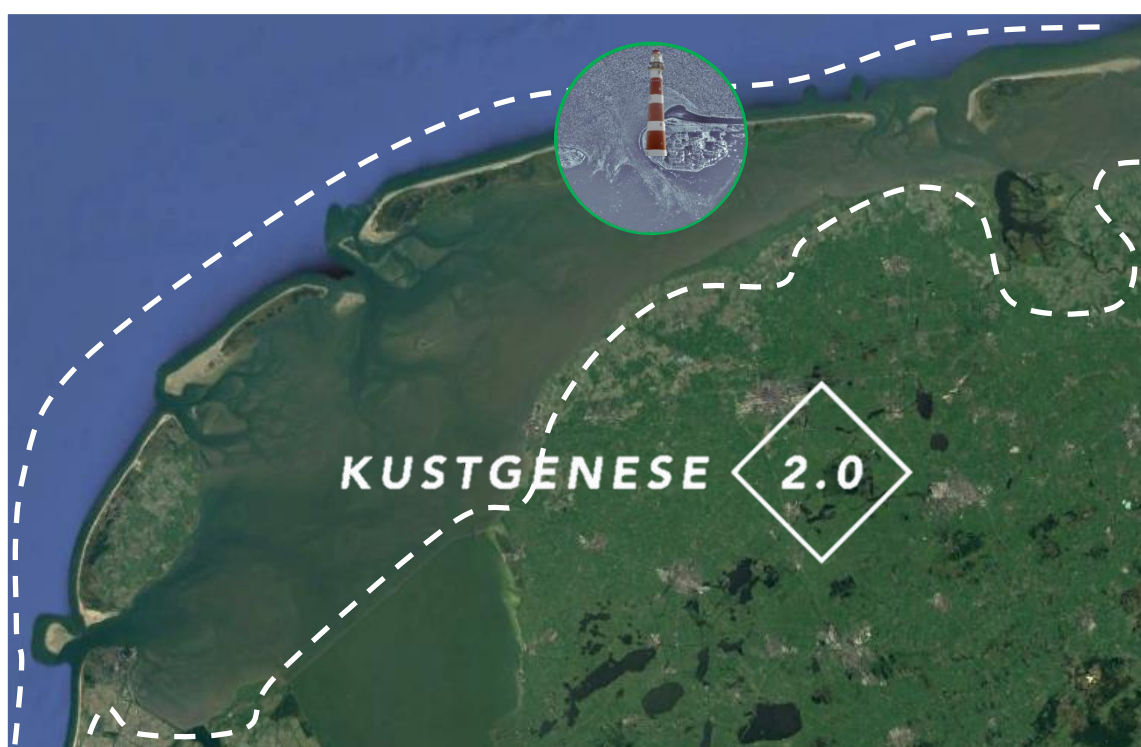


Ontwikkeling en toepassing X-Band radar voor morfologische analyse van het Amelandse Zeegat

Eindrapportage ten behoeve van Kustgenese 2.0



Trefwoorden

X-Band Radar, XMFit, Pilotsuppletie, Ameland, Buitendelta




Samenvatting

Voor het onderzoeksproject Kustgenese 2.0 is een X-Band radar gebruikt voor het bepalen van de bodemligging van de Amelander buitendelta. In dit rapport wordt een overzicht en samenvatting gegeven van de methode van de X-Band radar en de behaalde resultaten tot nu toe.

De X-Band radar is een operationeel nautisch systeem waarmee ook de bodemligging bepaald kan worden. De bodemligging wordt geschat uit zwart-wit filmpjes van golven (intensiteit van de backscatter) met behulp van de analysesoftware XMFit. De data wordt meerdere keren per dag ingewonnen, waardoor morfologische bewegingen hoogfrequent in de tijd kunnen worden gevolgd. Op deze manier kan het gedrag van de buitendelta als geheel in kaart worden gebracht, maar ook de volumeveranderingen van de in 2018-2019 uitgevoerde pilotsuppletie van 5 miljoen m³ zand kunnen gevolgd worden met deze technologie. Deze experimentele suppletie is aan de buitenrand van een eb-schild - de Kofmansplaat - geplaatst en daarmee uniek in zijn ligging.

De diepteschattingen die zijn ingewonnen tussen 2017-2019 komen goed overeen met de reguliere peilingen van de bodemligging en laten zien dat de buitendelta verandert. Zowel de vaklodingen als ook de radarmetingen suggereren dat de buitendelta met de klok mee draait. Van invloed is hier vooral de uitbouw van de westelijke eb-geul. Deze geul wordt langer, dieper en breder en verdringt daardoor de Kofmansplaat naar het Noorden. De geul lijkt geleidelijk de taak over te nemen van het Akkepollegat.

De suppletie ligt op 7 km afstand van de radar. Ondanks de afstand is het mogelijk om volumeveranderingen van de suppletie te volgen met een foutmarge van 7%. De resultaten laten zien dat de radarmetingen een waardevolle aanvulling kunnen zijn op vaklodingen. Het X-Band radar werk van Kustgenese 2.0 heeft geleid tot een wetenschappelijke publicatie (Gawehn et al., 2020).

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.0	Jan. 2020	Matthijs Gawehn		Arno Nolte		Toon Segeren	
2.0	Feb. 2020	Matthijs Gawehn		Arno Nolte		Toon Segeren	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	3
1.1 Doelstelling van deze rapportage	3
1.2 Introductie in de werking van de X-Band radar	3
2 Systeemopzet	5
3 XMFit	6
3.1 Werking	6
3.2 Codeontwikkelingen	8
4 Samenwerking en uitdragen van resultaten	9
4.1 Samenwerking	9
4.2 Aandacht voor het project	10
5 Data	11
5.1 Datainwinning en -bruikbaarheid	11
6 Ontwikkelingen van de pilotsuppletie tot september 2019	12
6.1 Vergelijking met multibeammetingen	12
6.2 Effect van het Kalman filter	13
7 Vergelijking XBand-radar resultaten met vaklodingen en verdere ontwikkelingen buitendelta	15
7.1 Effect van Kalman filter op dieptebias van het hele radargebied	15
7.2 Vergelijking van XBand-radar met vaklodingen	16
7.3 Ontwikkelingen in de buitendelta tussen mei 2018 en juli 2019	18
8 Eerste bevindingen op basis van schattingen voor oppervlaktestroming	21
9 Conclusies	22
Referenties	23

1 Inleiding

1.1 Doelstelling van deze rapportage

Op de vuurtoren van Ameland draait een navigatieradar. De metingen van deze X-Band radar zijn naast navigatie ook bruikbaar om morfologische en hydrodynamische data te genereren en vervolgens te analyseren. TU Delft, Rijkswaterstaat en Deltares doen onderzoek naar de mogelijkheden van deze methode. In het kader van het Kustgenese 2.0 onderzoek naar de lange termijn kustontwikkeling en van het SEAWAD onderzoeksprogramma wordt het Amelandader Zeegat in detail bestudeerd.

Deze rapportage geeft een beschrijving van de methode waarmee de radarreflecties worden omgezet naar bodemligging en oppervlaktestroming (XMFit) en van de behaalde resultaten in het Ameland Zeegat tot nu toe. Detailinformatie is te vinden in andere documenten zoals Gawehn *et al.* (2020).

1.2 Introductie in de werking van de X-Band radar

Binnen het kader van Kustgenese 2.0 is medio 2017 een operationeel systeem opgezet waarbij radarbeelden (XBand-radar) van het Ameland Zeegat lokaal worden verwerkt om een schatting te maken van de bodemligging in het gebied. De zogenaamde diepteinversie, waarbij een opeenvolgend blok van radarbeelden (een zogenaamde “stack”) wordt vertaald naar een waterdiepte, wordt gedaan aan de hand van een algoritme genaamd ‘XMFit’. Deze code is geschreven in Matlab® en ontwikkeld bij Deltares.

Het doel is om met behulp van het geautomatiseerde systeem de buitendeltasuppletie op de zeewaartse zijde van de Kofmansplaat te kunnen volgen. Deze suppletie is aangelegd tussen maart 2018 en februari 2019. Het aantrekkelijke van de systeemopzet is dat er gebruik kan worden gemaakt van de reeds aanwezige navigatieradar op de vuurtoren van Ameland. Door een relatief hoogfrequente uitvoer van ca. één schatting per uur wordt een vrij hoge tijdsresolutie bereikt. Voor de periode oktober 2017-september 2019 zijn er zo ruim 15.000 schattingen gemaakt voor de bodemligging van de Ameland buitendelta. Deze schattingen hebben in november 2017 voor het eerst een indruk kunnen geven van het effect van een zware storm op de buitendelta.

Uit de XBand-radar analyse blijkt dat volumeveranderingen van de suppletie vrij nauwkeurig kunnen worden gevolgd met een marge van maar 7% gedurende het jaar december 2017 – december 2018 (Gawehn *et al.*, 2020). De analyse leert dat het suppletiegebied sinds eind november 2018 gemiddeld ca. 50.000 m³/maand verliest aan het omliggende gebied. Dit is consistent met lokale multibeammetingen. Het vermoeden is dat het grootste deel van dit zand naar het eb-schild is verplaatst, gezien hier sterke sedimentatiepatronen zichtbaar zijn.

Begin 2019 is een interne foutenschatting toegevoegd aan de XMFit resultaten. De bedoeling was om nieuwere resultaten op basis van kwaliteit te kunnen wegen in plaats van deze over een aantal schattingen te middelen (zie Gawehn *et al.*, 2020). Sinds de voortzetting van het onderzoek is de Kalman filter verder ontwikkeld en blijkt het ook mogelijk te zijn om data voor 2019 op kwaliteit te wegen. Dit heeft tot gevolg dat de resultaten consistent zijn en beter kunnen worden vergeleken met de vaklodingen. Een zodanige vergelijking van de radarschattingen is gedaan voor vaklodingen van mei 2018, oktober 2018 en juni 2019. Het blijkt dat, ook al kunnen de XBand-resultaten lokaal afwijken, de schattingen consistent zijn,

waardoor het een geschikt instrument is om buitendeltaveranderingen in hoge tijdsresolutie te volgen. Morfologische veranderingen tussen mei 2018 en juli 2019 komen zeer goed overeen met de desbetreffende vaklodingen, waardoor een interpretatie van het systeemgedrag mogelijk is. Zo valt bijvoorbeeld op dat de westelijke eb-geul uitbreidt en de buitendelta roterend gedrag vertoont.

Notitie:

Het werk voor Kustgenese 2.0 heeft geleid tot een Journal artikel dat inmiddels is ingediend en beoordeeld. De recensenten hebben het artikel graag gelezen, maar er was ook vraag naar aanvullende analyses. Deze analyses waren waardevol en het artikel is naar behoren gereviseerd. Zo blijkt de combinatie van stromingsrichtingen en golfrichtingen de diepteschattingen te beïnvloeden, wat zal helpen om de XMFit schattingen in de toekomst verder te verbeteren. Het artikel is medio december 2019 opnieuw ingezonden. Voor details van de code en het Kustgenese 2.0 onderzoek verwijzen wij naar dit (Engelstalige) artikel, Gawehn et al. (2020), dat onder de titel “The application of a radar-based depth inversion method to monitor near-shore nourishments on an open sandy coast and an ebb-tidal delta” zal verschijnen in het journal “Coastal Engineering”. De verwijzing in dit rapport is: Gawehn et al. (2020).

2 Systeempopzet

Begin 2017 is er een lokale computer op Ameland geplaatst met als doel een directe verwerking van radarbeelden. De bestandsgrootte van de resultaten is klein genoeg om via een 4G verbinding te bereiken en over te halen. Via de zelfde 4G verbinding kunnen zo nodig ook aanpassingen worden gedaan aan de instellingen van het verwerkingsalgoritme XMFit.

Om het systeem geschikt te maken voor operationeel gebruik is het op verschillende vlakken versneld. Zo rekt de lokale computer parallel (mogelijk gemaakt door aanschaf van de parallel computing toolbox voor Matlab). Dit versnelt de gebruikelijke rekenduur met een factor 3. Daarnaast is door Nortek een efficiënte, binaire dataopslag ingevoerd om meer data te kunnen opslaan en om handmatige preprocessing te voorkomen (dit was eerder het geval voor *.drq bestanden).

Het systeem rekt voortdurend aan de ruwe beelden die binnenkomen en produceert op deze manier ongeveer één schatting per uur, afhankelijk van de golfsituatie. De ruwe bestanden zijn twee maanden bereikbaar om over te halen voordat zij worden overschreven met nieuwe beelden. Het voordeel van een langere beschikbaarheid is dat de bestanden na een verstoring in het systeem vaak nog toegankelijk zijn voor analyse.



3 XMFit

3.1 Werking

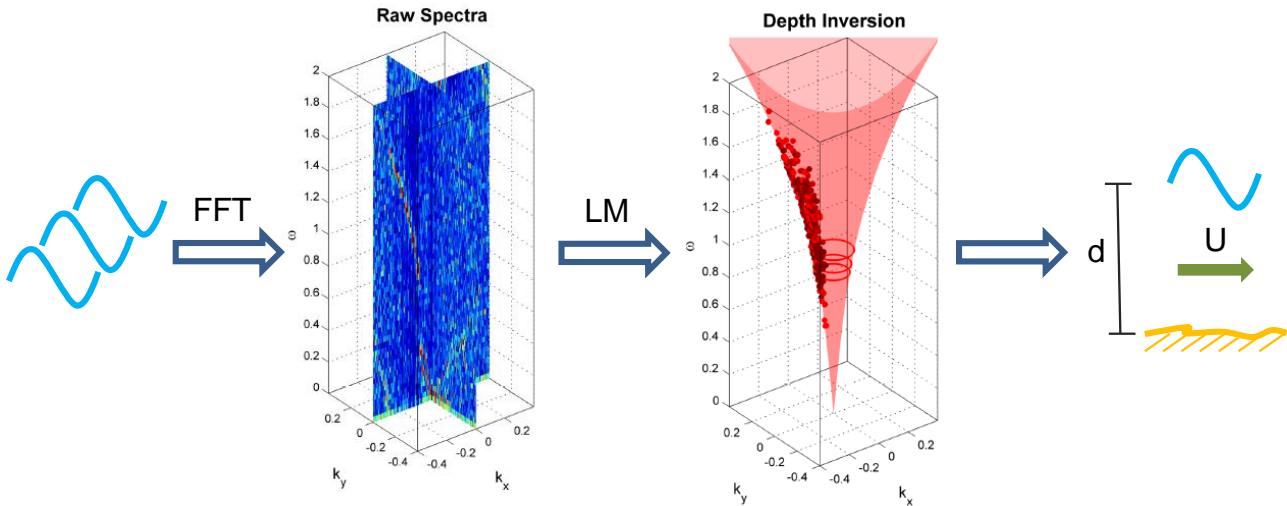
Het algoritme dat is gebruikt om de ruwe radarbeelden te vertalen naar bodemdieptes heet XMFit. Deze code is geschreven in Matlab en ontwikkeld bij Deltares (voor details zie Gawehn et al., 2020).

Het principe berust op de gedachte dat golven reageren op de bodem door korter te worden naarmate de waterdiepte afneemt of langer te worden naarmate de diepte toeneemt. Door de aard van het golfveld te analyseren kan dus een schatting worden gedaan voor de bodemligging eronder. Een geschikte manier om deze koppeling tussen golven en bodem te maken is door middel van een spectrale analyse van de golven. Hiervoor worden 256 opeenvolgende radarbeelden opgestapeld als blok (representatief voor een tijdsduur van 12 min). Dit blok wordt vervolgens opgeknipt in kleinere stukjes (rekenblokjes) die apart maar elk op een zelfde manier worden behandeld. Het werkschema voor een rekenblokje is als volgt (zie Figuur 3.1): Per rekenblokje wordt een drie dimensionale Fourier decompositie gedaan (3D-FFT). Middels een spectrum laat deze zien welke golflengtes en golfperioden aanwezig zijn in het beeld. De onderliggende aanname is dat de energieke delen van het spectrum de lineaire golftheorie volgen. Door de data zo dicht mogelijk bij de theorie te brengen kan zodoende een diepte worden geschat en een vector (richting en grootte) van de oppervlaktestroming. Dit volgt direct uit de lineaire dispersierelatie met doppler verschuiving, vergelijking 1:

$$\omega = \sqrt{g|\mathbf{k}| \tanh(|\mathbf{k}|d)} + \mathbf{U} \cdot \mathbf{k} \quad 1)$$

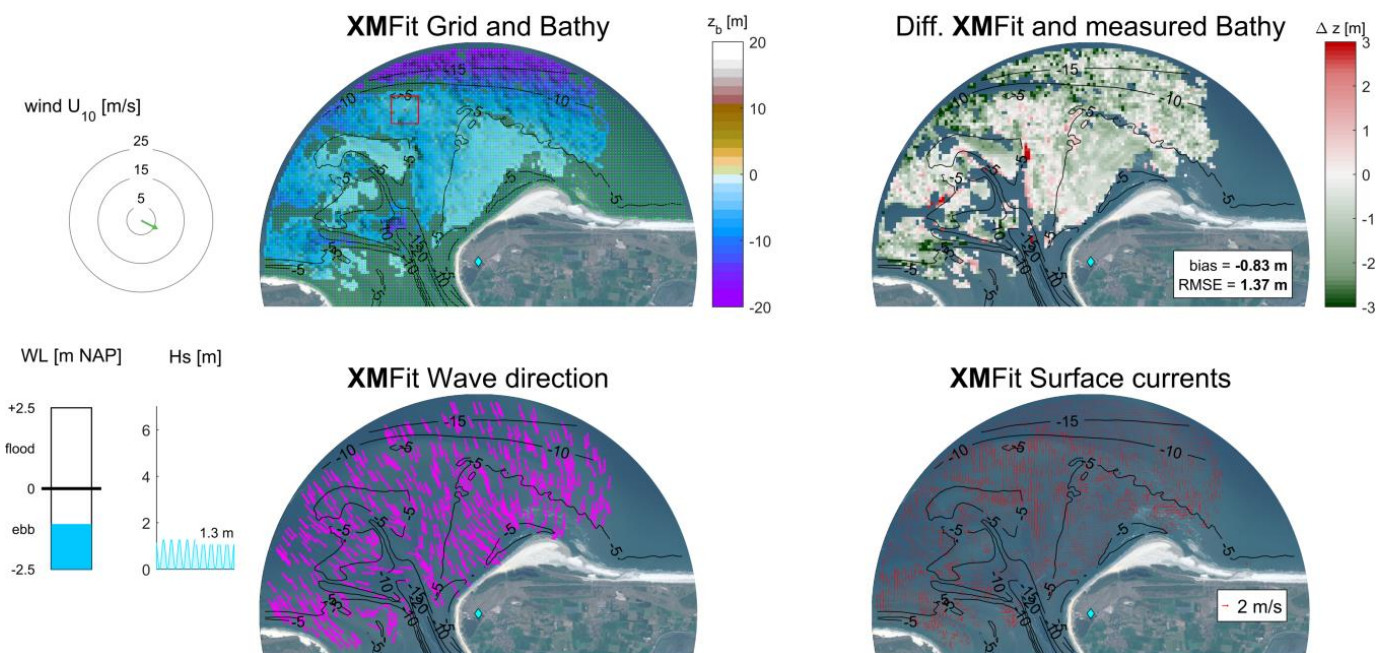
Hier geeft ω [rad/s] de frequentie weer, d [m] de diepte, \mathbf{k} [rad/m] de golfgetal vector (k_x, k_y), \mathbf{U} [m/s] de vector voor oppervlaktestroming (u, v) en g [m²/s] de zwaartekrachtsversnelling.

Een volledige schatting van de buitendelta bevat uiteindelijk hydrodynamische en morfologische informatie voor het tijdstip (periode van 12 min) waarop de reeks radarbeelden is opgenomen, zie Figuur 3.2. De focus van dit rapport ligt op de morfologische resultaten.



Figuur 3.1 Werkschema binnen XMFit. Het golfbeeld binnen een rekenblokje wordt via een 3D-FFT eerst omgezet naar een spectrum van golfgetallen in het platte vlak k_x, k_y [rad/m] en frequenties ω [rad/s] in de tijd (zie blauwe doorsnedes, links midden). De energieke delen van dit spectrum (bolletjes in rode conus, rechts midden) worden vervolgens zo goed mogelijk in overeenstemming gebracht met de lineaire golftheorie (rode conus). Dit gebeurt door middel van een niet-lineaire kleinste kwadraten methode, in dit geval een Levenberg-Marquardt (LM) minimalisatie. De oplossing hiervan bevat een schatting voor de waterdiepte d en een vector van de oppervlaktestroming U .

2018/03/22 17:53:18



Figuur 3.2 Voorbeeldresultaat van XMFit voor een tijdstip rond suppletie begin. Informatie wordt verkregen over: (1) diepte (links boven), (2) het verschil met de gemeten bodem - de ruimtelijk gecombineerde metingen van februari en augustus 2017 (rechts boven), (3) golfrichtingen (links onder) en (4) stromingsrichtingen (rechts onder). Langs de linker zijde is gemeten informatie over wind, getij en golfhoogte toegevoegd.

3.2 Codeontwikkelingen

Binnen het Kustgenese 2 project zijn er enkele veranderingen gedaan en verbeteringen uitgevoerd aan het XMFit algoritme. Deze doelen op kortere en nauwkeurigere schattingen. De belangrijkste veranderingen worden kort aangehaald:

- Er is een dieptevoorspeller ingebouwd die gebruik maakt van eerdere XMFit realisaties en zodoende uitschieters in de resultaten tegengaat. Voor deze voorspeller zijn twee extra parameters ingevoerd die de demping en het geloofwaardigheidsinterval bepalen. De betrouwbaarheid kan verder worden verhoogd door waterstanden door te geven aan de berekening.
- Het oorspronkelijk numerieke minimalisatieproces dat de spectrale data aan de lineaire golftheorie koppelt is vervangen voor een analytische formulering. Hierdoor is de code sneller en inzichtelijker geworden. Deze verandering heeft er ook voor gezorgd dat er geen betaalde 'statistics toolbox' meer benodigd wordt in Matlab.
- De code is versneld door een relatief dure filter voor energiesoortering te vervangen. Deze is nodig in het geval dat de radarantenne vrij langzaam draait. In dat geval ontstaan er veel zogenaamde aliassen in de spectrale data die geen fysieke betekenis hebben. Als vervanger voor de oude energiefilter is een nieuwe filter geïntroduceerd waarmee deze aliassen snel en efficiënt kunnen worden geïdentificeerd en verwijderd zonder de gehele analyse noemenswaardig te vertragen (voor details over de methodiek zie Gawehn et al., 2020). In praktijk blijkt het een zeer gunstige eigenschap van de XMFit interne 3D-Fourier analyse dat spectrale data boven de Nyquist frequentie kunnen worden gebruikt voor de diepteschatting.
- Voor radar data van de Zandmotor zijn tests gedraaid waarbij gebruik wordt gemaakt van een Kalman filter. De resultaten daarvan suggereren een significante verbetering van de schattingen en zijn opgenomen in Gawehn et al. (2020). XMFit schattingen van het Amelanders zeeget die geproduceerd zijn vanaf december 2018 bieden de mogelijkheid om een Kalman filter te gebruiken dat informatie gebruikt over de onzekerheid van een schatting. Maar ook data voor deze periode kunnen worden gefilterd met een Kalman filter, voor details hiervan zie Paragraaf 6.2.

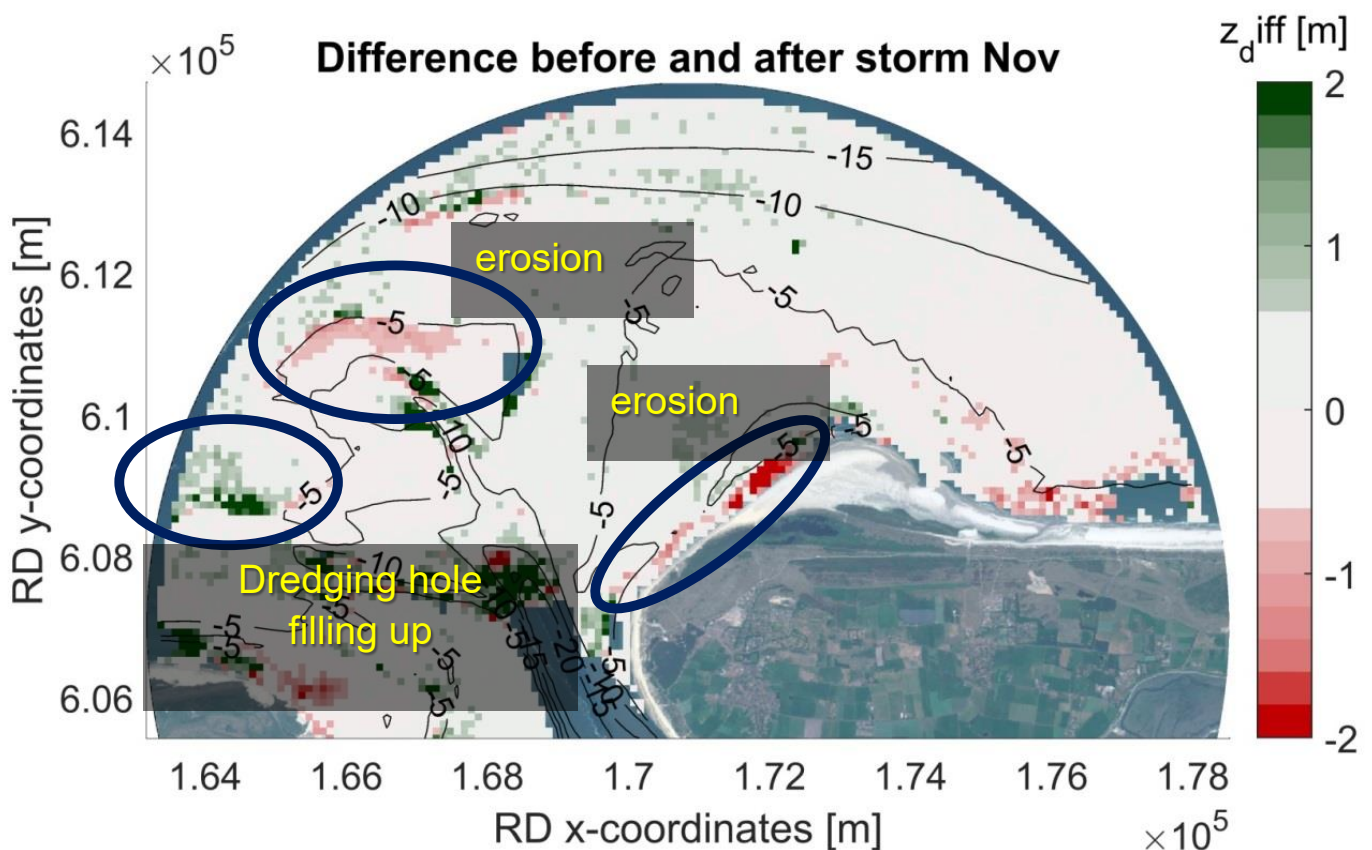
4 Samenwerking en uitdragen van resultaten

4.1 Samenwerking

De XMFit code is onder versiebeheer gebracht. Dit zorgt ervoor dat het algoritme makkelijk kan worden geactualiseerd. Daarnaast kunnen nu ook andere partijen toegang krijgen tot de code en er eventueel aan werken. Veranderingen worden dan automatisch bijgehouden en kan XMFit zo nodig worden hersteld naar eerdere versies.

Er is contact gelegd met betrokken van de Universiteit Utrecht, waarbij in 2018 een studente is begeleid bij het gebruik van XMFit op de Amelander delta (van IJzendoorn, 2018). In 2019 heeft ook een student van de TU-Delft met de radardata van Ameland gewerkt en zich daarbij specifiek op de validatie van oppervlactestromingen gericht (Grossmann et al., 2019).

De resultaten van het radarsysteem op Ameland worden ook ingezet voor de zogenaamde "Quick Reaction Force" (QRF). Dat is een samenwerkingsverband tussen Rijkswaterstaat en Deltares om korte termijn gevolgen van stormen te onderzoeken, zie ook Figuur 4.1.



Figuur 4.1 De gevolgen van een zware storm eind november 2017. Weergegeven worden sedimentatie (groen) erosie (rood) patronen bij de Amelander buitendelta. Deze resultaten zijn op verschillende conferenties getoond vanwege de inzichten die zij geven in de korte termijn gevolgen van een zware forcering op een buitendelta.

4.2 Aandacht voor het project

Het operationele gebruik van XMFit voor Kustgenese 2.0 is innovatief en is daarom op meerdere conferenties gepresenteerd, waaronder de Hydro17 conferentie in Rotterdam (nov. 2017), de Ocean Sciences conferentie in Portland, USA (feb. 2018), de NCK dagen in Haarlem (mrt. 2018) en voor de CIRN bijeenkomst in St. Petersburg, USA (jun. 2018). Tijdens deze bijeenkomsten werd vaak enthousiast gereageerd op het project. Zo is er nu ook contact gelegd met andere wetenschappers die bezig zijn bodems te schatten uit radarbeelden. Hier zijn ook vruchtbare discussies gehouden over de prestaties en gevoeligheden die spelen bij diepteinversie. Het werk van de student Florian Grossmann over XMFit schattingen voor oppervlaktestroming is door hem gepresenteerd op de Coastal Structures conferentie in Hannover, GE (sep. 2019). In dit verband is ook de conferentiepaper Grossmann et al. (2019) gepubliceerd. Tot slot heeft het werk voor Kustgenese 2.0 ook geleid tot een Journal artikel (Gawehn et al., 2020) dat naar verwachting begin 2020 wordt gepubliceerd in Coastal Engineering.

Als middel om suppleties te volgen is de huidige opzet bijzonder attractief door dat er gebruik wordt gemaakt van een al bestaand navigatiesysteem. In vergelijking tot in-situ metingen zijn de diepteschattingen uit radarbeelden onnauwkeuriger maar daarvoor veel frequenter (3-5 jaarlijkse metingen vs. dagelijkse schattingen met XMFit).

5 Data

5.1 Datainwinning en -bruikbaarheid

Het operationele systeem draait continu, maar er waren enkele gevallen waarbij het analyse proces is gestopt. Dit was om verschillende redenen: eind 2017 stopte het systeem door een zware storm. In 2018 liep de computer een keer vast omdat de Windowsbeveiliging het werkgeheugen liet vollopen. Begin 2019 stopte het systeem een keer door vermoeid materieel. In de nazomer 2019 viel het systeem onopgemerkt uit gedurende de vakantieperiode, waarschijnlijk door een overbelast geheugen. Eind 2019 is het systeem aangevallen door een virus, deze verstoring heeft tot verlies van data geleid en moet nog worden opgelost. Ondanks de onderbrekingen konden er grote hoeveelheden data worden geproduceerd en heeft voldoende data opgeleverd om morfologische veranderingen van de Amelanders buitendelta in kaart te brengen.

In totaal zijn er ruim 15.000 resultaten geproduceerd. Gedurende 2017-2018 was de kwaliteit van de schattingen wisselvallig. In de winterperiode oktober 2017 tot februari 2018 waaide het vaak zo hard dat er breed over het radarbeeld witte golf toppen ontstonden. De hete zomer van 2018 was juist erg rustig met weinig wind en een zeer kalme zee. Beide extremen hebben consequenties voor de kwaliteit van de dieptesresultaten, waardoor deze niet allemaal bruikbaar zijn. De bruikbaarheid van de resultaten wordt bepaald door de combinatie van externe factoren, waaronder de kwaliteit van de zeeclutter en oppervlaktestromingen. De zeeclutter laat de golfpatronen in het radarbeeld zien.

De kwaliteit van de zeeclutter wordt bepaald door de weerkaatsing van het radarsignaal van ribbeltjes/capillaire golfjes op de zeegolven. Ook al zijn deze ribbeltjes van nature vrijwel altijd aanwezig, wordt hun vorm en grootte bijvoorbeeld bepaald door de wind. Als er minder ribbeltjes zijn, is de zeeclutter slechter geschikt voor analyse. Een maat voor goede zeeclutter is de significante golfhoogte. Als $H_s > 0.9$ m kunnen er grootschalig diepteschattingen worden gedaan van de buitendelta. Als de golfhoogte te hoog wordt en het hard waait, breken golven veel op zee, het zogenaamde "white capping". Uit ervaring blijkt dit negatieve gevolgen te hebben voor de kwaliteit van de diepteschatting.

De kwaliteit van de diepteschatting correleert ook met de richting en grootte van de oppervlaktestroming. Over het algemeen wordt de diepte onderschat voor stroming in richting van de golven, en de diepte wordt overschat voor stroming tegen de golven in (zie Gawehn et al., 2020; Fig. 10).

6 Ontwikkelingen van de pilotsuppletie tot september 2019

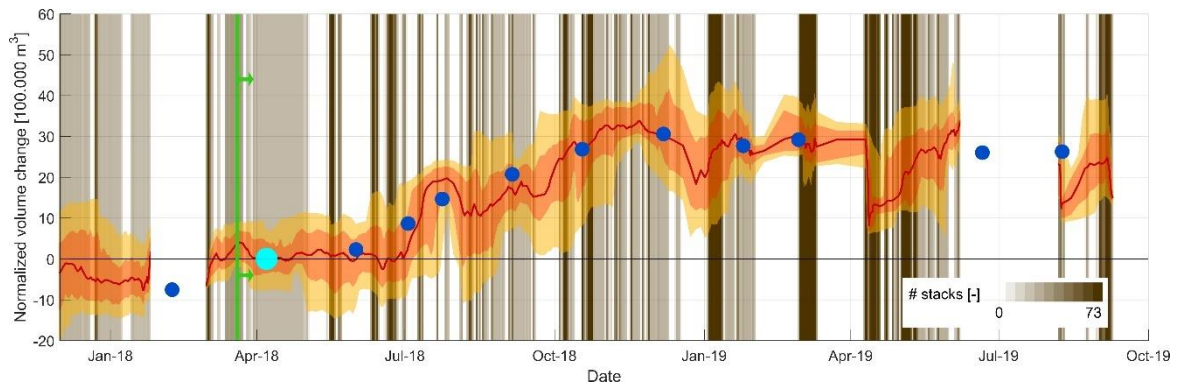
6.1 Vergelijking met multibeammetingen

In het verlengde van het eerdere onderzoek Gawehn et al. (2020), zijn de XMFit resultaten vergeleken met nieuwe multibeammetingen van het jaar 2019. De aanpak was aanvankelijk het zelfde, dwz. een tijdslijn van maandelijks gemiddelden werd berekend. Hierbij vielen voornamelijk twee dingen op:

- (1) het piekvolume van de suppletie werd volgens de XBand-analyse rond 22 november 2018 bereikt met een totaal volume van ca. 4,1 mln m³ (Fig. 6.1; verschil tussen de piek in de radardata en de 1^e multibeam meting net voor de suppletie). Tijdens de eerste 9 maanden van de aanleg van de suppletie (mrt – nov 2018) is er ~4.5 mln m³ gesuppleerd. Het verschil (4,5 versus 4,1 mln m³) komt deels uit beunverlies, maar duidt ook aan dat er al kleine verplaatsingen van sediment naar de Kofmansplaat kunnen hebben plaatsgevonden. Echter het valt vooral op dat het geschatte piekvolume van 4,1 mln m³, ca. 1 mln m³ minder is dan het totale suppletievolume van 5-5.5 mln m³ dat tegen einde van februari 2019 was gesuppleerd. Dit verschil is voornamelijk te verklaren door (1) door zetting van het zand, (2) het opvullen van de trog tussen het suppletiegebied en de Kofmansplaat en (3) grote verplaatsingen gedurende de wintermaanden van 2018-2019 o.a. door een grote storm begin januari 2019, (zie van Rhijn, 2019). Deze januaristorm is waarschijnlijk ook de reden voor de dip in de volume schattingen (Fig. 6.1; dip in januari), ook al lijkt deze dip uitvergroet.

Sinds eind november 2018 neemt het volume in het suppletiegebied lineair af met gemiddeld ca. 50.000 m³/maand, ongeacht de suppleties die na dit tijdstip nog hebben plaatsgevonden. Gedurende de wintermaanden december 2018 - februari 2019 is er dus meer sediment uit het gebied verplaatst dan erbij is gekomen met resterende suppleties. In de navolgende lente- en zomermaanden heeft de trend van 50.000 m³/maand netto verlies voortgezet, maar is er niet meer gesuppleerd. Dit laat zien dat stormen in het winterseizoen, zoals de storm begin Januari 2019, grotere volumes verplaatsen dan het rustigere zomerseizoen (zie ook van Rhijn, 2019).

- (2) De overeenkomsten tussen de multibeammetingen en de Xband-radarresultaten zijn zeer goed (Figuur 6.1; rode lijn van de Xband-data en blauwe punten van multibeam metingen) (zie ook Gawehn et al., 2020) voor een uitgebreide beschrijving van de methodiek). Desalniettemin waren er onwaarschijnlijke fluctuaties te zien in de radardata 2019 (Figuur 6.1; zaagtand tussen april en juni 2019). Daarnaast was er een gat in de XBand-radar data tussen juni 2019 en augustus 2019. Dit kwam gedeeltelijk door een periode waarbij het golfsignaal niet voldoende goed was voor analyse, maar ook doordat het systeem gedurende de vakantieperiode was vastgelopen. De oorzaak daarvan kon niet worden achterhaald, maar was waarschijnlijk gelinkt aan een overbelast geheugen. Zowel dit gat in de radardata als ook de fluctuaties gaven reden om een Kalman filter toe te passen.



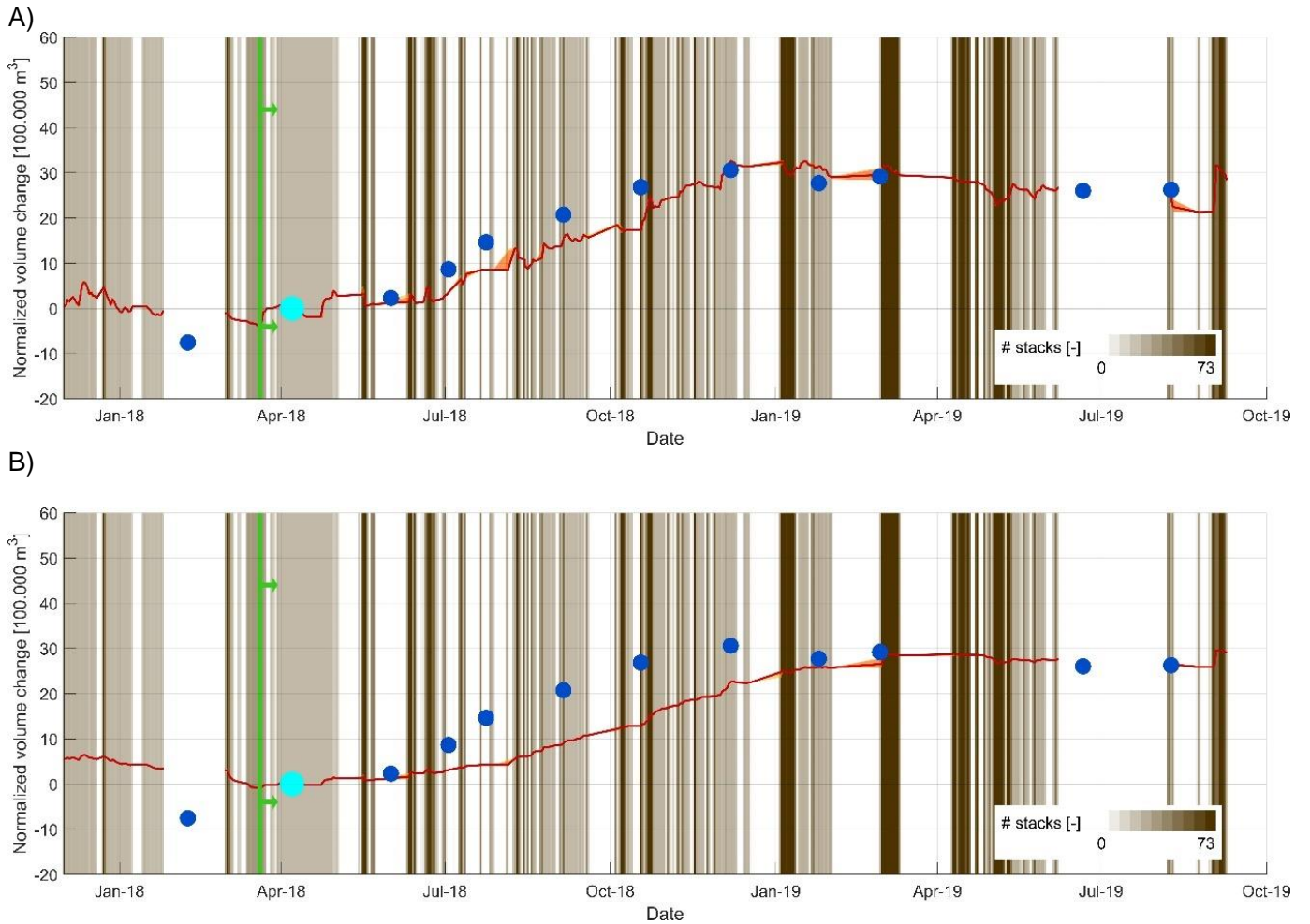
Figuur 6.1 Maandelijks gemiddelde volumes in het suppletiegebied volgens radar (rode lijn, met 50% (oranje) en 80% (geel) zekerheidsintervallen). Blauwe punten geven de volumes weer volgens de multibeam metingen. De groene lijn met peilen geeft aan wanneer de uitvoering van de suppletie is begonnen. Alle schattingen zijn genormaliseerd naar de 2e multibeam meting (zie ook Gawehn et al., 2020)). De dichtheid van de radar resultaten wordt weergegeven in grijsstinten volgens de legenda. Het verschil tussen de eerste multibeam meting (donker blauw punt, feb 2018) en het piek volume volgens radar (rode lijn, eind nov 2018) is ca. 4.1 mln m³.

6.2 Effect van het Kalman filter

Om consistent te filteren in tijd, dwz. ook XMFit data voor 2019, was het nodig om een alternatief Kalman filter te formuleren. Het kernpunt van het nieuwe filter was de implementatie van tijdsafhankelijke proces variantie, afgekort Q [m²/dag], (dwz. een volwaardigere formulering voor morfologische verandering), maar ook een herformulering van de “dieptefout” (vaak afgekort als R). Het laatste wordt nu simpelweg berekend als zijnde het verschil tussen twee opeenvolgende schattingen (Voor resultaten die vanaf 2019 geproduceerd zijn kan dit ook door middel van de onzekerheid in de fit tussen de data en de lineaire golftheorie). Voor een uitleg van een Kalman filter wordt verwezen naar Gawehn et al. (2020).

De kracht waarmee het Kalman filter nieuwe resultaten weegt, hangt af van de procesvariantie Q . Dit is geïllustreerd door middel van twee voorbeelden voor $Q = 0.01$ [m²/dag] (Figuur 6.2A) en $Q = 0.001$ [m²/dag] (Figuur 6.2B). Uit deze studie blijkt dat $Q \sim 0.01$ een goede waarde is voor het Kalman filter (Figuur 6.2A): op basis van de gewogen diepteschattingen zijn ook de volumeschattingen veel gladder geworden. Het filter zorgt er althans wel voor dat er een kleine vertraging in het signaal zit (Figuur 6.2A, rode lijn t.o.v. blauwe bolletjes), maar deze weegt ruimschoots op tegen een consistent signaal met verwaarloosbare fluctuaties (cf. Figuur 6.1 en Figuur 6.2A; gladheid van rode lijn en verwaarloosbaar dagelijks onzekerheidsinterval)

Voor $Q \gg 0.01$ is de Kalman filter te zwak. Voor $Q \ll 0.01$, bijv. $Q = 0.001$, wordt te weinig morfologische verandering toegelaten en is de Kalman filter te sterk (Figuur 6.2B; vertraging in rode lijn)



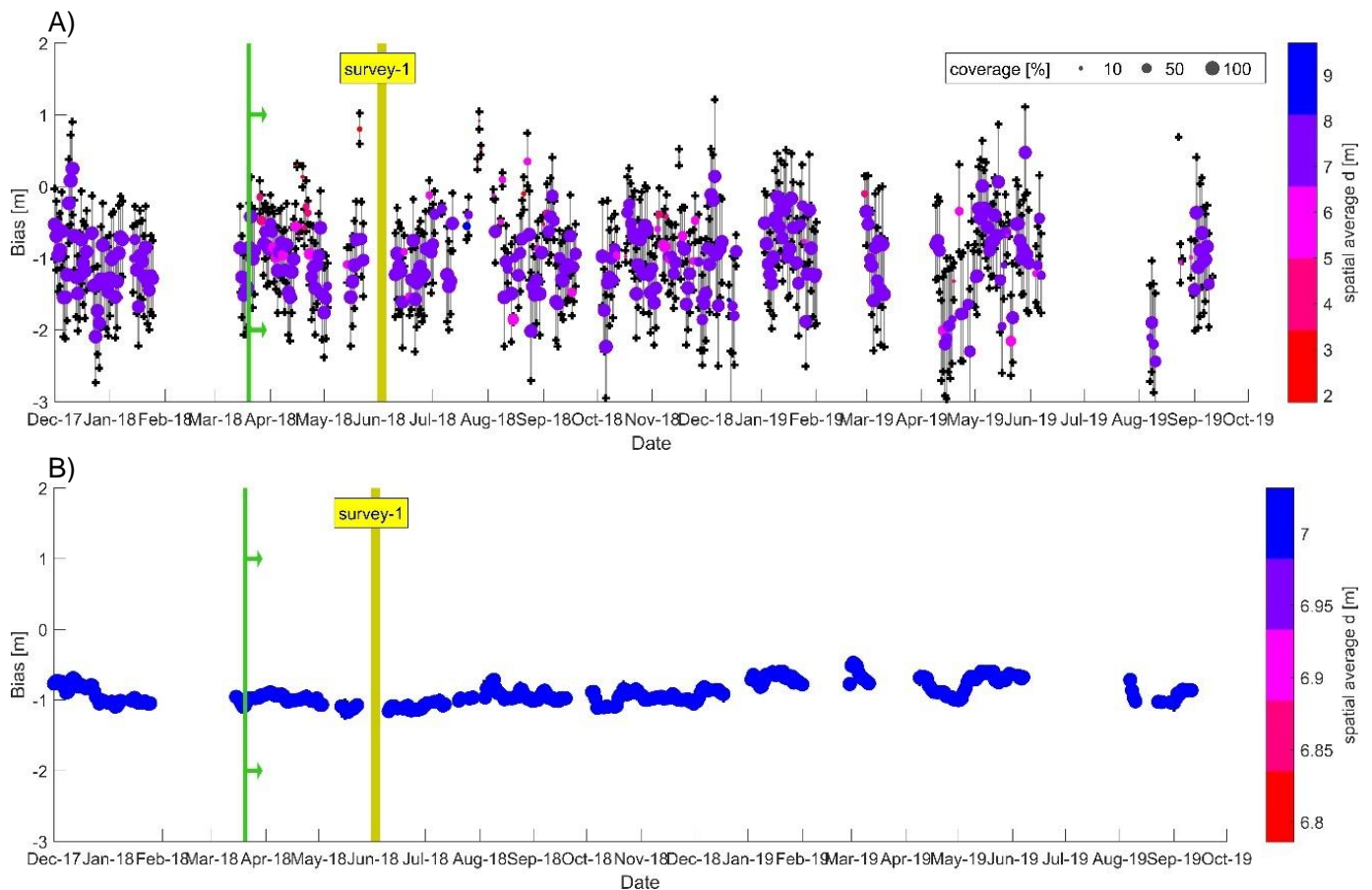
Figuur 6.2 Hetzelfde als *Figuur 6.1*, maar waarbij gebruik wordt gemaakt van een Kalman filter met procesvariantie: A) $Q = 0.01$ [m²/d] en B) $Q = 0.001$ [m²/d].

7 Vergelijking XBand-radar resultaten met vaklodingen en verdere ontwikkelingen buitendelta

7.1 Effect van Kalman filter op dieptebias van het hele radargebied

Gezien de succesvolle toepassing van het nieuwe Kalman filter op de volumeschattingen van het suppletiegebied, is gekeken naar het effect op de ruimtelijk gemiddelde bias voor de complete Amelander buitendelta (Figuur 7.1). Voor de berekening van deze bias is de vakloding van mei 2018 gebruikt en is aangenomen dat lokale morfologische veranderingen gedurende de observatieperiode een verwaarloosbaar effect hebben op de ruimtelijk gemiddelde bias. De analyse demonstreert de waarde van de data-assimilatie zeer overtuigend: fluctuaties in de schattingen worden sterk teruggedrongen (cf. Figuur 7.1A en Figuur 7.1B; spreiding van de bolletjes) en de dagelijkse onzekerheid wordt verwaarloosbaar (Figuur 7.1B; whiskers zijn verwaarloosbaar klein).

De ruimtelijk gemiddelde bias stabiliseert rond een waarde van $\Delta d = -1$ m. Dit laat zien dat geïnverteerde dieptes over het algemeen de neiging hebben om te diep te zijn. Uit een vraag van de recensenten over het concept artikel Gawehn et al. (2020), is een uitgebreide analyse gedaan naar het effect van stromingsschattingen op de diepteschattingen. Hieruit blijkt dat de bias vooral voortkomt uit situaties waarbij oppervlakte stromingen tegen de golven in stromen, en deze zo vertragen. Verder blijkt dat de bias in de diepteschatting toeneemt naar mate het dieper wordt. Gezien de Amelander buitendelta over het algemeen vrij diep is, is dus een overschatting van de diepte herkenbaar. Op tijdstippen waar het golfsignaal zwakker is, kunnen alleen schattingen worden gedaan voor ondiepere delen van de buitendelta, waardoor de gemiddelde bias over het gebied kleiner lijkt (zie ook Figuur 7.1a; rode bolletjes kleiner en dichter bij nul, $\Delta d_{\text{ondiep}} \rightarrow 0$ m). De resultaten van deze analyse zijn toegevoegd aan de gereviseerde versie van Gawehn et al. (2020). Details over deze analyse kunnen daarin worden gevonden (zie figuren 9 en 10 in het desbetreffende artikel).

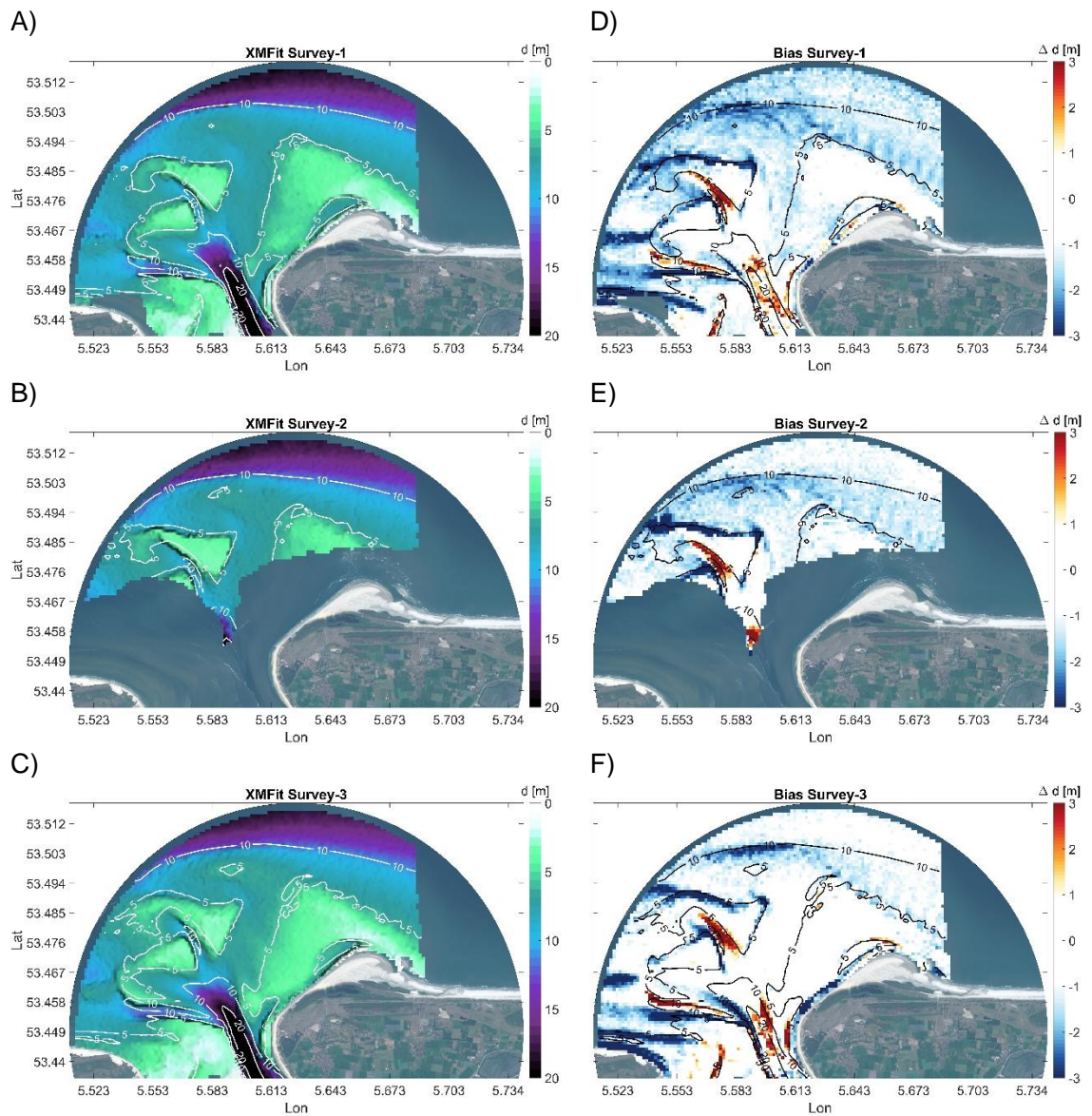


Figuur 7.1 Ruimtelijk gemiddelde dagelijkse diepte bias voor de complete Amelandse buitendelta. De grootte van bolletjes geeft het percentage aan van geldige resultaten in het radar zichtveld. De whiskers geven het 25-75% onzekerheidsinterval aan. Kleuren geven de gemiddelde diepte weer. A) zonder Kalman filter, B) met Kalman filter $Q = 0.01 [m^2/d]$.

7.2 Vergelijking van XBand-radar met vakclodingen

De gefilterde XBand-radar resultaten (voor $Q = 0.01$) zijn vervolgens vergeleken met single-beam vakclodingen van mei 2018, oktober 2018 en juli 2019 (Figuur 7.2). De vergelijking met de vakclodingen laat het volgende zien:

- (1) De bathymetrie geïnverteerd uit XBand-radar plaatjes geeft te allen tijde een accurate weergave van de morfologische structuren van de buitendelta, zoals het Bordiep, het Westgat, de Kofmansplaat en het Bornrif (Figuur 7.2, a-c). De resultaten laten bijvoorbeeld zien dat ten zuiden van de Kofmansplaat een eb-geul aan het uitbouwen is (vanaf hier gerefereerd als de Westelijke eb-geul). Interessant is dat deze West-geul (nog) parallel loopt aan het al bestaande Westgat.
- (2) In lijn met de eerdere observaties (Figuur 7.1,b) zijn geschatte bodems over het algemeen iets dieper dan de daadwerkelijk bodems (Figuur 7.2,d-f; blauwe schaduw). Maar met voortschrijden van tijd worden deze overschattingen steeds minder (cf. Figuur 7.2d en Figuur 7.2 f; blauwe schaduw verdwijnt grootschalig). Het vermoeden is dat het Kalman filter met voortschrijden van tijd, de overschattingen steeds beter weet te detecteren en te compenseren doordat er meer data beschikbaar zijn.
- (3) De geïnverteerde bathymetrie kent enkele probleemzones (Figuur 7.2, f; diep rode en blauwe verschil banden bij Terschelling en de Kofmansplaat). Het blijkt dat deze



Figuur 7.2 Geschatte bodems uit XBand-radar vergeleken met Vaklodgingen van mei 2018 (a,d), oktober 2018 (b,e), en juli 2019 (c,f). Panelen (a-c): De geschatte bodem volgens kleurschaal met vaklodging aangegeven door witte contourlijnen. Panelen (d-f): Het verschil tussen geschatte bodem en gemeten bodem. Blauw geeft overschatting weer en rood onderschatting (zie kleurschaal).

probleemzones overeenkomen met gebieden waar golfbreking gepaard gaat met scherpe gradiënten in de bathymetrie of fijnere morfologische structuren (bijv. zandbanken voor Terschelling). Dit valt te verklaren uit de manier waarom dieptes worden geschat: Een diepteschatting is altijd representatief voor een gebiedje, dwz. een gridcell (hier ca. 1 x 1 km) is nodig voor een diepte schatting. Als gridcellen over scherpe dieptegradiënten liggen, is een enkele diepteschatting van de analyse dus een compromis van diepere en ondiepere delen. Deze manier van analyse hoeft op zich zelf niet altijd te betekenen dat scherpe gradiënten lastig te herkennen zijn. Het is vooral de combinatie met de aanname dat golven lineair zijn, die tot grotere verschillen in de diepteschatting kunnen leiden. Golven worden steiler en niet-lineair als de bodem diepte over een korte afstand sterk afneemt, dit leidt tot overschatting van de diepte

(zie ook Gawehn et al., 2020). In gebieden waar de bodemdiepte snel toeneemt (bijv. zuidelijke punt van Bornrif) worden korte golven langer; het vermoeden is dat in dergelijke gridcellen de karakteristieken van korte golven zwaarder wegen dan de lange golven, wat dan tot onderschatting van de diepte leidt (zie bijv. ook bij de Kofmansplaat: de overgang van ondiepe zone naar centraal geultje).

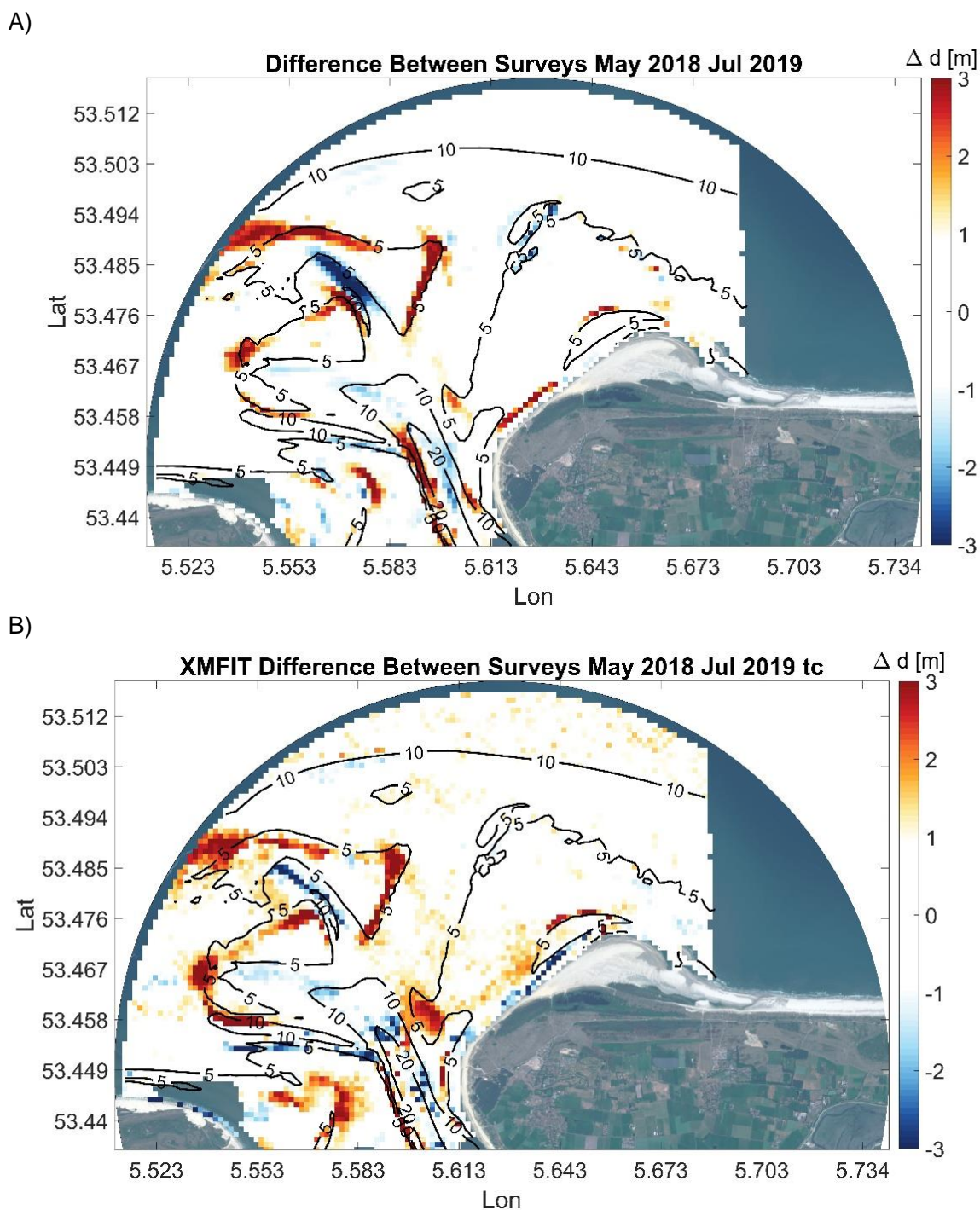
- (4) Gebiedjes waar grotere verschillen heersen tussen geschatte bodems en gemeten bodems zijn consistent (cf. Figuur 7.2, d en f). Dit is een waardevolle observatie gezien deze dan geen/weinig invloed hebben op het waarnemen van veranderingen in de tijd, zie hoofdstuk 7.3

7.3 Ontwikkelingen in de buitendelta tussen mei 2018 en juli 2019

Vervolgens is gekeken naar de morfologische veranderingen die hebben plaatsgevonden gedurende een periode van 14 maanden tussen de vakloding in mei 2018 en de vakloding in juli 2019. Hiervoor zijn de verschillen tussen de twee vaklodingen (Figuur 7.3 a) vergeleken met de verschillen tussen de desbetreffende tijdstippen in de gefilterde XMFit schattingen (Figuur 7.3b).

De overeenkomsten tussen de gemeten en de geschatte sedimentatie-erosie zijn indrukwekkend goed.

Een geschematiseerde weergave van de sedimentatie-erosie patronen Figuur 7.4 benadrukt de overeenkomsten tussen gemeten- en geschatte verschillen en laat zien dat de XBand-radar analyse gedetailleerde interpretatie van systeemgedrag mogelijk maakt. De nummering van ①...⑨ in Figuur 7.4 wijst herkenbare hoofdstructuren aan, de details kunnen worden nagetrokken in Figuur 7.3

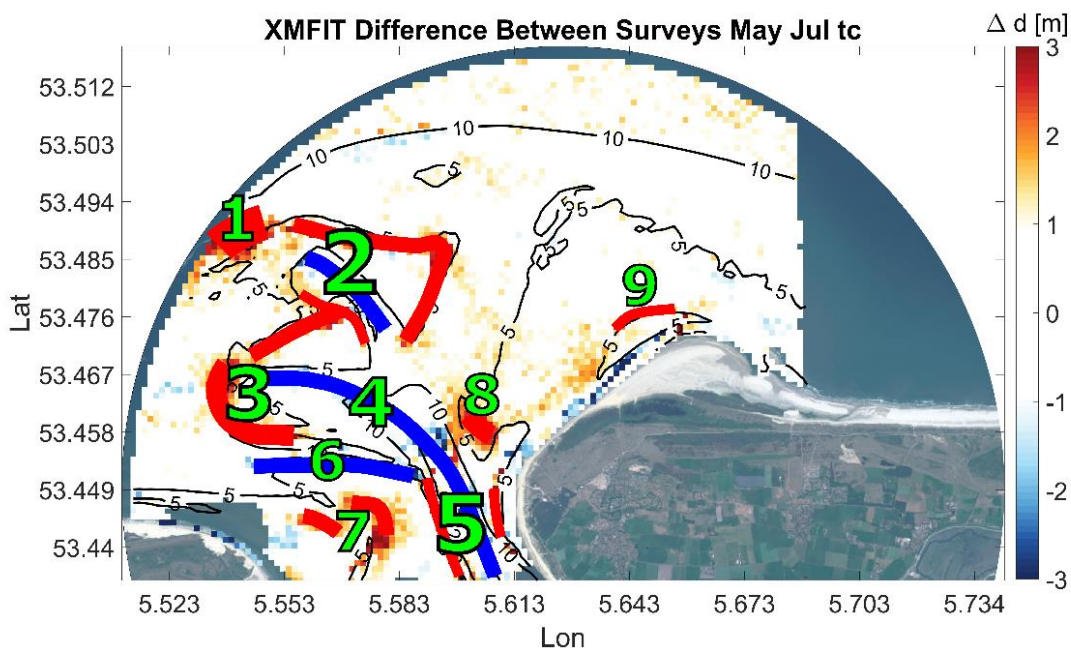


Figuur 7.3 Verschilkaarten tussen mei 2018 en juli 2019 volgens (a) de vaklodingen en (b) de geschatte XMFIT bodems. Rood geeft sedimentatie aan en blauw geeft erosie aan.

Vanuit de analyse van volumeveranderingen in het suppletiegebied (Figuur 6.1 en Figuur 6.2A) was al duidelijk dat de XBand-radar analyse de suppletie herkent, en deze is ook duidelijk zichtbaar op de kaart (Figuur 7.4; ①). Daarnaast is te zien, dat de Kofmansplaat gedurende de 14 maanden met de klok mee, naar het noorden toe is gedraaid (Figuur 7.4; ②). Het vermoeden is ook dat de suppletie een extra sedimentbron is voor aanzanding aan de noordkant van Fig. 7.4 ② en waarschijnlijk ook zand afgeeft aan het ebschild dat de Westelijke eb-geul omsluit (Figuur 7.4; ③). De groei en uitbouw van de westelijke ebgeul laat zien dat

deze een groter deel van de ebuitstroom overneemt van het Akkepollegat. De geul wordt dieper (Figuur 7.4; ④), maar ook breder. Dit is onder meer een reden voor de noordwaartse verplaatsing van de Kofmansplaat (Figuur 7.4; ②), maar zorgt er ook voor dat het parallel lopende Westgat iets naar het zuiden toe wordt verdrongen (Figuur 7.4; ⑥). De vraag is hier of de Westelijke eb-geul het Westgat steeds verder naar het zuiden zal verdringen of dat de twee op gegeven tijdstip zullen samensmelten. Samensmelten lijkt op het eerste gezicht niet logisch gezien het verschil in dominantie van de geulen. Het Westgat is een vloeddominante geul. Van belang zijn hier wel de ontwikkelingen rond het Boschgat. Als er ten zuiden van het Westgat een efficiëntere geul gevormd kan worden, zou dat de rol van het Westgat kunnen overnemen waardoor deze geul kan verdwijnen. Deze configuratie zou weer veel overeenkomst gaan vertonen met historische geulformaties tussen 1950 en 1985 (Elias et al., 2019; zie bijv. 1965/66 in Fig. 10;). Uiteindelijk blijkt het hele systeem te draaien, lichte aanzanding langs de westwand- en erosie langs de oostwand van het Borndiep (Figuur 7.4; ⑤) zijn daar ook voorbeeld van. Het transport over het Bornrif platform is landwaarts (golfgedreven). Bij de kust ondervindt de landwaartse component steeds meer weerstand en het zand wordt opgestuwd. Hierdoor ontstaat dan een verdieping op het Bornrif platform en tussen deze verdieping en de kust wordt de getijstrooming geperst. Deze stroming verspreidt de transporten dan kustlangs. Dit resulteert in aanwas van sediment in het splitsingspunt t.p.v. Borndiep (Figuur 7.4; ⑧), maar ook t.p.v het Bornrif Bankje (Figuur 7.4; ⑨).

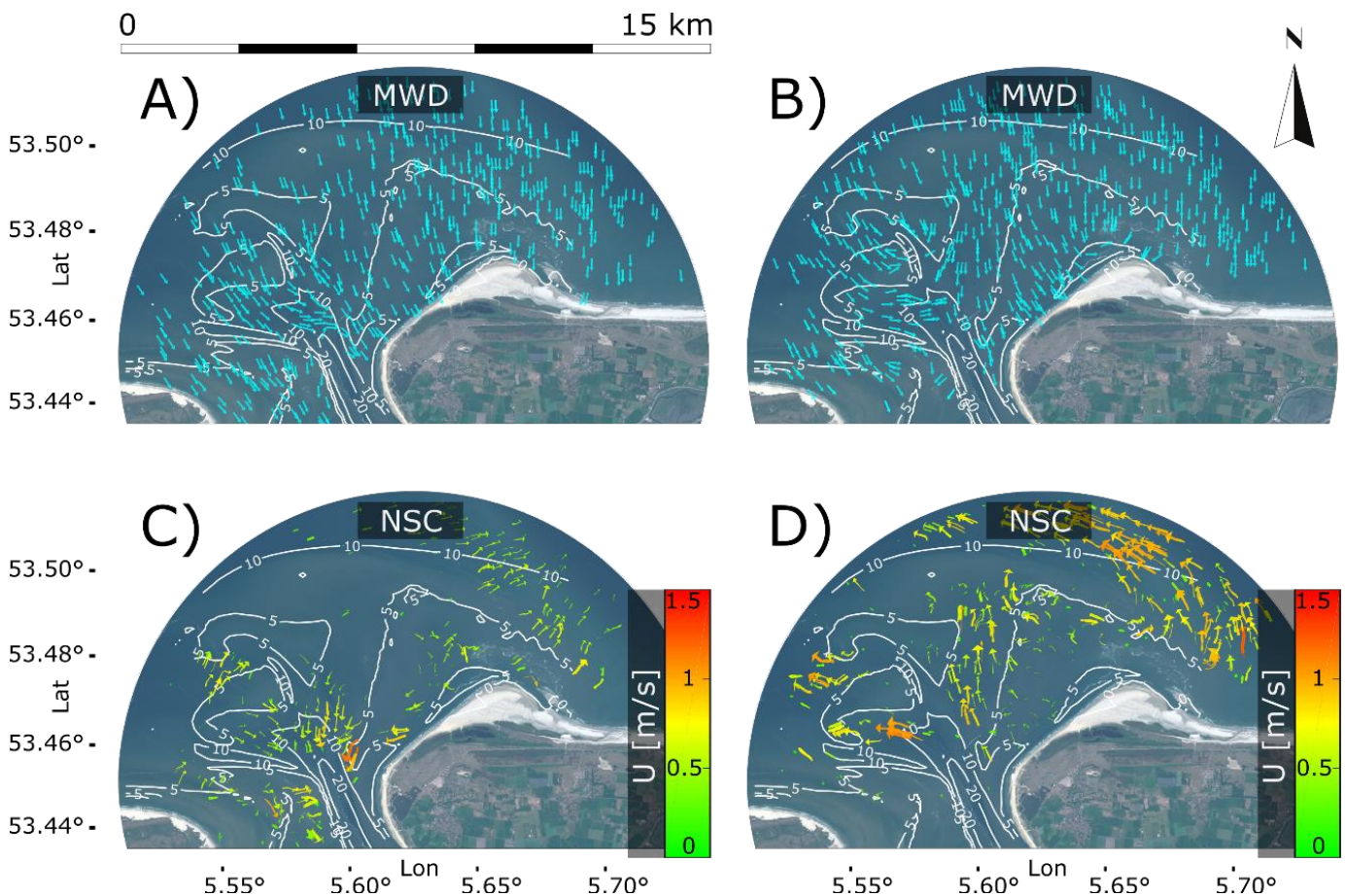
Samenvattend blijkt dat de hele buitendelta roterend gedrag vertoont, met de klok mee. Dit is in lijn met historische observaties (Elias et al., 2019). Naast de hoofd-sedimentatie-erosiepatronen zijn details door de XBand-radar vastgelegd die deze hypothese verder ondersteunen. De oostwaartse verplaatsing en gedeeltelijke opvulling van kleine vloedgeulen langs Terschelling (Figuur 7.4; ⑦) zijn hier een voorbeeld van. Dit is waarschijnlijk gerelateerd aan de transporten vanaf de kust. Door het netto oostwaarts gericht golfklimaat ontstaan hier kleine geulen en banken die oostwaarts migreren.



Figuur 7.4 Geschematiseerde sedimentatie-erosie patronen die zichtbaar in zowel metingen als ook de XBand-radarschattingen (mei 2018 tot juli 2019). Rode lijnen verduidelijken sedimentatiepatronen aan en blauwe lijnen de erosiepatronen. De hoofdstructuren zijn genummerd voor referentie.

8 Eerste bevindingen op basis van schattingen voor oppervlaktestroming

Er zijn ook eerste bevindingen gedaan op basis van de geschatte stroomsnelheden door XMFit. Figuur 8.1 laat voorbeelden zien van een laagtij en een hoogtij situatie. Een tweede voorbeeld wordt getoond in Gawehn et al., 2020 (Figuur 9 in die publicatie) als onderdeel van een Doppler-shift analyse.



Figuur 8.1 Voorbeelden van golfrichting (MWD: Mean Wave Directions) en oppervlakte strooming (NSC: Near Surface Currents) bij de Amelandse buitendelta. (A,C): Een laagwater situatie (NAP -1,4 m). (B,D): Een hoogwater situatie (NAP +0,9 m).

De stromingspatronen geven eerste aanwijzingen dat er naast substantiële stromingen door de Westelijke eb-geul ook stroming heeft plaatsgevonden door het "gat" in de Kofmansplaat (vooral gedurende de zomermaanden van 2018)(zie gat in 5 m contourlijn

Figuur 8.1 ,c); deze stroming gebeurde zowel gedurende vloed (druk noord-oostwaarts, 8.1,c) als ook tijdens eb (afbuigende stroming naar zuid-west en daardoor opgevoerde waterdruk naar noord,

Figuur 8.1 ,d). Deze stroming is een voorbeeld voor een fysiek proces dat een noordwaarts gerichte kracht uitoefent tegen de binnenwand van de Kofmansplaat, en deze daardoor naar het noorden forceert (opgevoerde waterdruk ter plekke van Figuur 7.4②; blauwe lijn).

9 Conclusies

Op de vuurtoren van Ameland is een operationeel nautisch radarsysteem aanwezig dat met behulp van de analysesoftware XMFit schattingen maakt van de bodemligging bij de Amelander buitendelta. Op basis van de opgedane inzichten en kennis tot nu toe kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- (1) Net als de multibeammetingen van het suppletiegebied, geven ook de gefilterde Xband-radar resultaten aan dat het suppletiegebied sinds eind november 2018 netto circa 50.000 m³/maand aan volume verliest.
- (2) Uit de XBand-radar analyse volgt, dat de volumeontwikkelingen in het suppletiegebied met een nauwkeurigheid van 7% konden worden gevolgd (zie ook Gawehn et al. 2020).
- (3) Een directe vergelijking met de vaklodingen uit 2018 en 2019 laat zien dat de radaranalyse lokaal kan verschillen met de werkelijkheid. Over het algemeen worden dieptes in de Amelander buitendelta overschat en deze overschattingen zijn groter in diepere delen van de buitendelta. De kwaliteit van de diepteschatting correleert ook met de richting en grootte van de oppervlaktestroming. De diepte wordt meestal onderschat voor stroming in richting van de golven, en de diepte wordt overschat voor stroming tegen de golven in (zie Gawehn et al., 2020).
- (4) Op tijdstippen waar het golfsignaal zwakker is, kunnen alleen schattingen worden gedaan voor ondiepere delen van de buitendelta.
- (5) De toepassing van een Kalman filter heeft de XBand-radar resultaten consistent gemaakt in de tijd. Dit is zichtbaar in de volumeveranderingen van de suppletie, maar ook in de dieptebias van de complete Amelander buitendelta.
- (6) XBand-radar analyse is een geschikte manier om verandering in de tijd te volgen. Sedimentatie-erosiepatronen geven zowel in vorm als in grootte een goed beeld van de daadwerkelijke veranderingen. Daardoor kunnen systeemveranderingen worden gedetecteerd en geïnterpreteerd. Zo was het mogelijk om sedimentatie-erosiepatronen te linken aan een rotatie van de gehele buitendelta. Het is duidelijk dat de Westelijke eb-geul een alsmaar belangrijkere rol inneemt in het afvoeren van getijdewater: Deze wordt langer, breder en dieper. Hierbij wordt het Westgat naar het zuiden verdrongen en nemen ogenschijnlijk de stroomsnelheden in de hoofdgeul af, gezien hier sedimentatiepatronen zichtbaar worden. Een eerste analyse van de XMFit-schattingen voor oppervlaktestroming suggereren dat de Kofmansplaat zowel door eb als ook vloedstroming wordt verplaatst.
- (7) Als middel om suppleties te volgen is de huidige systeem opzet attractief door dat er gebruik wordt gemaakt van een al bestaand navigatiesysteem. In vergelijking tot in-situ metingen zijn de diepteschattingen uit radarbeelden onnauwkeuriger maar wel veel frequenter (3-5 jaarlijkse metingen vs. dagelijkse schattingen met XMFit).

Referenties

Gawehn, M., Swinkels, C., van Dongeren, A., Hoekstra, R., de Vries, S., Aarninkhof, S., 2020. *The application of a radar-based depth inversion method to monitor near-shore nourishments on an open sandy coast and an ebb-tidal delta*, submitted for 2nd review at Coastal Engineering

Elias, P., van der Spek, A., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Marine Geology. *Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands*.

Van IJzendoorn, C., 2018. *Monitoring the bathymetry of the Ameland ebb-tidal delta using X-band radar data*. Master Thesis. Utrecht University.

Grossmann, F., Gawehn, M., de Vries, S., de Wit, F. P., & Aarninkhof, S. G., 2019. *Comparison of Currents Derived from X-band Radar and Collected In-situ Data in Ameland Inlet*. Coastal Structures 2019, 416-425.

Van Rhijn, T., 2019. *Sediment transport during the execution of the pilot nourishment Ameland Inlet: Development of a tool for analysing bathymetric surveys, applied on the pilot nourishment Ameland inlet*. Master Thesis. Technical University Delft .