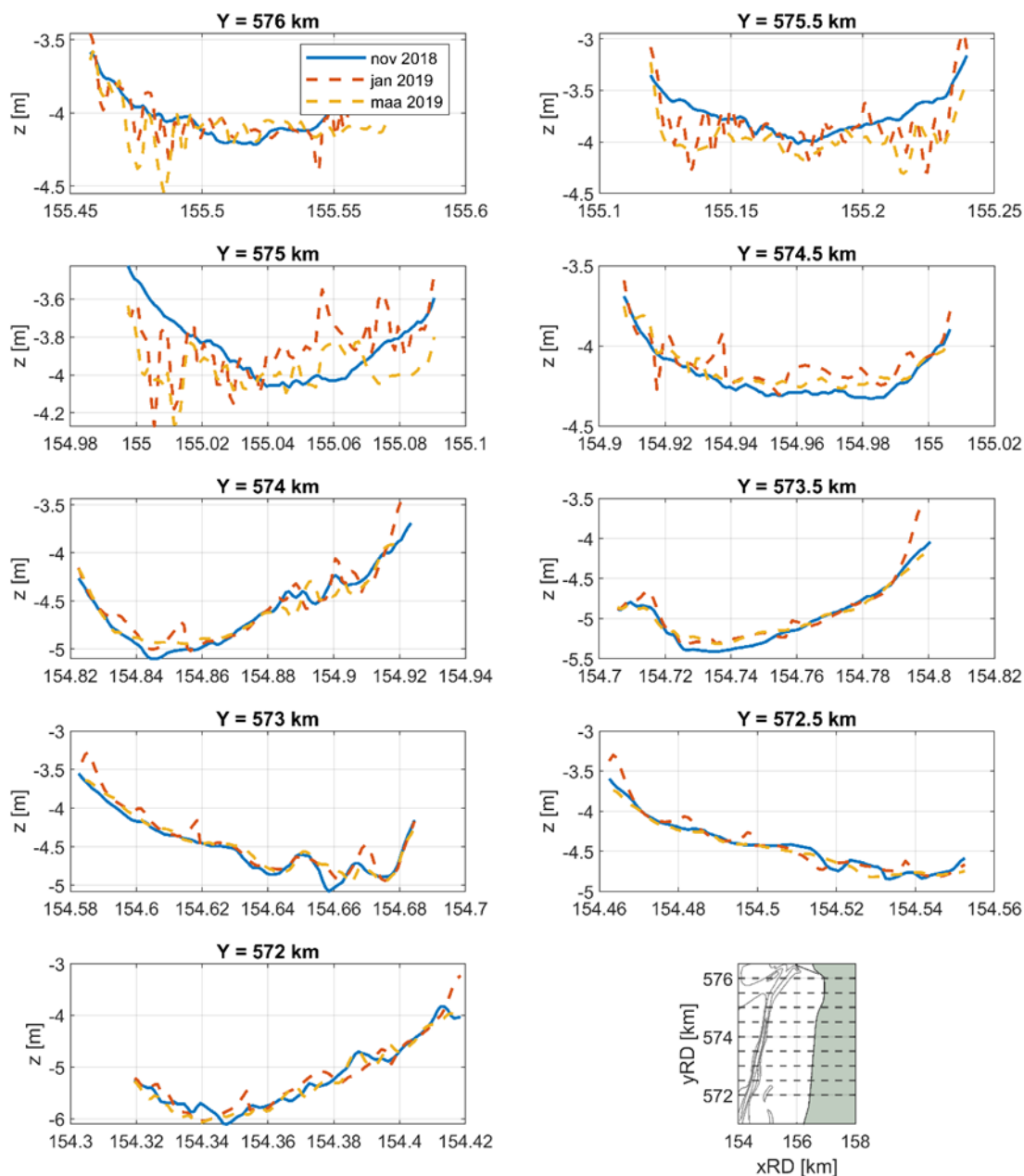
A Aanvullende kaarten van de westelijke Waddenzee



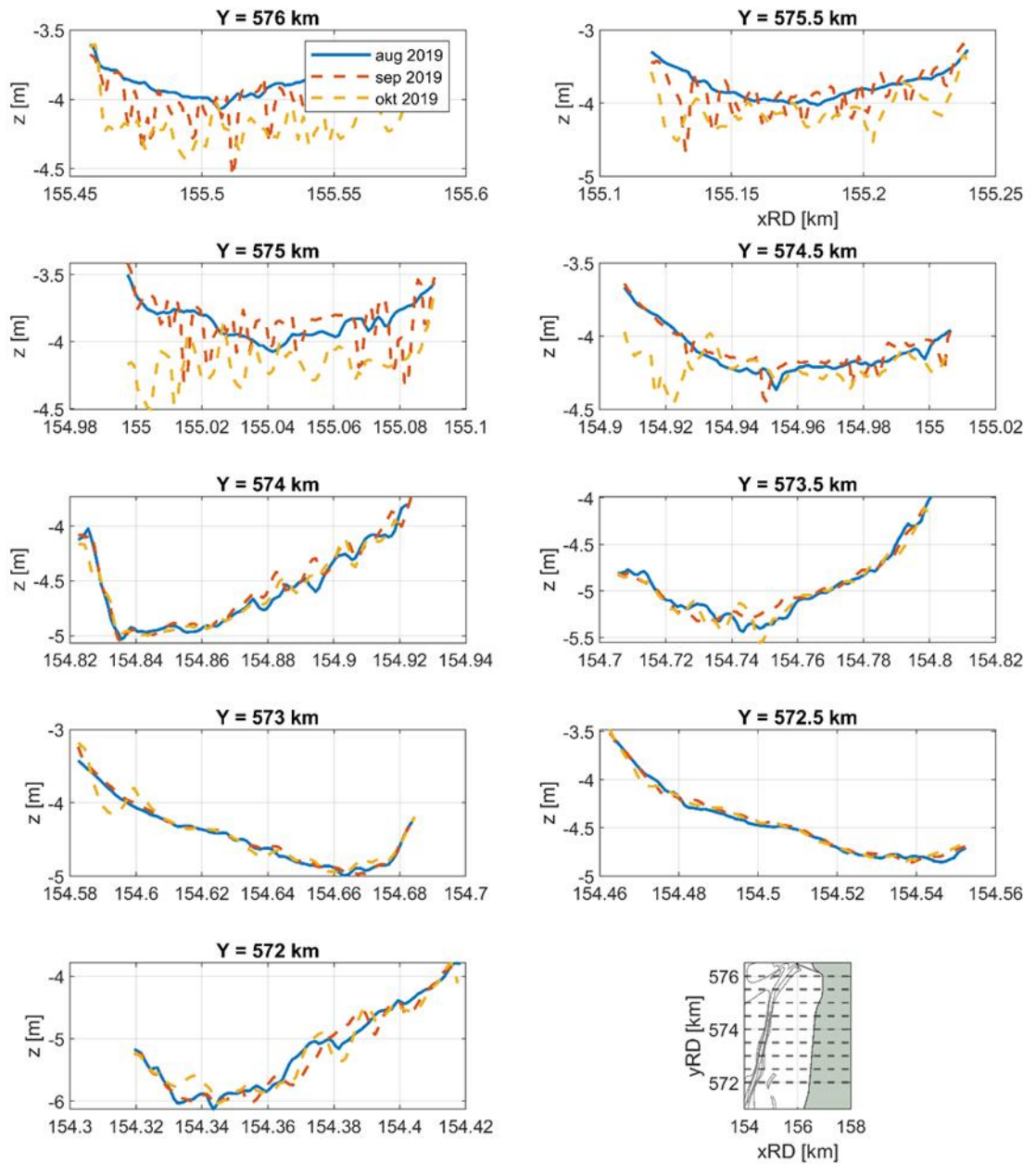
Figuur A.1 Bodemhoogte in de bekkens van het Marsdiep en het Vlie, rondom de vaargeul Boontjes (Vaklodingen data).

B Dieptepeilingen vaargeul Boontjes

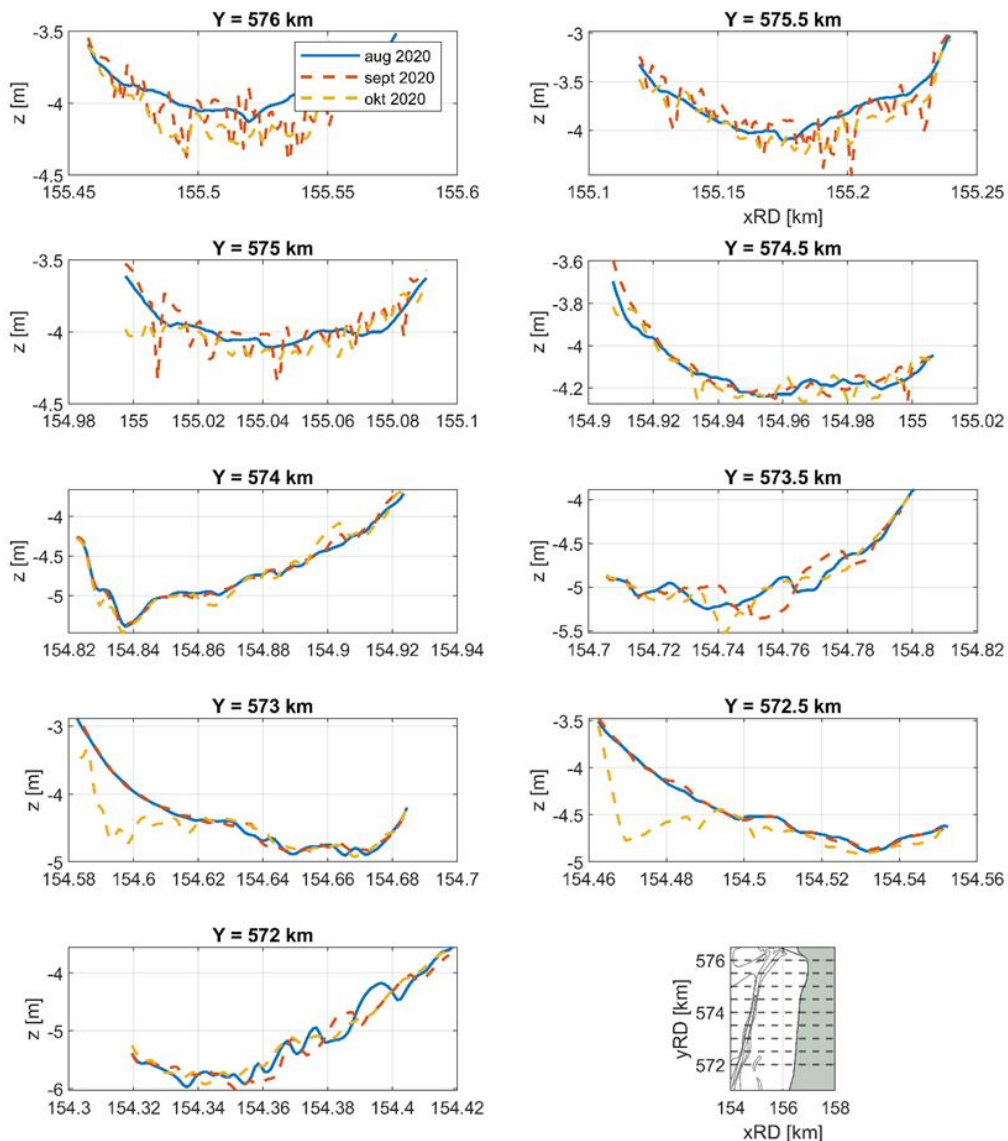
B.1 Peilingen rondom grote baggerwerkzaamheden



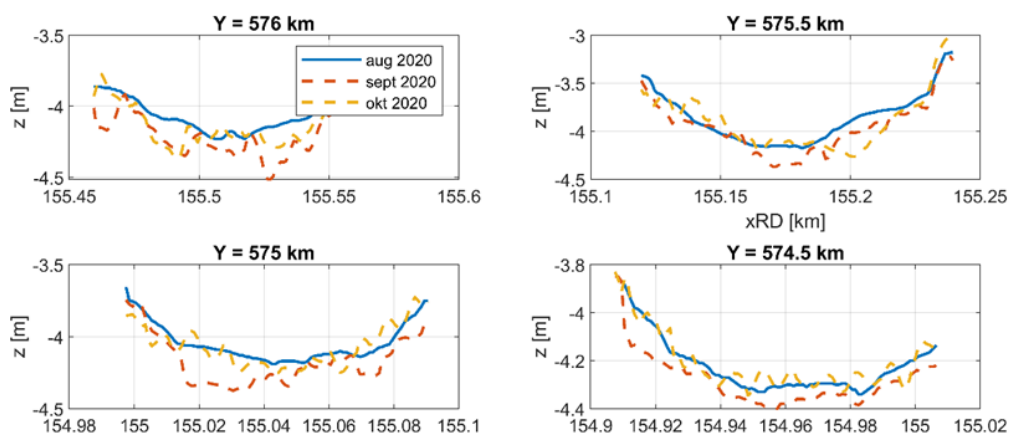
Figuur B.1 Bodemligging vaargeul Boontjes oktober 2018 – februari 2019. De weergegeven peilingen zijn met een multibeam echolood gemeten. De plot rechtsonder toont de locatie van de doorsnedes (ook aangegeven in de titels). Blauw: november 2018; rood: januari 2019; geel: maart 2019.



Figuur B.2 Bodemligging vaargeul Boontjes augustus 2019 – oktober 2019. De weergegeven peilingen zijn met een multibeam echolood gemeten. De plot rechtsonder toont de locatie van de doorsnedes (ook aangegeven in de titels). Blauw: augustus 2019; rood: september 2019; geel: oktober 2019.

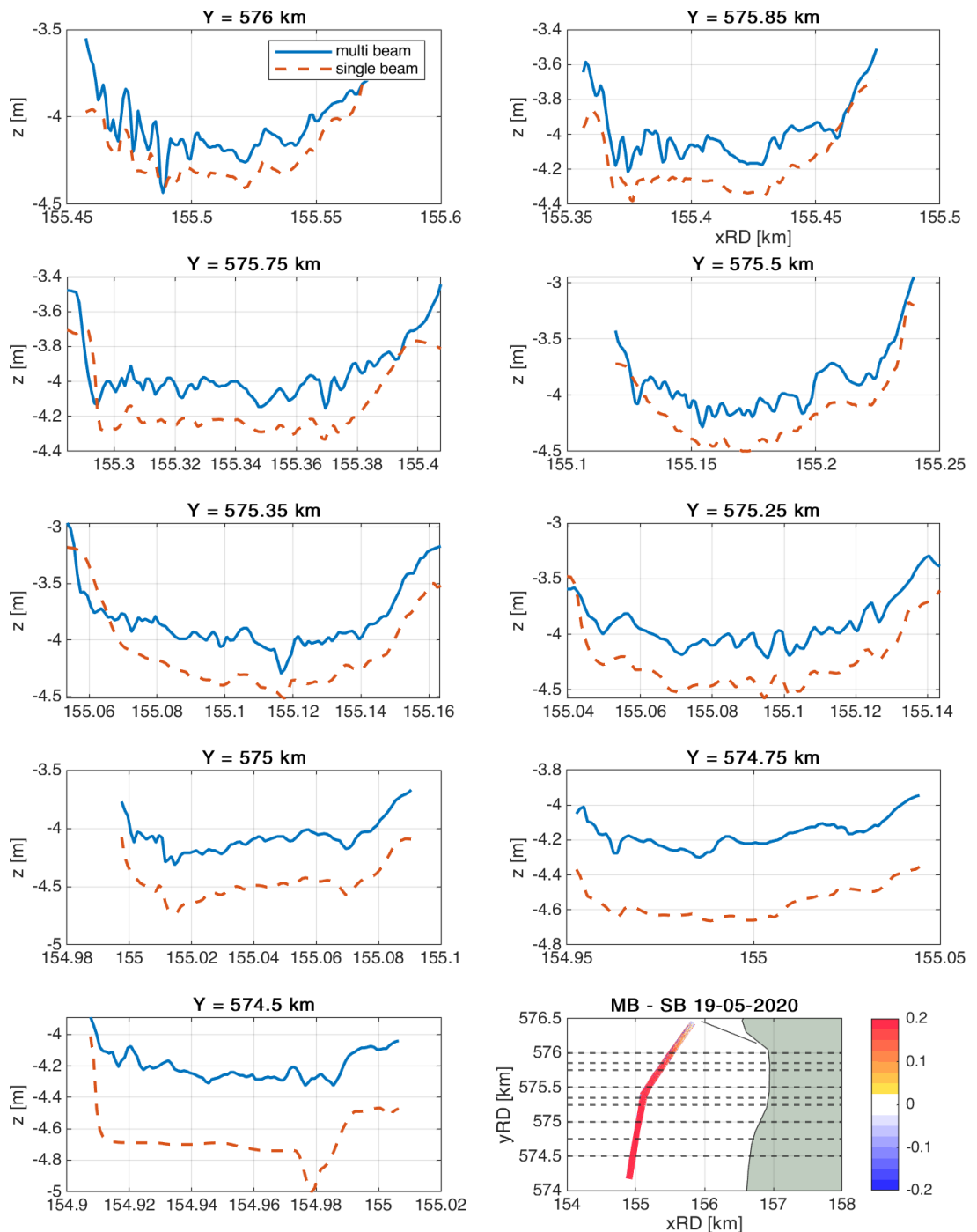


Figuur B.3 Bodemligging vaargeul Boontjes augustus 2020 – oktober 2020. Multibeam metingen. De plot rechtsonder toont de locatie van de doorsnedes (ook aangegeven in de titels). . Blauw: augustus 2020; rood: september 2020; geel: oktober 2020.

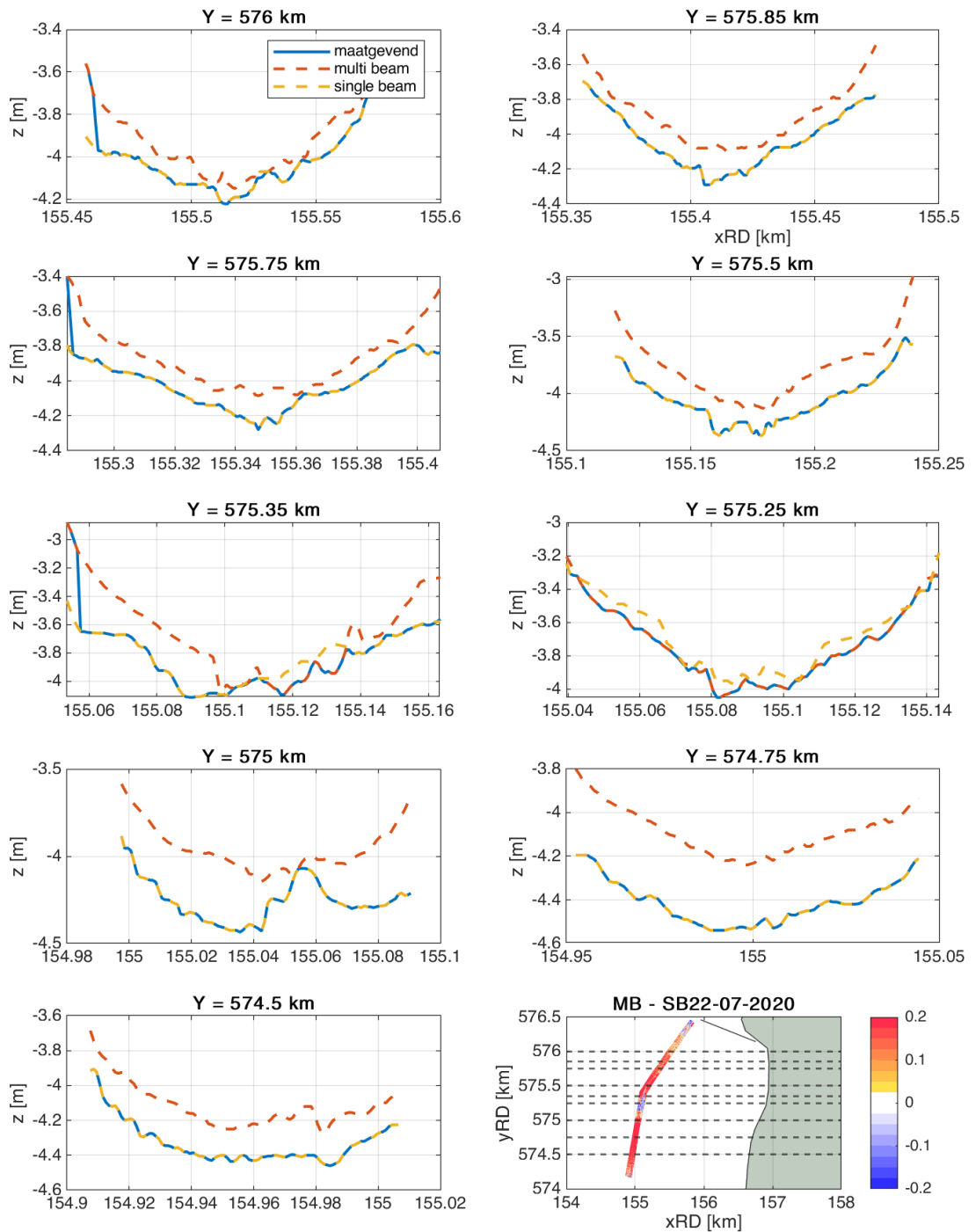


Figuur B.4 Bodemligging vaargeul Boontjes augustus 2020 – oktober 2020. Singlebeam metingen. Blauw: augustus 2020; rood: september 2020; geel: oktober 2020.

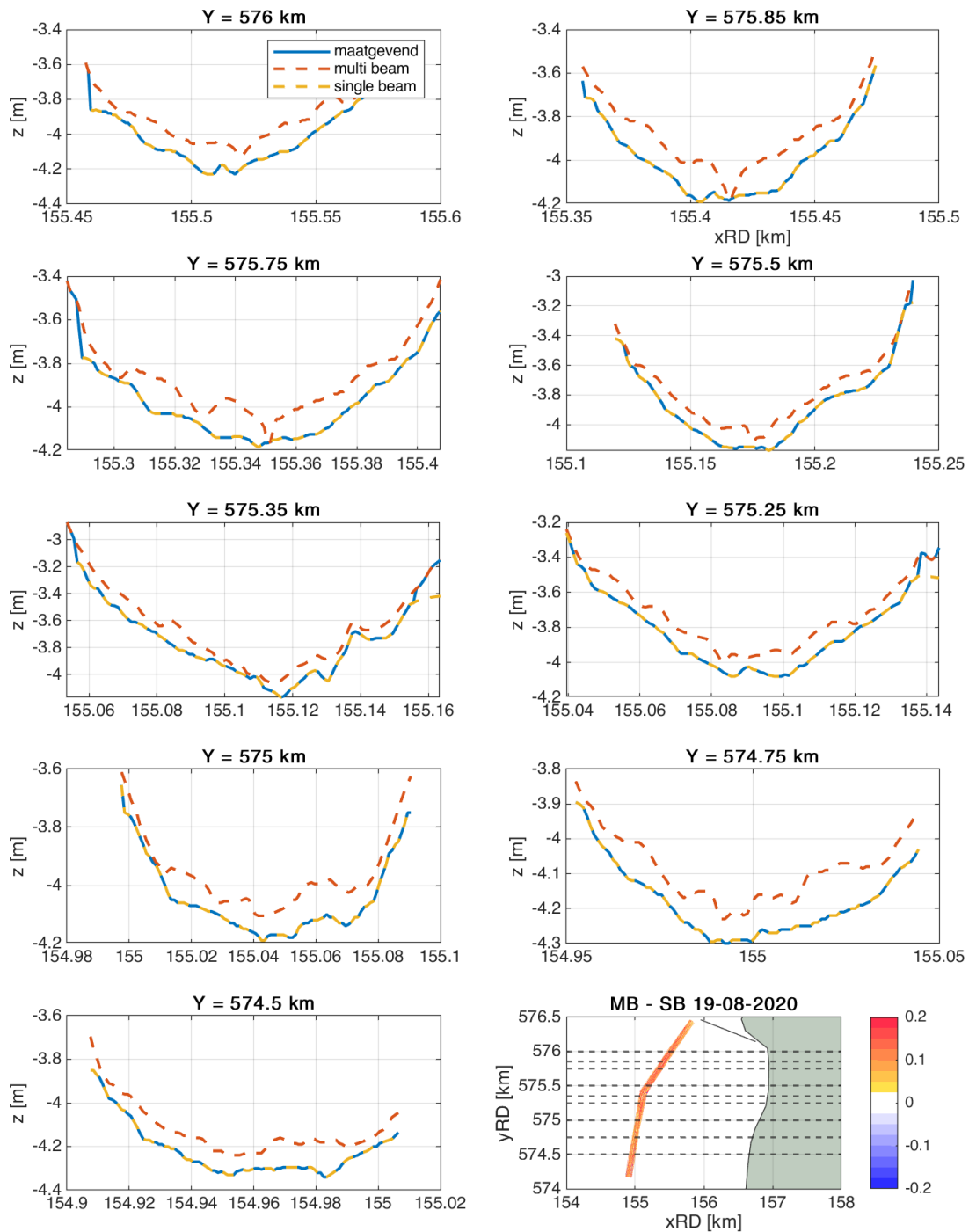
B.2 Fluid mud



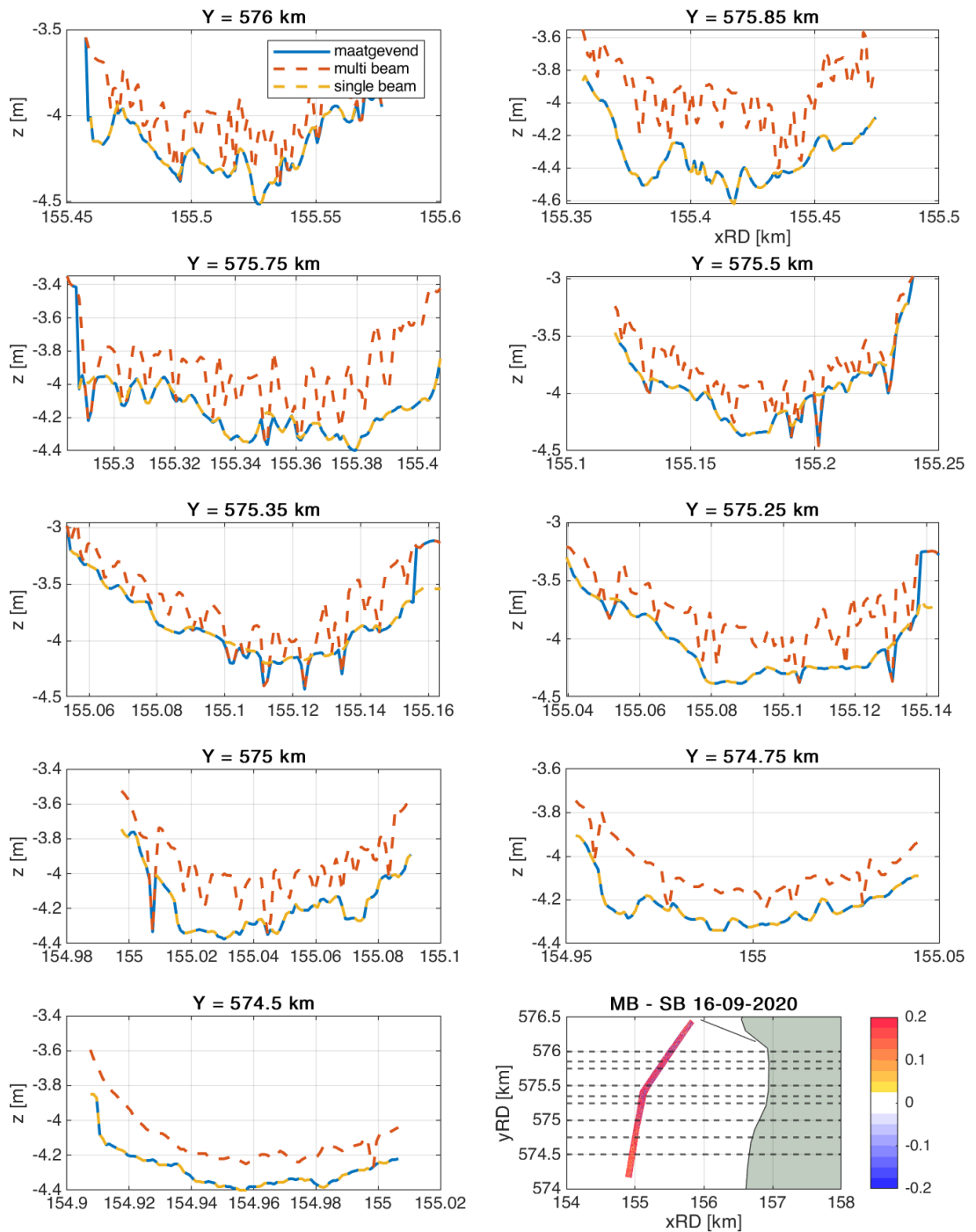
Figuur B.5 Bodemligging van 19 mei 2020, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag.



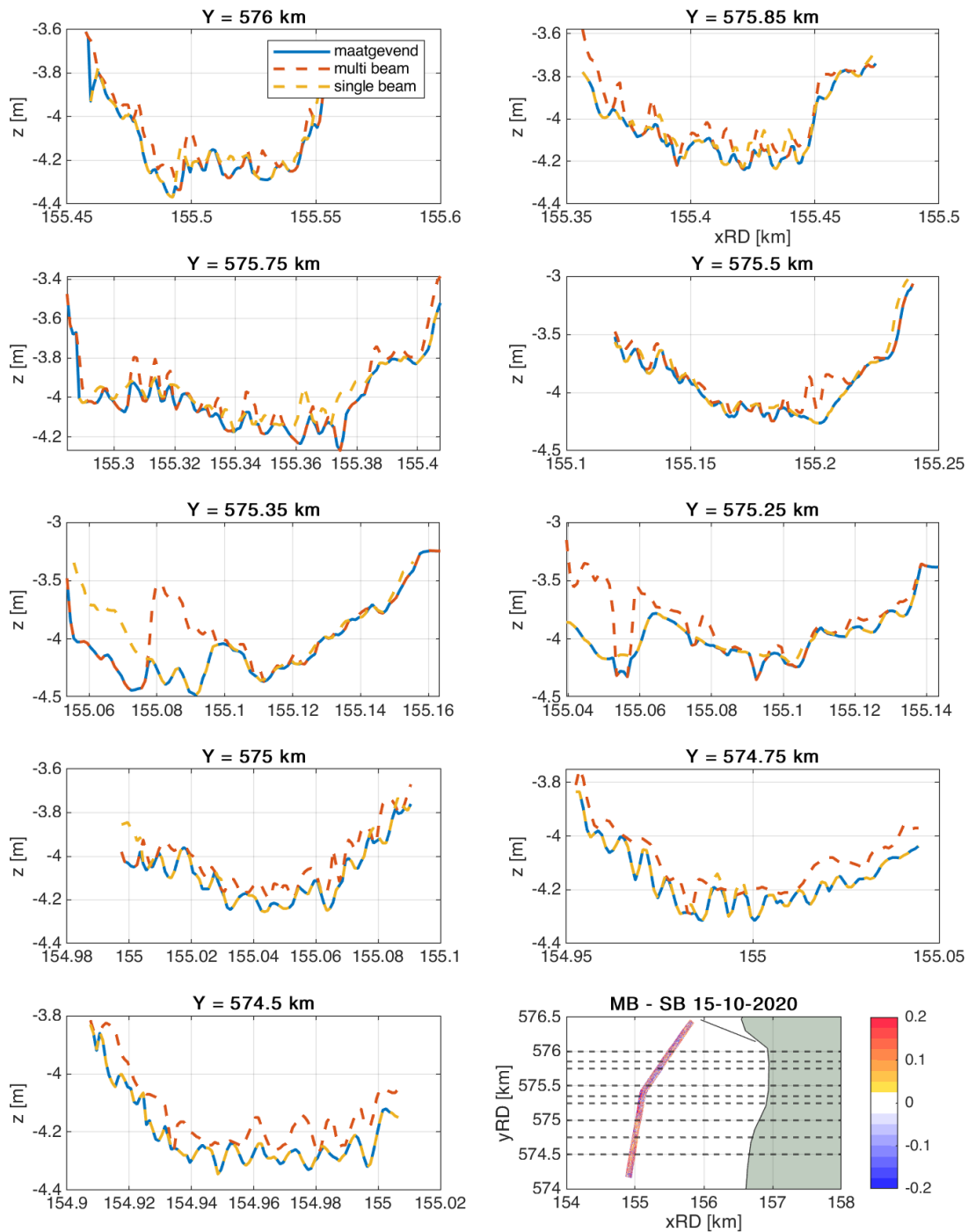
Figuur B.6 Bodemligging van 22 juli 2020, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezuwaar.



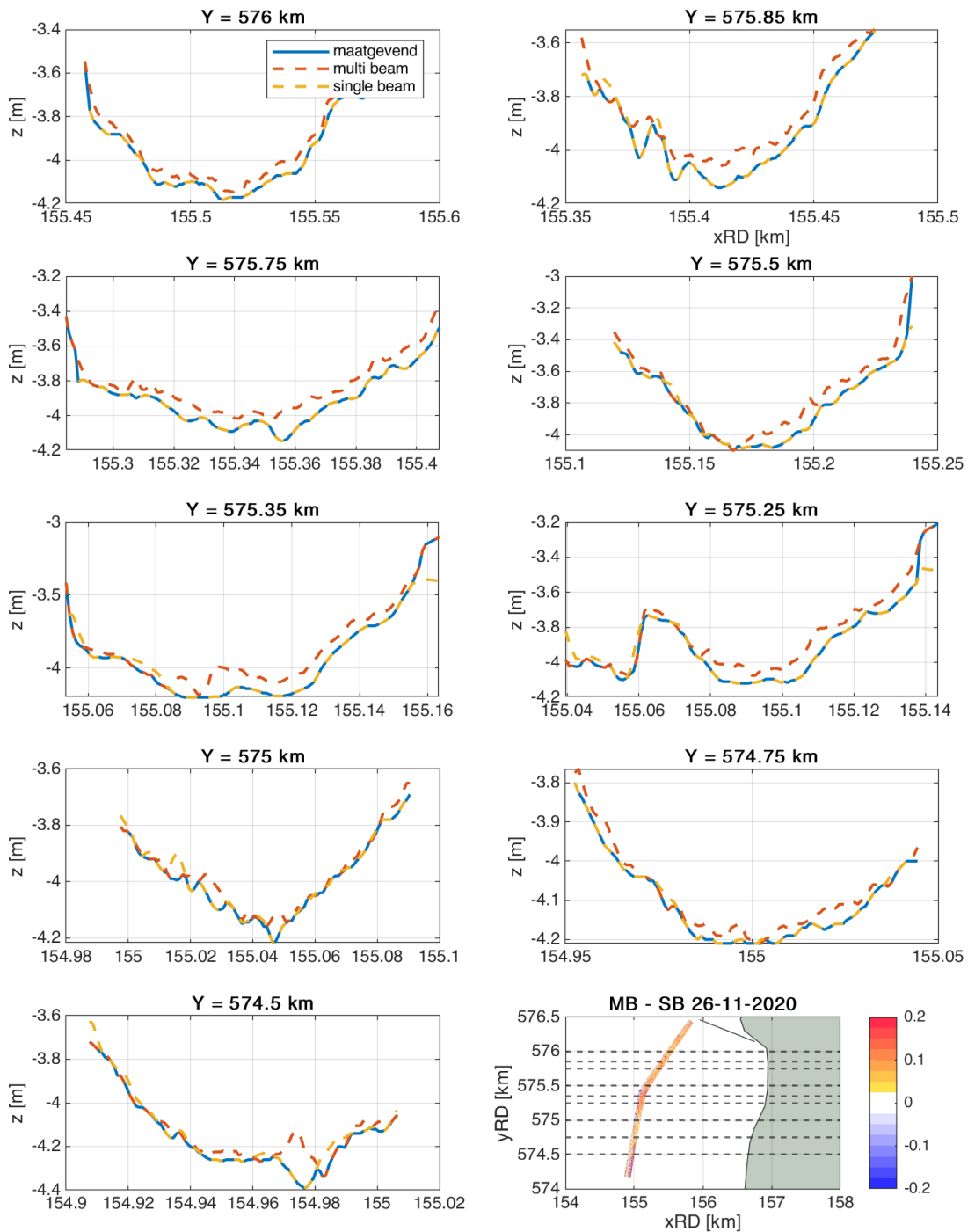
Figuur B.7 Bodemligging van 19 augustus 2020, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



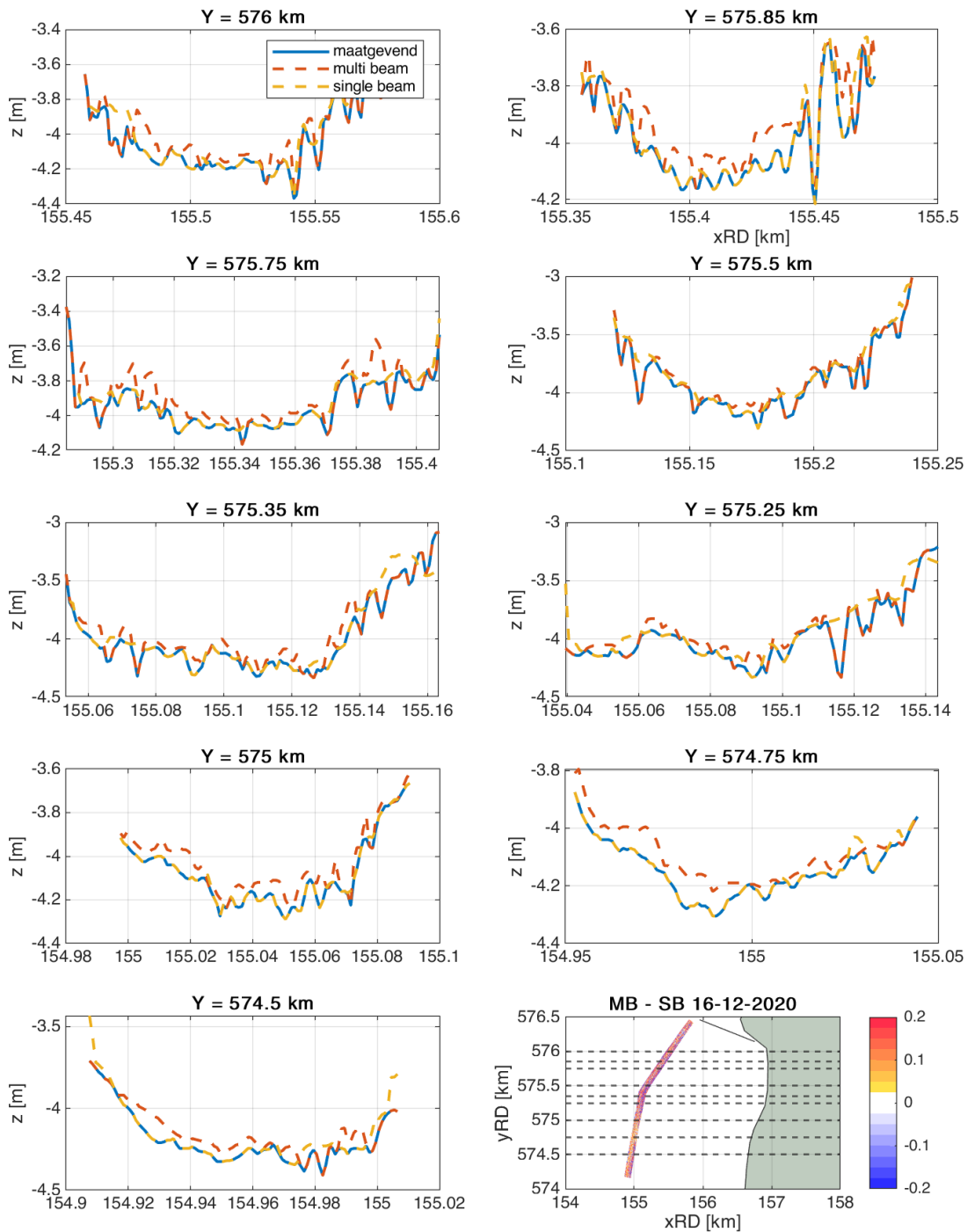
Figuur B.8 Bodemligging van 16 september 2020, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



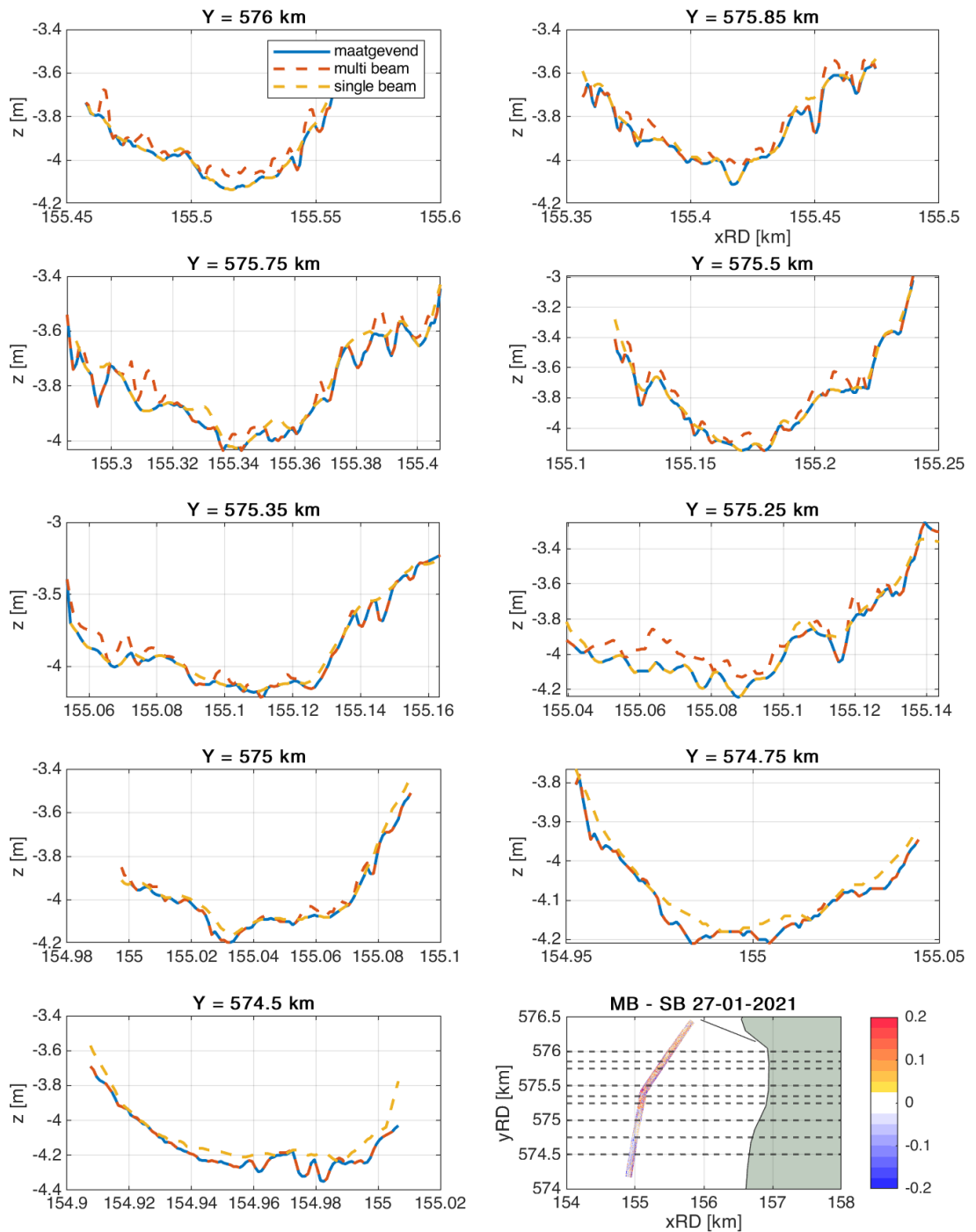
Figuur B.9 Bodemligging van 15 oktober 2020, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



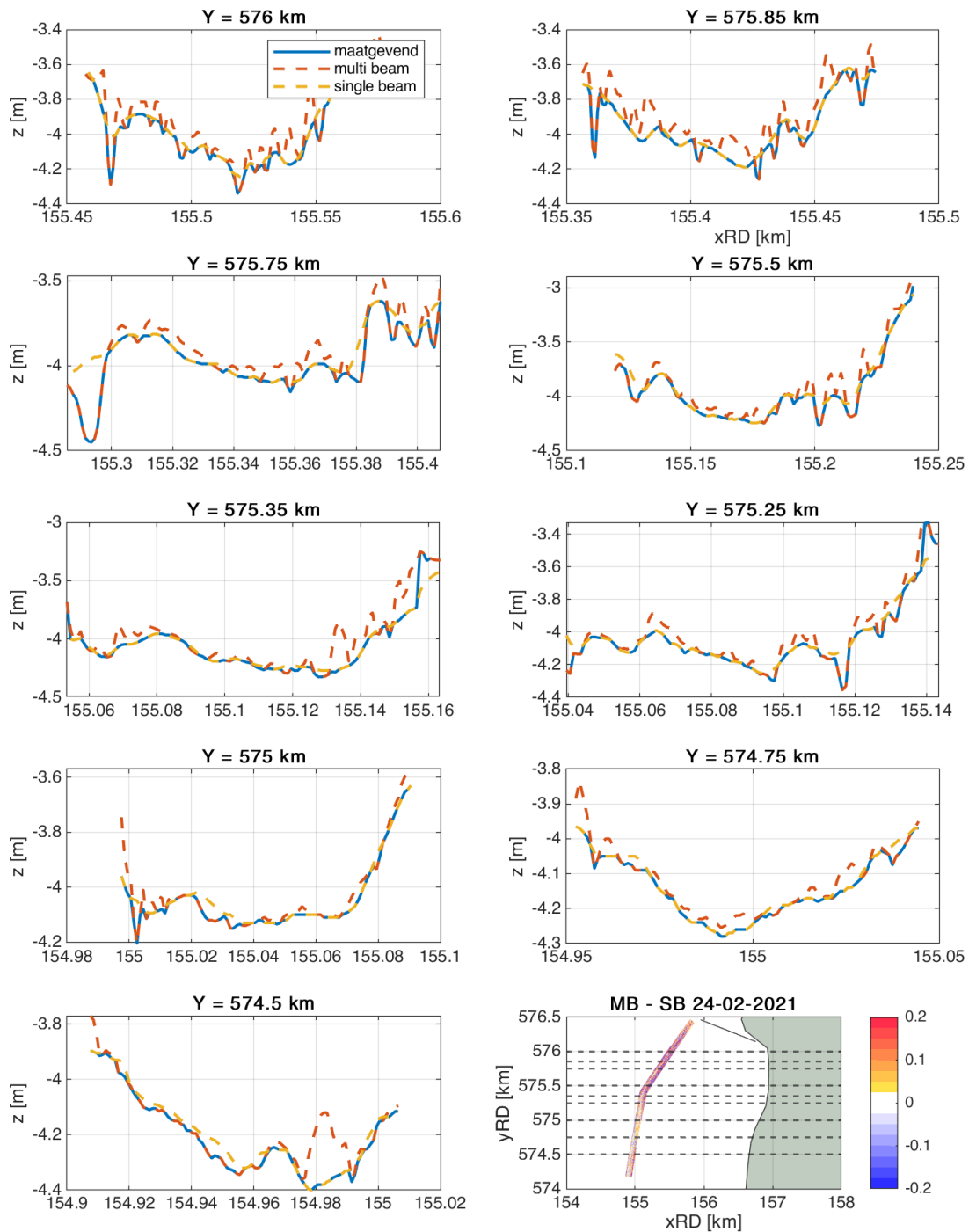
Figuur B.10 Bodemligging van 26 november 2020, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsneden langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



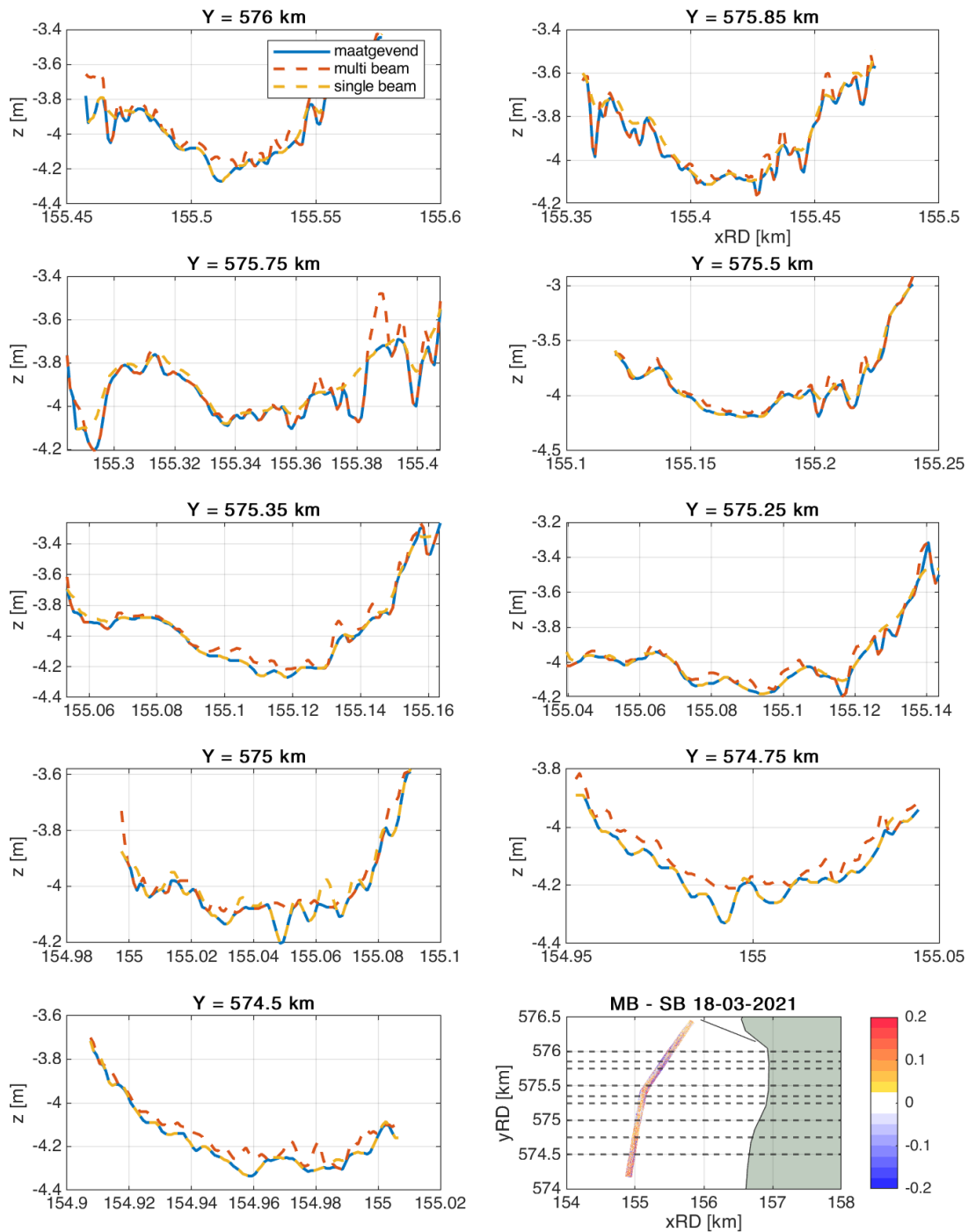
Figuur B.11 Bodemligging van 16 december 2020, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



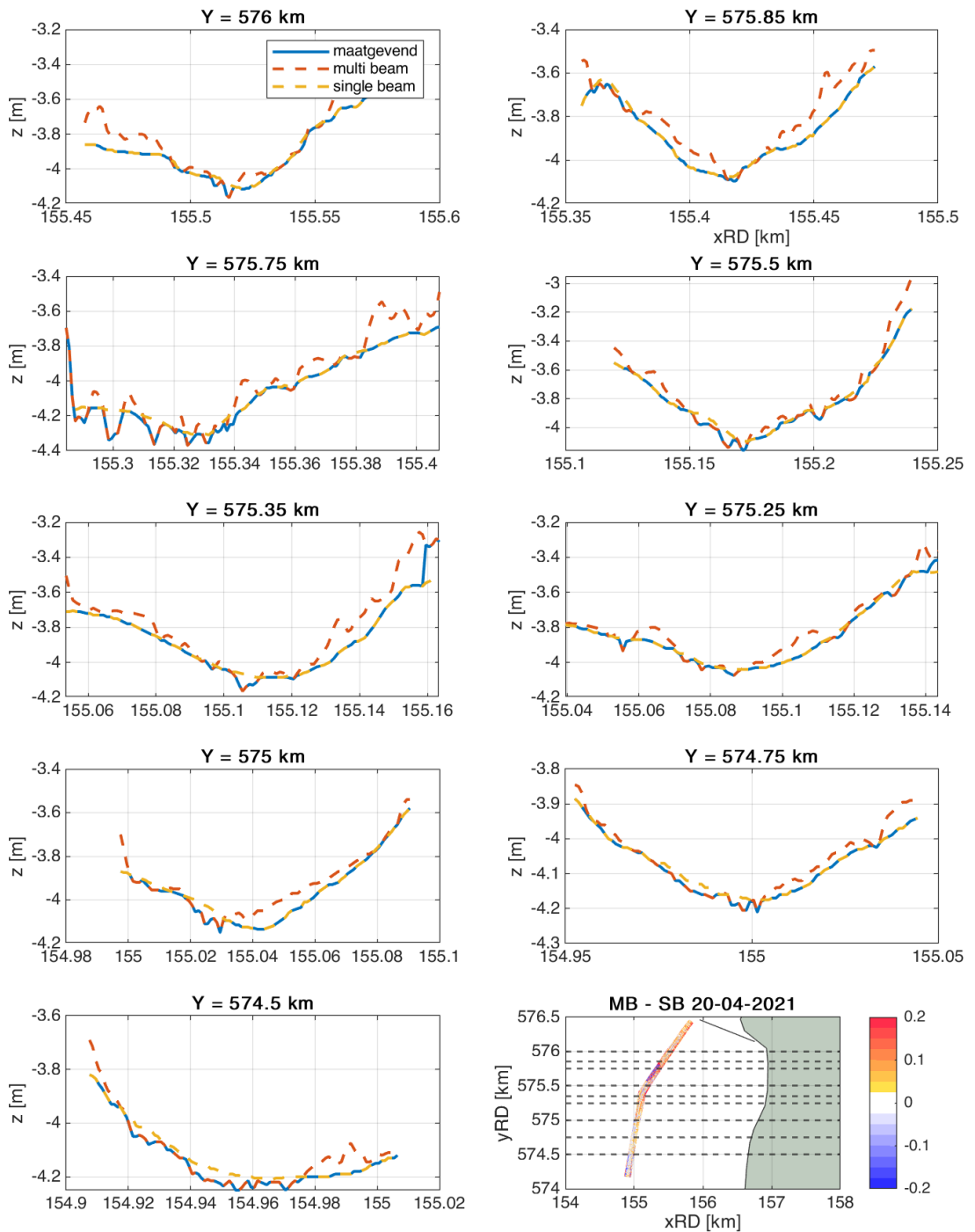
Figuur B.12 Bodemligging van 27 januari 2021, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



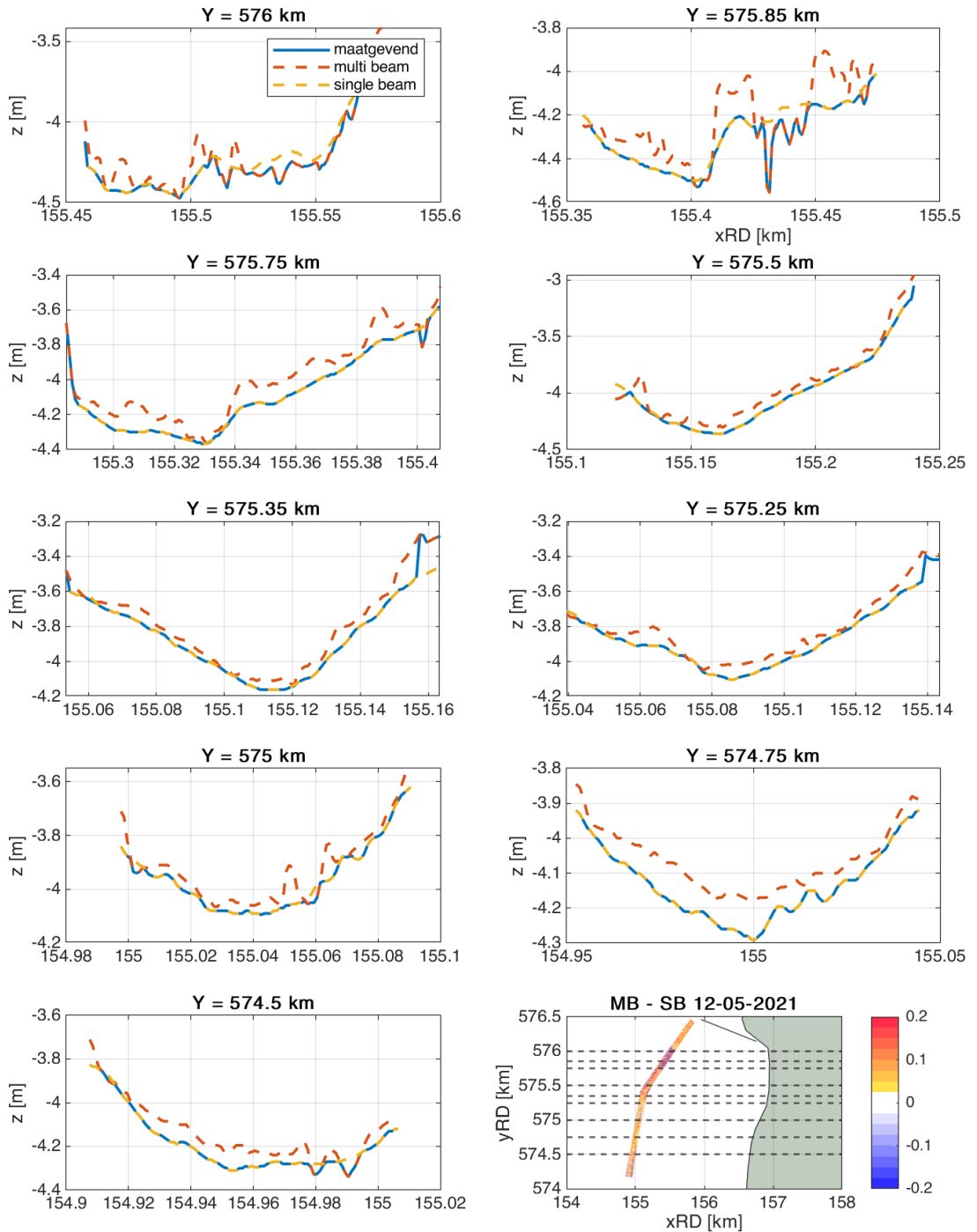
Figuur B.13 Bodemligging van 24 februari 2021, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



Figuur B.14 Bodemligging van 18 maart 2021, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



Figuur B.15 Bodemligging van 20 april 2021, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezwaar.



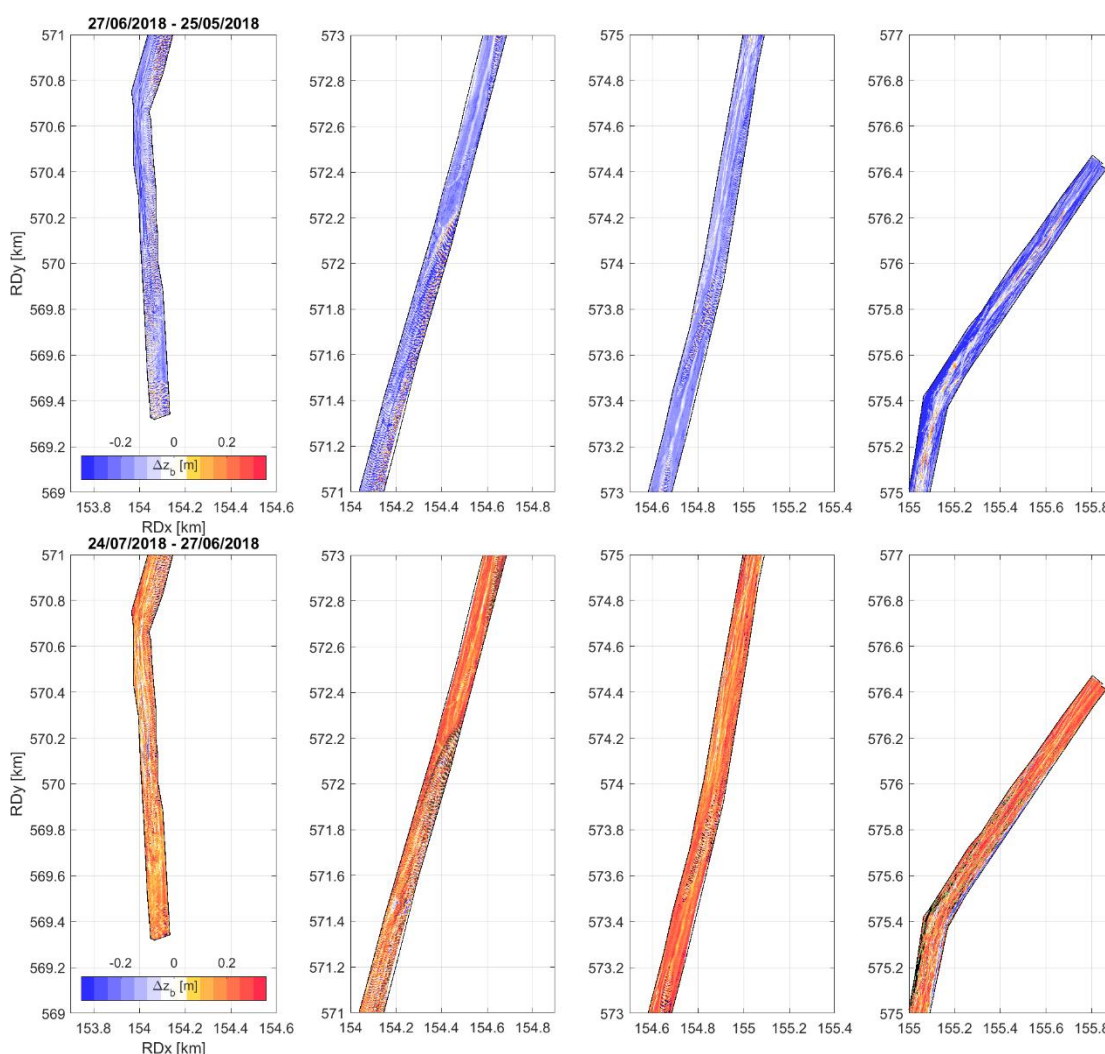
Figuur B.16 Bodemligging van 12 mei 2021, gemeten met een singlebeam echolood (meet door fluid mud heen) en een multibeam echolood (meet tot aan de fluid mud laag), voor 9 doorsnedes langs de noordelijke Boontjes (ten noorden van 574 km). Het verschil geeft een indicatie voor de dikte van de fluid mud laag. De laagste waarde is maatgevend voor het baggerbezuwaar.

C Aanvullende resultaten sedimentbalans

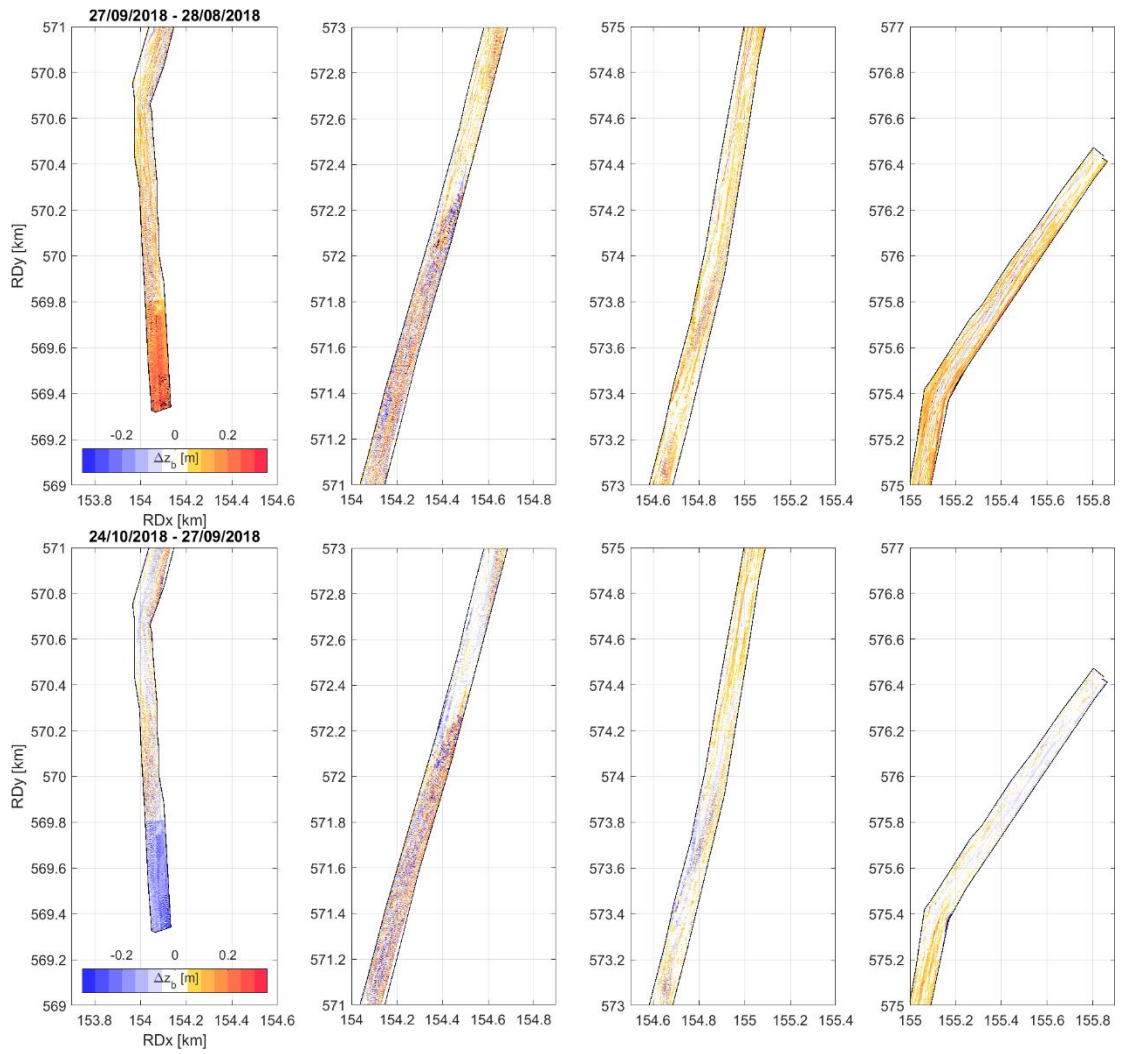
C.1 Foutieve bodemkaarten

Voor de sedimentbalans (gepresenteerd hoofdstuk 4.2) is een drietal bodemkaarten uitgesloten, omdat deze een onrealistische bodemligging hebben die tot onrealistische sedimentatie/erosie patronen leiden. Het gebruik van deze bodemkaarten zou data artefacten introduceren, die de volumelans op een sterke maar onjuiste manier zouden beïnvloeden. Het gaat om de volgende peilingen:

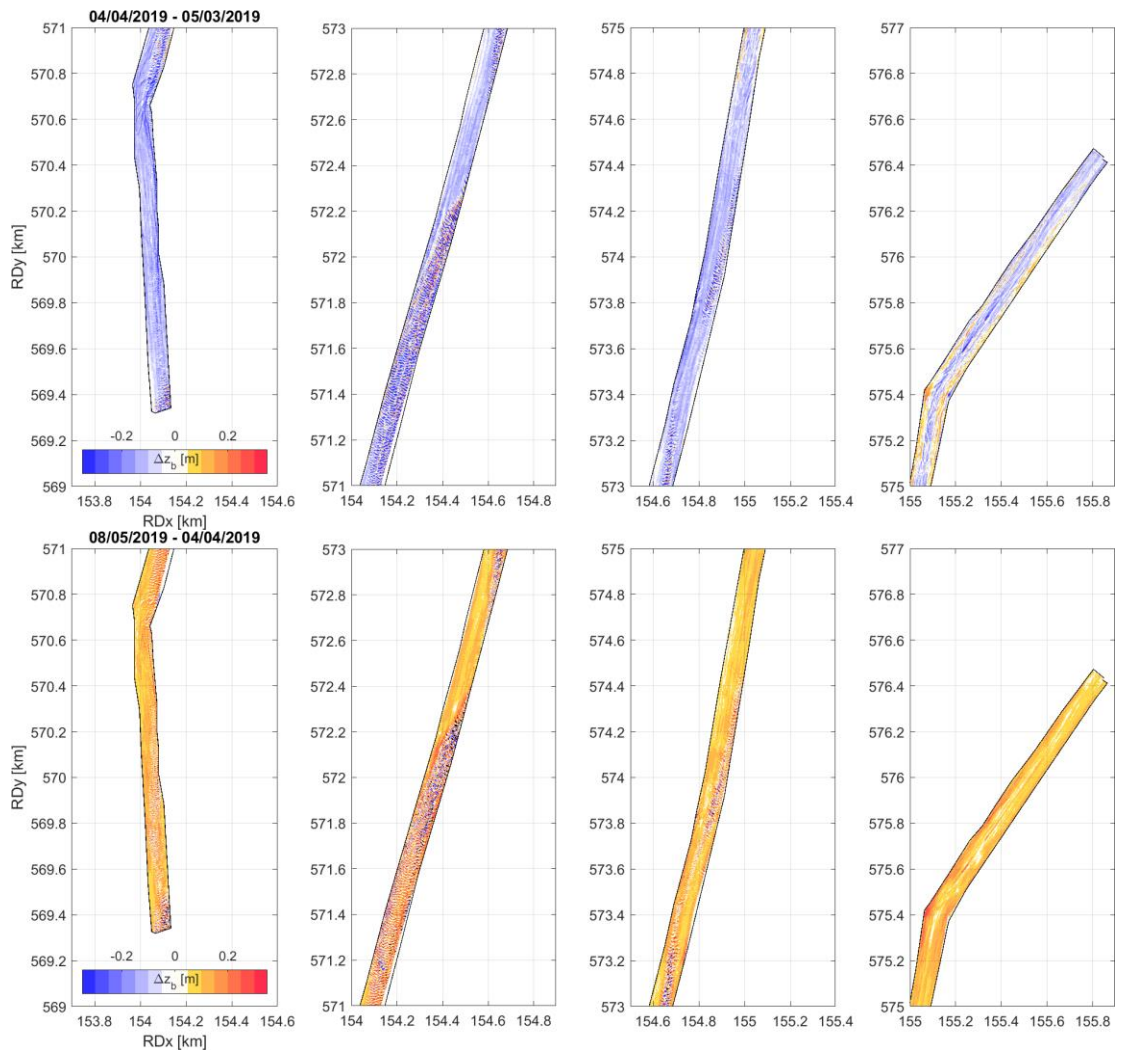
- 27/06/2018: Deze peiling heeft over de hele lengte en breedte van de vaargeul Boontjes een (bijna uniform) lagere bodemligging van ongeveer 10 cm, terwijl dit niet valt te herleiden uit de baggerdata (er is in die periode wel over een groot deel van de lengte gebaggerd, maar niet over de hele breedte).
- 27/09/2018: Deze peiling heeft over het zuidelijke deel (tot aan $Y = 569.8$ km) een afwijkende hogere bodemligging van ongeveer 10 cm, die abrupt verandert boven 569.8 km.
- 04/04/2019: Deze peiling heeft evenals de peiling van 27/06/2018 een afwijkende lagere ligging (10 cm) in het hele gebied.



Figuur C.1 Verschil peilingen 27/06/2018-25/05/2018 en 24/07/2018-27/06/2018 tonen afwijking in peiling 27/06/2018

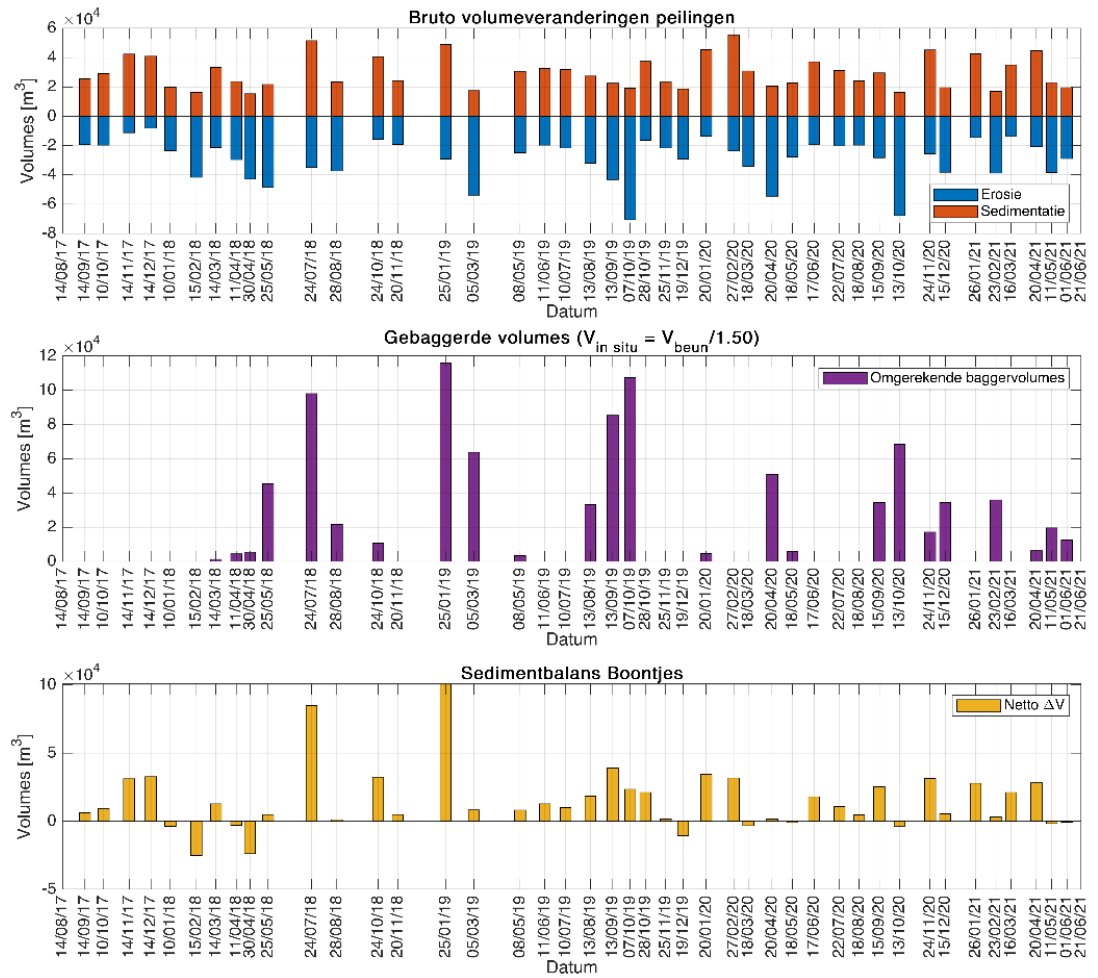


Figuur C.2 Verschil peilingen 27/09/2018-28/08/2018 en 24/10/2018-27/09/2018 tonen afwijking in peiling 27/09/2018

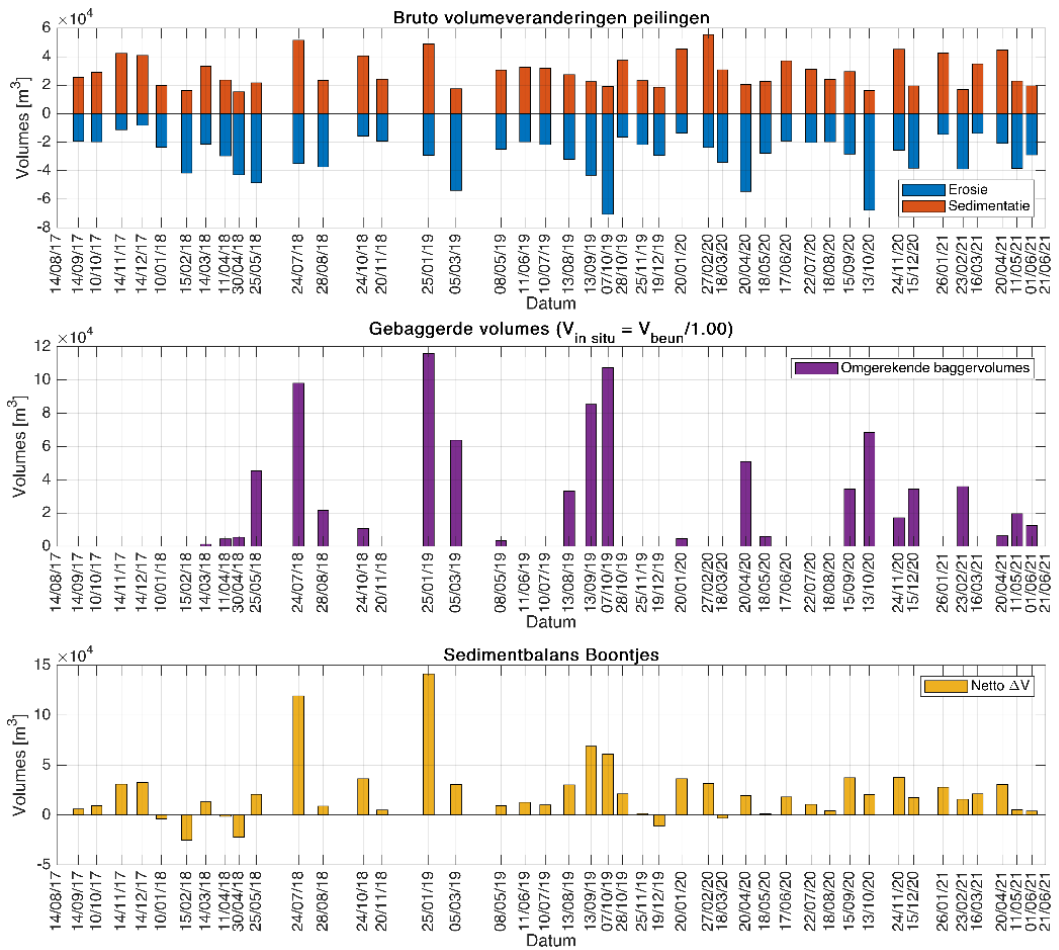


Figuur C.3 Vershil peilingen 04/04/2019-05/03/2019 en 08/05/2019-04/04/2019 tonen afwijking in peiling 04/04/2019

C.2 Resultaten aangepaste factor beunvolumes



Figur C.4 Alternatief volumebalans met omrekenfactor $V_{in\ situ} = V_{beun} / 1,50$



Figuur C.5 Alternatief volumebalans met omrekenfactor $V_{in\ situ} = V_{beun} / 1,00$

D Aanvullende analyse mogelijk sturende processen

Deze bijlage bevat aanvullende analyses m.b.t. mogelijk sturende processen. Paragraaf D.1 bevat een aanvullende analyse van extreme windcondities. In paragraaf D.2 wordt de afvoer van spuisluis Kornwerderzand nader bestudeerd.

D.1 Extreme windcondities

De lokale windcondities zijn gebruikt als inschatting voor de golfwerking, aangezien er in dit deel van de Waddenzee geen golfmetingen zijn gedaan. De hypothese, zoals beschreven in sectie 1.4, is dat sedimentatie in de geul wordt gedomineerd door stormen. Tijdens een storm wordt sediment op de platen gemobiliseerd, waarna het materiaal naar de geul wordt getransporteerd. Hierdoor wordt kort na een stormconditie de meeste aanzanding en/of aanslibbing waargenomen. In de baggervolumes is dit naar verwachting met enige vertraging waar te nemen, omdat eerst een vergunning moet worden aangevraagd en er een schip beschikbaar moet zijn. De windsnelheid en windrichting (via strijklengte) bepalen in belangrijke mate de golfwerking. Deze windparameters zijn bekeken tijdens de vijf meest extreme stormcondities in de periode 2016-2020. Deze analyse gaf de volgende bevindingen per storm:

- Voor de ZW-storm op 20 november 2016 is er geen data beschikbaar voor de sedimentbalans, omdat er toen nog geen dieptepeilingen werden uitgevoerd. Wel is er een mogelijk effect in de baggervolumes terug te zien in december 2016 en januari 2017, toen zowel in de noordelijke als in de zuidelijke Boontjes is gebaggerd.
- De ZZW-storm op 13 september 2017 leidde tot lichte netto sedimentatie (Figuur D.1). Dit heeft geen grote baggervolumes veroorzaakt. In voorgaande maanden werd ook niet gebaggerd.
- Kort na de ZZO-storm op 3 januari 2018 is lichte netto erosie waargenomen in de vaargeul volgens de dieptepeilingen (Figuur D.2). Er is dan ook niet noemenswaardig gebaggerd in de maanden erna, terwijl er in voorgaande maanden ook niet is gebaggerd.
- De ZZO-storm op 8 januari 2019 leidde tot grote netto sedimentatie (Figuur D.3). Er volgden ook relatief snel grote baggervolumes, waarbij zowel in de noordelijke als in de zuidelijke Boontjes werd gebaggerd. In de voorgaande maand (december 2018) werd niet gebaggerd.
- De ZZW- en ZW-stormen op 9 en 16 februari 2020 hebben lichte netto sedimentatie veroorzaakt (Figuur D.4). In de eerstvolgende twee maanden werd er niet gebaggerd, maar in april 2020 werd er vervolgens bijna 50.000 m³ gebaggerd in zowel de noordelijke als de zuidelijke Boontjes.

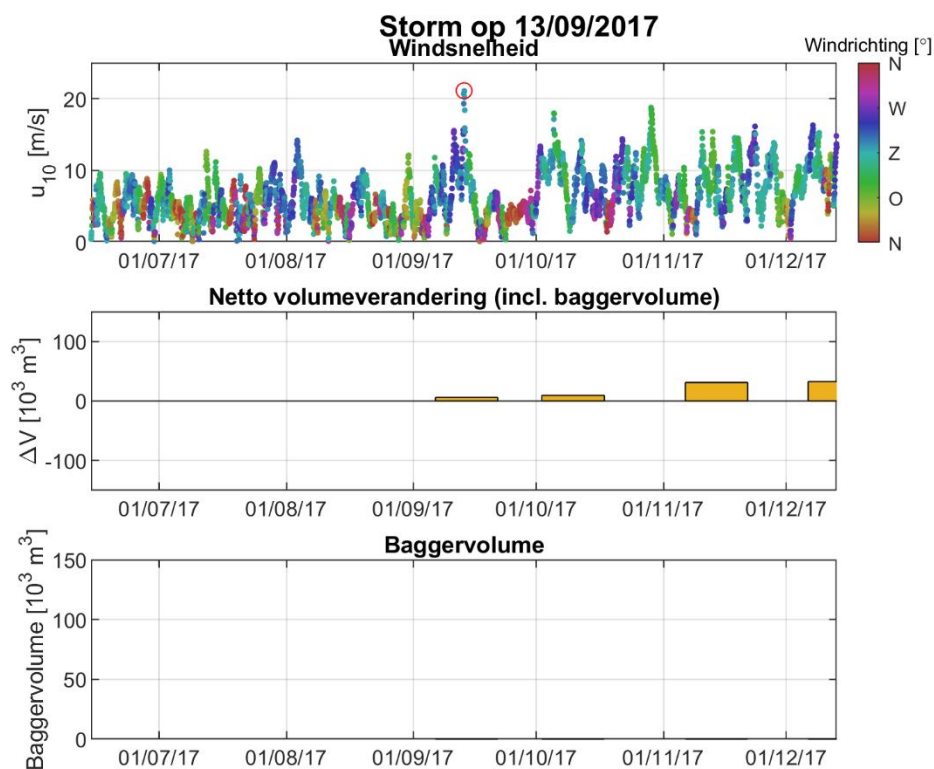
Daarnaast is er ook gekeken naar maanden met grote baggervolumes, waarin geen stormconditie is opgetreden, omdat dit de hypothese zou kunnen weerspreken. Hieruit blijkt:

- Het grote baggervolume uit januari 2019 volgde op een ZZO-storm op 8 januari 2019 (zie Figuur D.3 en bovenstaande toelichting).
- In september 2019 is er een relatief kalme periode van twee weken met windsnelheden veelal onder de 5 m/s (1-3 Bft.) en continu onder de 10 m/s (niet boven 5 Bft.) voorafgaand aan de baggerwerkzaamheden (Figuur D.5). Wel had er daarvoor een lichte zomerstorm plaatsgevonden in de eerste helft van augustus. In de voorgaande maand (met name eind augustus 2019) werd ook al veel gebaggerd.
- De wind in de twee weken voorafgaand aan de baggerwerkzaamheden in april 2020 was vrij gemiddeld van kracht (voor zover bekend tussen de 5 en 10 m/s), maar

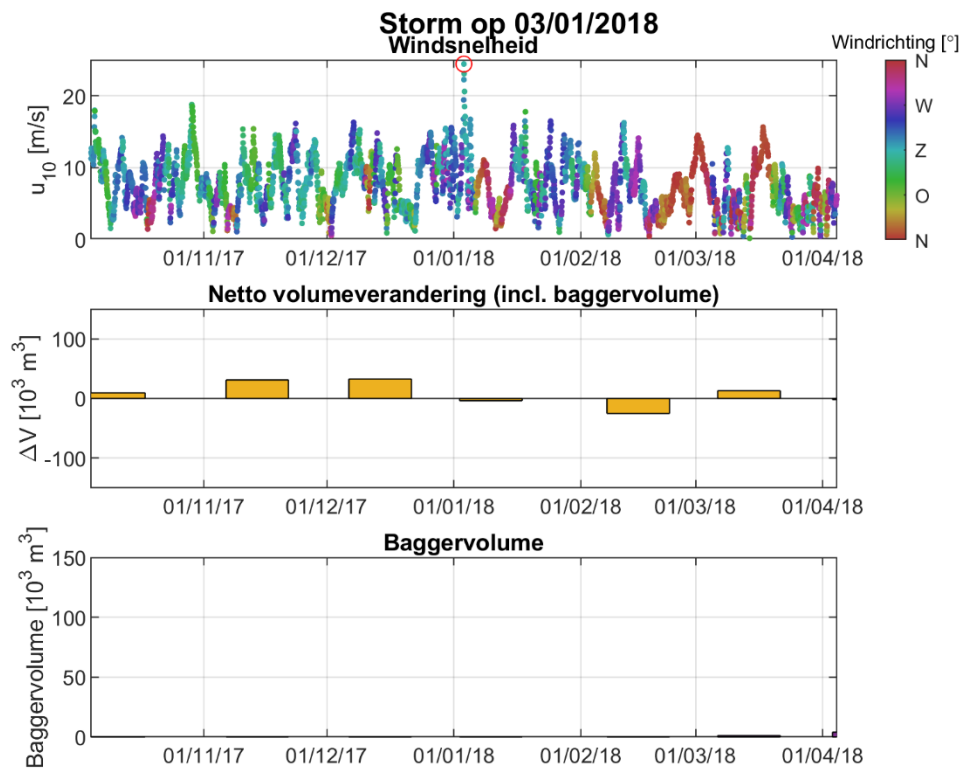
opvallend voor langere tijd afkomstig uit het noorden (Figuur D.6). Mogelijk hebben de stormen uit februari 2020 hier nog invloed gehad, want in maart 2020 werd niet gebaggerd.

- Voor september 2020 ontbreken de windgegevens (dus ook geen figuur toegevoegd). In de voorgaande maand (augustus 2020) werd niet gebaggerd.

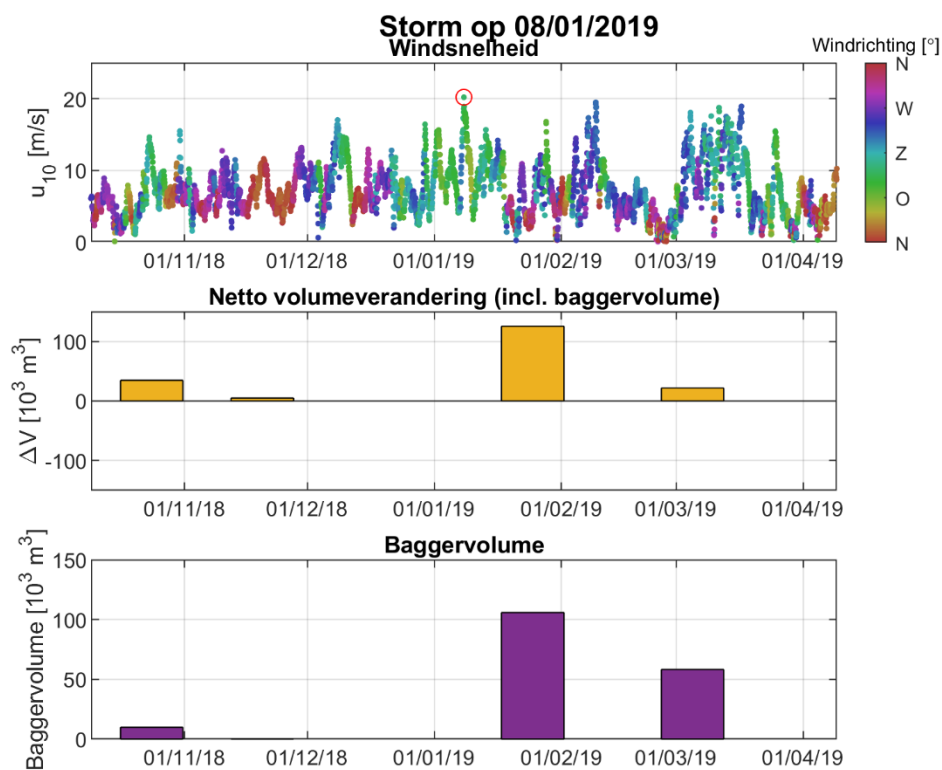
Uit deze analyse komen wisselende resultaten, waar nog geen eenduidige conclusie uit getrokken kan worden. Stormen uit het ZW en ZZW (november 2016, januari 2018 en februari 2020) hebben vermoedelijk een direct verband met grote baggervolumes in opvolgende maanden, terwijl stormen uit ZZO geen noemenswaardig effect lijken te hebben gehad. Dat is te verklaren vanuit de geografische ligging van de vaargeul nabij de vastelandskust, waardoor stormen uit het oosten, zuidoosten en zuiden relatief weinig effect hebben op dit gebied.



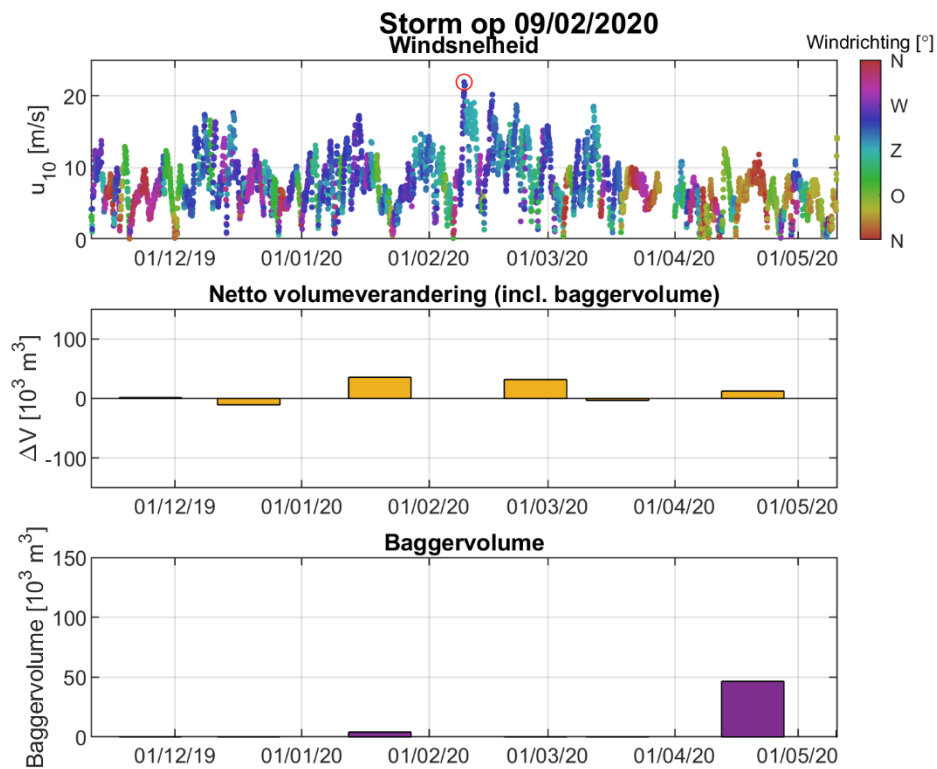
Figuur D.1 Windcondities, sedimentbalans en baggervolumes rond september 2017. Er werd in deze periode niet gebaggerd.



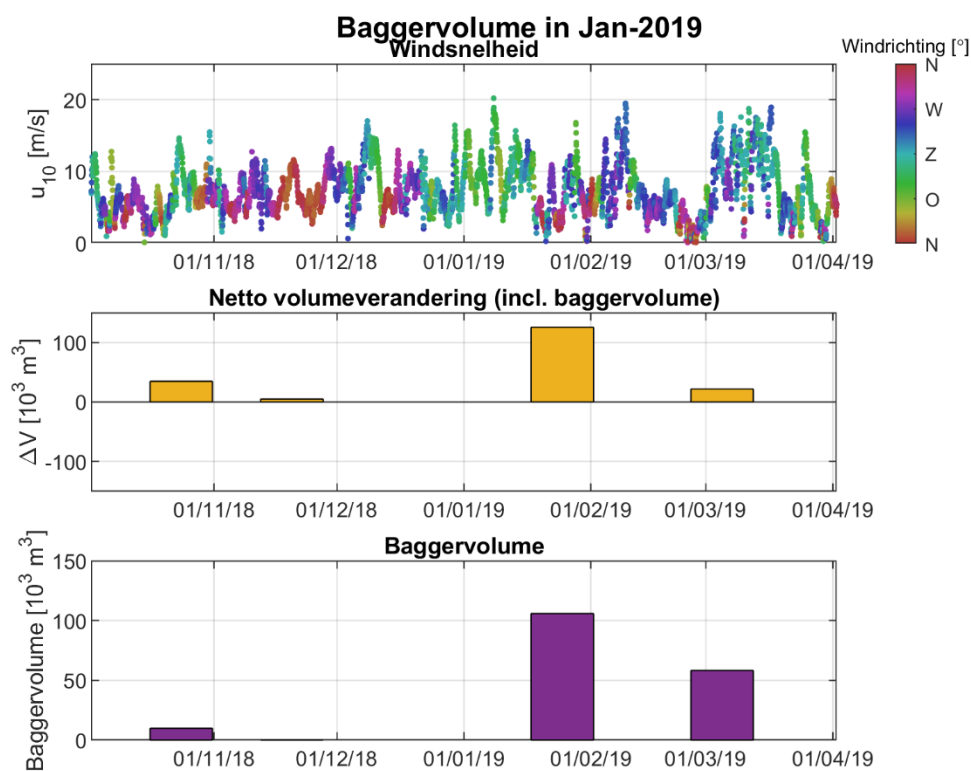
Figuur D.2 Windcondities, sedimentbalans en baggervolumes rond januari 2018. Er werd in deze periode niet gebaggerd.



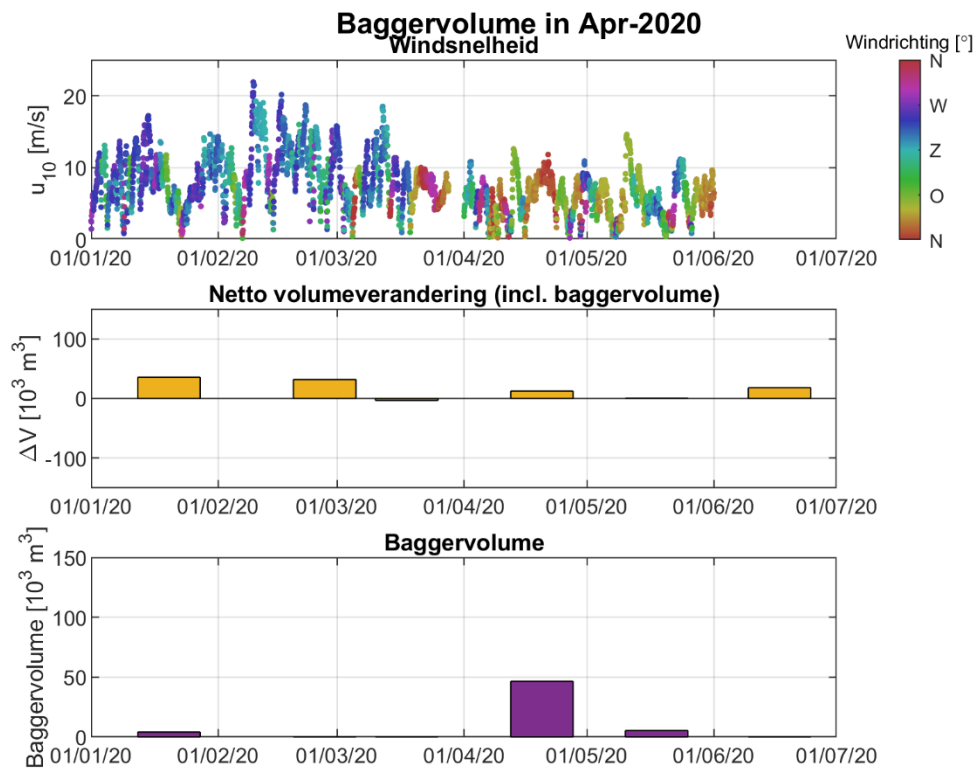
Figuur D.3 Windcondities, sedimentbalans en baggervolumes rond januari 2019.



Figuur D.4 Windcondities, sedimentbalans en baggervolumes rond februari 2020.



Figuur D.5 Windcondities, sedimentbalans en baggervolumes rond september 2019.



Figuur D.6 Windcondities, sedimentbalans en baggervolumes rond april 2020.

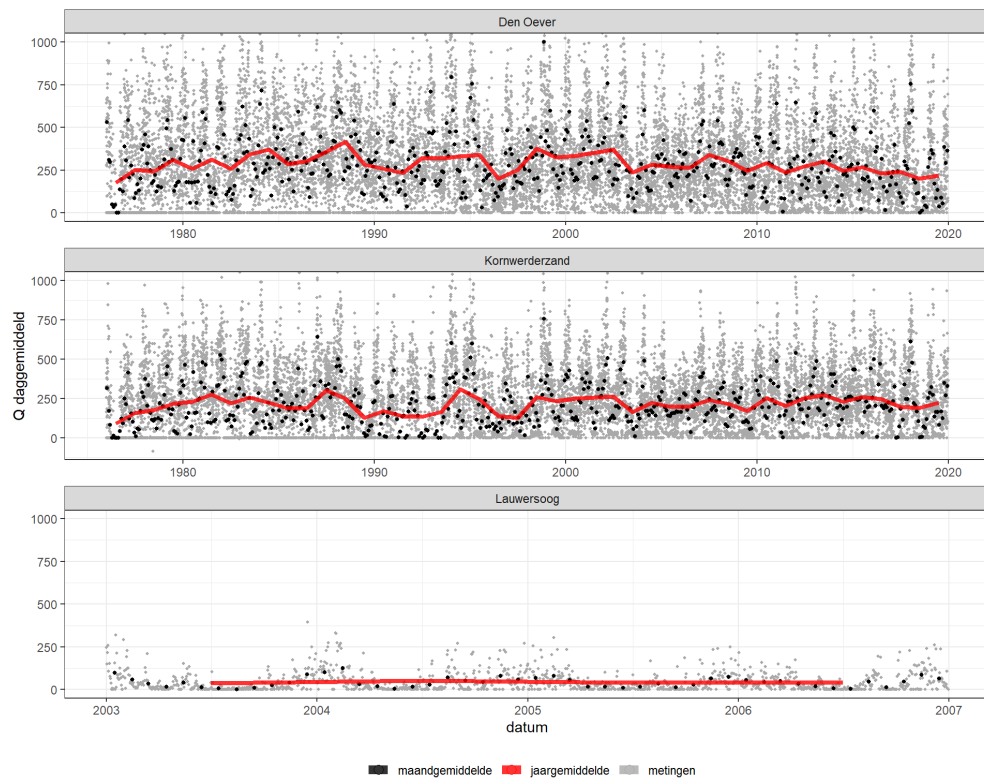
D.2 Afvoer spuisluis Kornwerderzand

Het spuidebiet bij Kornwerderzand kan een grote invloed hebben op de afvoer door de vaargeul Boontjes. Ter referentie: uitgaande van een doorstroomoppervlakte van ongeveer 500 m² bij laagwater (als er gespuid wordt) en een debiet richting de Boontjes van zo'n 500 m³/s, dan gaat het om een extra stroomsnelheid van orde grootte 1 m/s. Ruwweg is daarmee de inschatting dat het spuidebiet een significante bijdrage kan leveren. Het effect op de stroomsnelheid kan echter niet simpelweg lineair opgeteld worden, vanwege herverdeling van stroming tussen de geulen. Daarom zal dit effect middels een modelstudie nader moeten worden onderzocht.

Figuur D.9 toont de dag-, maand- en jaargemiddelde afvoer bij de sluizen van Den Oever en Kornwerderzand sinds de jaren 1970 en bij Lauwersoog sinds 2003. De gemiddelde zomer- en winterafvoer is voor deze drie locaties weergegeven in Figuur D.10. In het algemeen is de zomerafvoer twee tot drie keer zo laag is als de winterafvoer. De droge zomers van 2018, 2019 en 2020 zijn duidelijk terug te zien in de figuur. Figuur D.11 toont de maandgemiddelde afvoer bij Kornwerderzand met ter referentie het langjarig gemiddelde. Daaruit komt nog duidelijker naar voren dat de spuidebieten in de zomers van 2018 en 2019 erg laag waren. Mogelijk hebben deze lagere spuitdebieten in de zomerperiode van de jaren 2018 en 2019 gezorgd voor een afname van de stroomsnelheden in de vaargeul Boontjes. Figuur D.9 toont de maandgemiddelde spuidebieten bij Kornwerderzand ingezoomd op de periode 2017-2020 en Figuur D.10 een vergelijking van de gemiddelde maandafvoer per jaar om te duiden of de afvoer in een bepaalde maand relatief hoog of laag was.

De daggemiddelde afvoer van de spuisluis bij Kornwerderzand, sedimentbalans en gebaggerde volumes voor de periode 2017-2020 zijn gezamenlijk weergegeven in Figuur D.11. Sommige momenten met grote netto sedimentatie en grote baggervolumes vallen inderdaad samen met een laag spuidebiet (juli-augustus 2018 en april 2020, zie Figuur D.14).

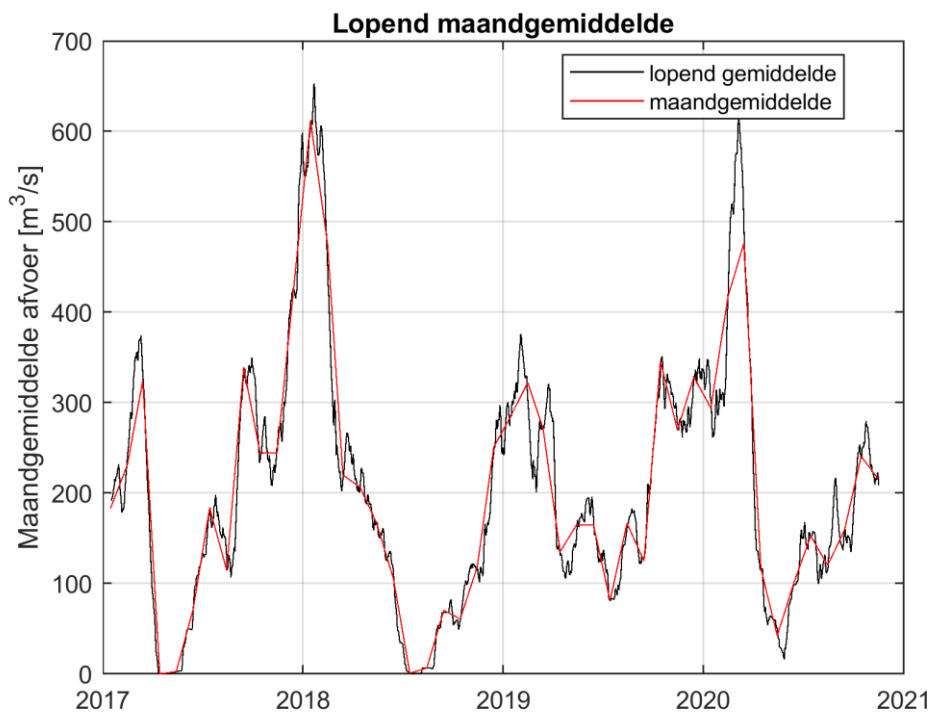
Op andere momenten was er geen uitzonderlijk spuidebiet, in vergelijking met andere jaren (zoals weergegeven in Figuur D.10), namelijk een vrij gemiddeld winterdebiet in januari 2019 (zie Figuur D.12) en een vrij gemiddeld herfstdebiet in september 2020 (zie Figuur D.15).



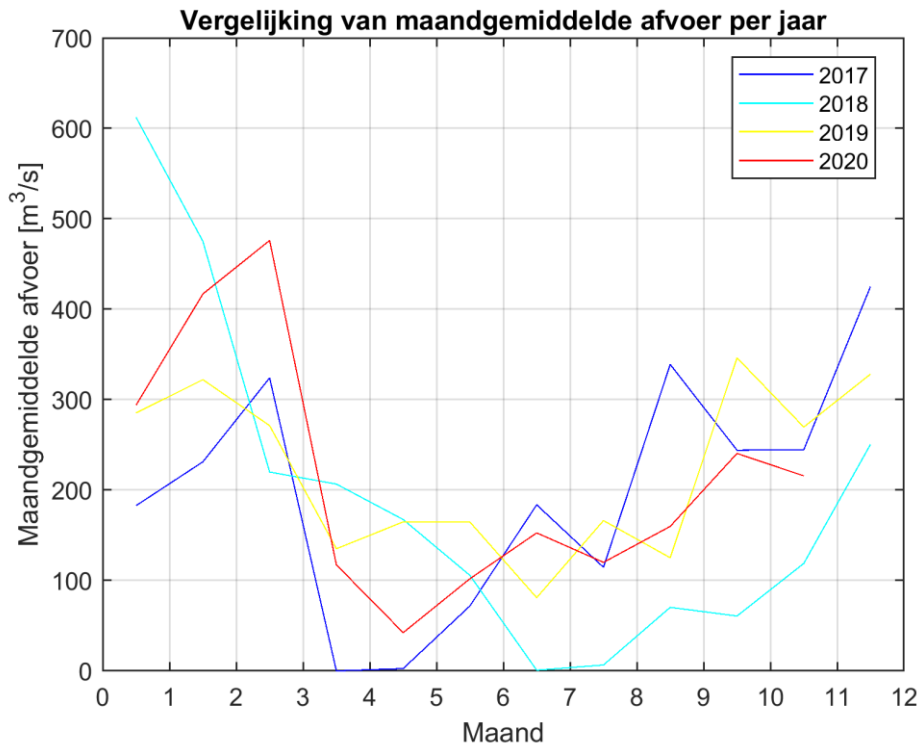
Figuur D.7 De maandgemiddelde en jaargemiddelde afvoer bij de sluisen van Den Oever, Kornwerderzand en Lauwersoog sinds de jaren 1970 (afkomstig uit Digitale Systeemrapportage Wadden (concept Deltares, 2021))



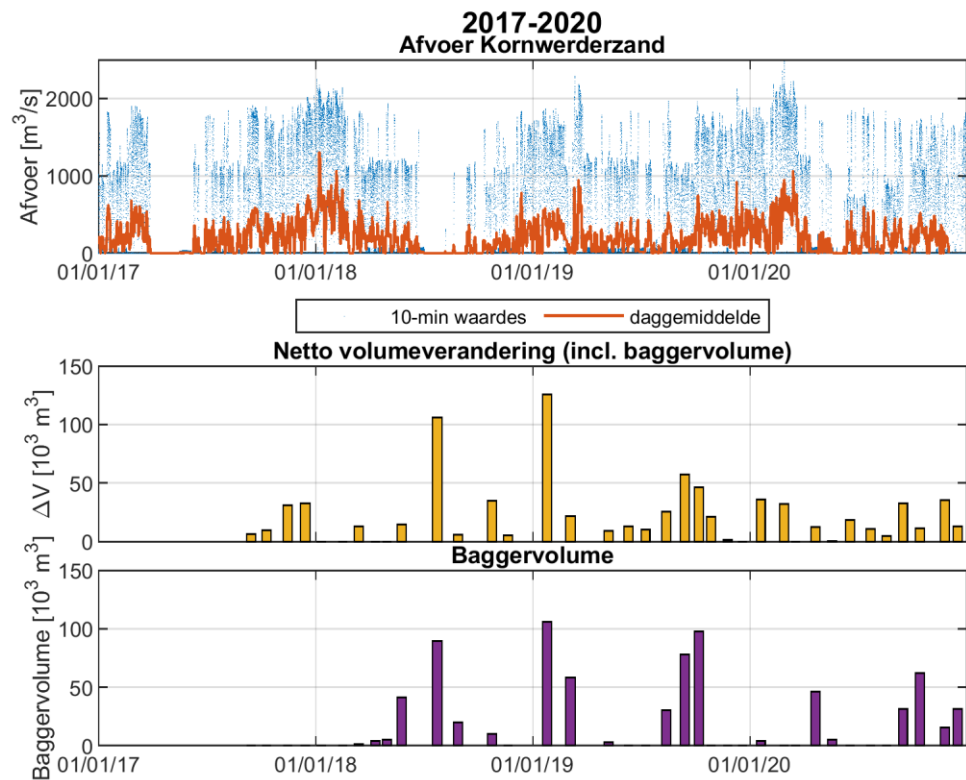
Figuur D.8 De gemiddelde afvoer voor de zomerperiode (april t/m september) en winterperiode (oktober t/m maart) voor Den Oever, Kornwerderzand en Lauwersoog (afkomstig uit Digitale Systeemrapportage Wadden (concept Deltares, 2021))



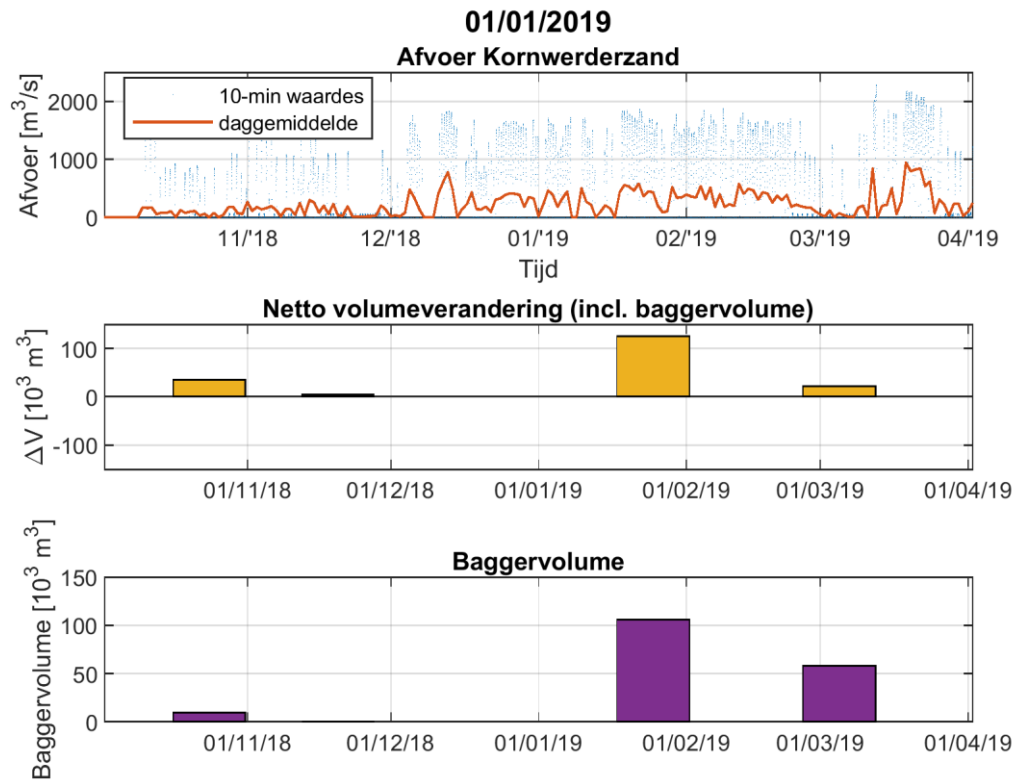
Figuur D.9 Maandgemiddelde afvoer bij spuisluis Kornwerderzand voor de periode 2017-2020, inclusief lopend gemiddelde (dagelijks bepaald voor de omringende 30 dagen).



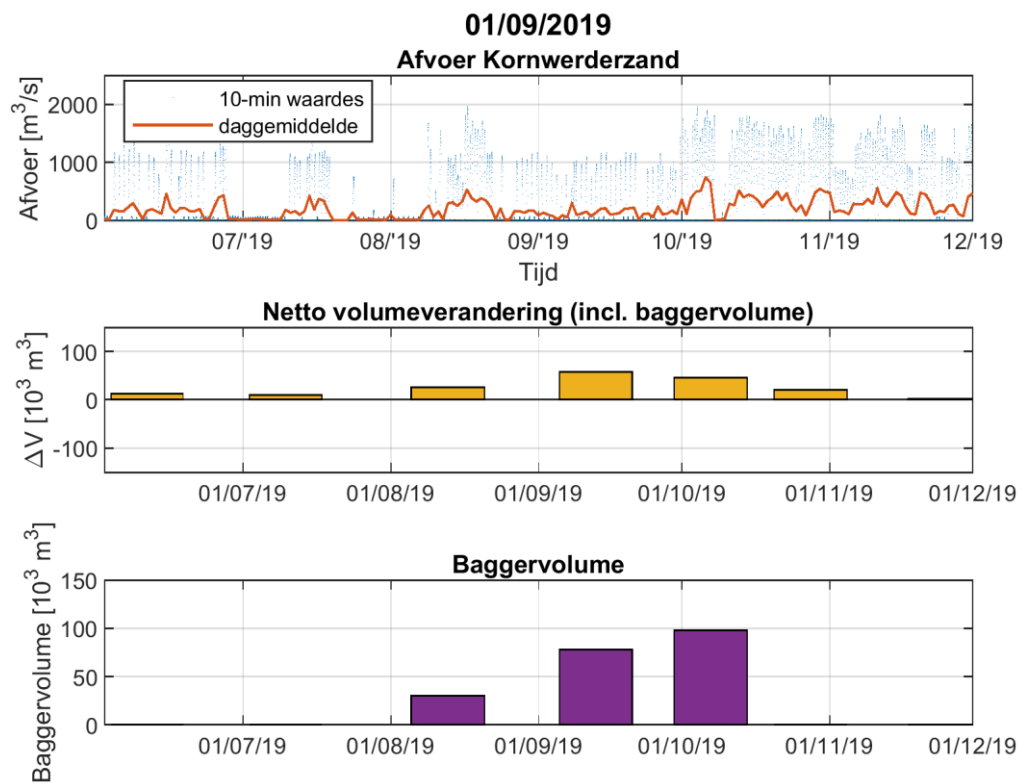
Figuur D.10 Maandgemiddelde afvoer bij spuisluis Kornwerderzand voor de periode 2017-2020 weergegeven per maand van het jaar.



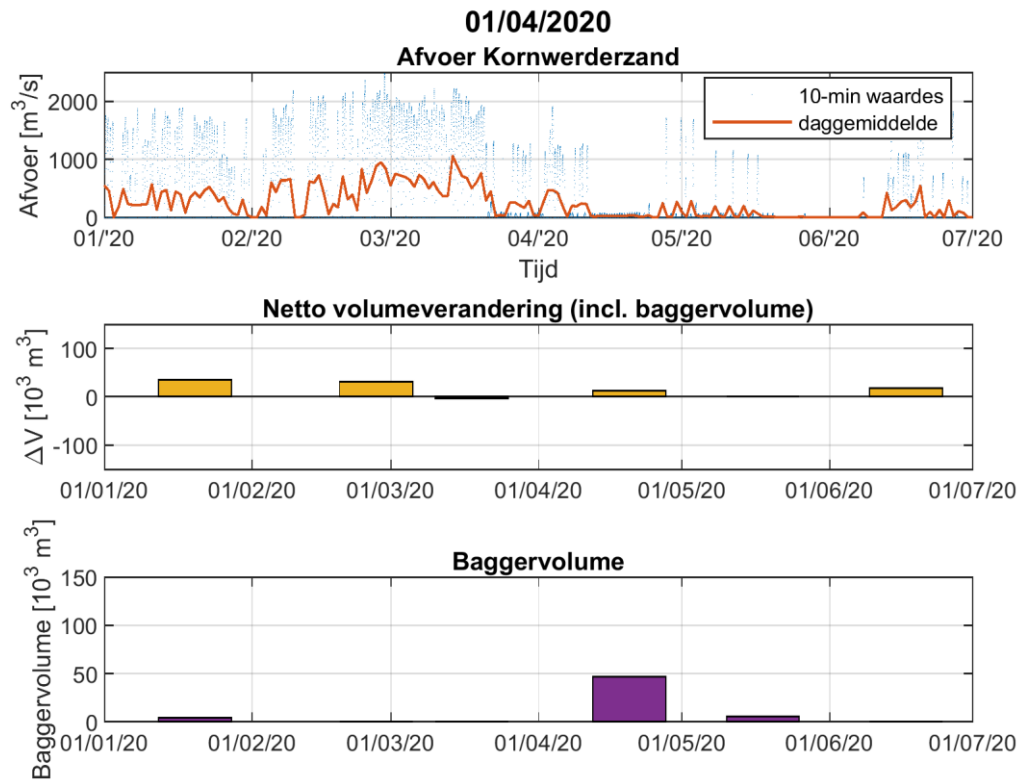
Figuur D.11 Afvoer bij spuisluis Kornwerderzand, sedimentbalans en baggervolume voor de periode 2017-2020.



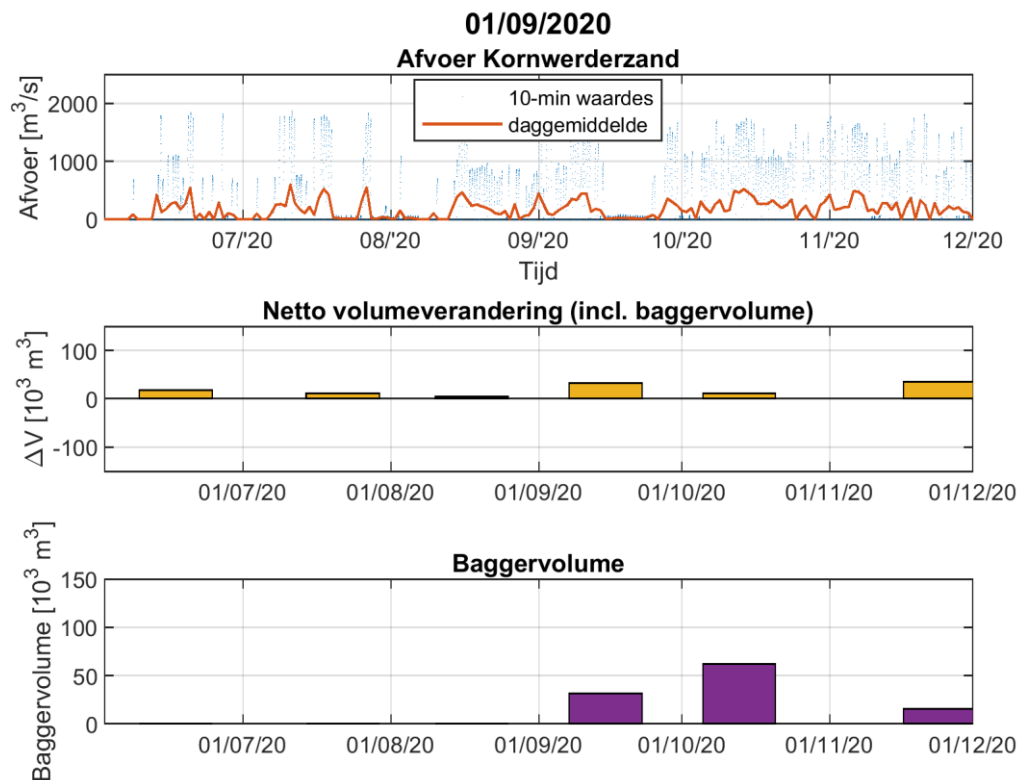
Figuur D.12 Afvoer bij spuisluis Kornwerderzand, sedimentbalans en baggervolume rond januari 2019.



Figuur D.13 Afvoer bij spuisluis Kornwerderzand, sedimentbalans en baggervolume rond september 2019.



Figuur D.14 Afvoer bij spuisluis Kornwerderzand, sedimentbalans en baggervolume rond april 2020.



Figuur D.15 Afvoer bij spuisluis Kornwerderzand, sedimentbalans en baggervolume rond september 2020.

Deltares is een onafhankelijk kennisinstituut voor toegepast onderzoek op het gebied van water en ondergrond. Wereldwijd werken we aan slimme oplossingen voor mens, milieu en maatschappij.

Deltares

www.deltares.nl