

Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie.



Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie.

Auteur(s)

Edwin Elias

Morfologische analyse buitendelta Ameland en de rol van de pilotsuppletie.

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	De heer S. Pluis
Referenties	Referenties
Trefwoorden	Ameland, suppleties, Waddenzee, Morfologisch modeleren, Delft3D

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	31-12-2021
Projectnummer	11206794-004
Document ID	11206794-004-ZKS-0006
Pagina's	84
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Edwin Elias	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
1.0	Edwin Elias	Marcel Taal	Toon Segeren	

Samenvatting

De pilotsuppletie op de buitendelta van het Zeegat van Ameland, de uitgebreide Kustgenese 2.0 metingen en onderzoek binnen de programma's Kustgenese 2.0, KPP – B&O kust en SEAWAD hebben veel nieuw inzicht opgeleverd in de morfologische werking van de zeegaten. Dit genereerde veel nieuwe kennis over de werking van de buitendelta, de maatgevende processen en de rol van suppleties. In deze rapportage worden de belangrijkste inzichten samengevat.

De binnen Kustgenese 2.0 uitgevoerde veldmetingen zijn uniek en geven inzicht in de dynamiek op mesoschaal van zeegaten. Hoogfrequente bodemmetingen illustreren het proces van sediment bypassing (van initiatie van de bank-geul systemen, naar groei en verplaatsing ervan) en de invloed hiervan op de dynamiek van het zeegat. Verstoringen op de kleinste schaal (individuele banken en geulen) kunnen doorgroeien naar de schaal van de buitendelta en deze grootschalig veranderen. Deze kennis was voor Kustgenese 2.0 vooral gebaseerd op conceptuele modellen en expert judgement. De ontwikkeling van innovatieve meettechnieken zoals de Xband radar, maakt het mogelijk deze ontwikkelingen continu en op afstand in te winnen, te volgen en te analyseren.

De pilotsuppletie en het onderzoek naar aanleiding daarvan laten zien dat zo'n suppletie (van ongeveer 5 miljoen m³) goed aangelegd kan worden op de buitendelta, op verschillende manieren, afhankelijk van de doelen. Een suppletie op de buitendelta kan zo geplaatst worden dat de autonome processen actief of alleen passief beïnvloed worden. De uitgevoerde modellering leert dat suppleties geplaatst op de rand van de buitendelta (zoals bij de pilotsuppletie is gebeurd) of op het de banken van het Bornrif zich passief gedragen. Suppleties geplaatst onder directe invloed van de circulatie in het zeegat hebben directe invloed op de autonome processen. Ze hebben daarom een grotere invloed op de morfologische veranderingen van de buitendelta. De pilotsuppletie gedraagt zich als een passieve suppletie. Twee en half jaar na aanleg is er 2,1 miljoen m³ aan erosie opgetreden van de suppletie. Dit sediment is in de banken van de buitendelta opgenomen zonder daarbij de autonome morfologische processen te verstoren.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	7
1.1	Probleemstelling en doelstelling	7
1.2	Opbouw van deze rapportage	7
2	Literatuur	8
2.1	KPP B&O kust - zeegaten	8
2.2	Kustgenese 2.0	8
3	Het zeegat van Ameland	12
3.1	Een schaalcascade voor de buitendelta	12
3.2	Ligging van geulen en platen op de buitendelta in 2021	14
3.3	Bodemsamenstelling	16
3.4	Processen op de buitendelta.	17
3.5	Morfologische veranderingen	21
3.5.1	Ontwikkeling van geulen en platen	21
3.5.2	Volumeveranderingen	25
3.5.3	Ontwikkeling van de ebschilden in detail	27
3.5.4	Een conceptueel model van de werking van de buitendelta	29
3.6	Innovatieve monitoring	32
4	De pilotsuppletie in het Ameland Zeegat	36
4.1	Inleiding	36
4.2	Aanleg van de suppletie	37
4.3	Morfologische veranderingen na aanleg	39
4.4	Volumeverandering van de suppletie	41
5	Verdiepingsslag werking van de buitendelta en pilotsuppletie Ameland Zeegat	43
5.1	Inleiding	43
5.2	Morfostatische modellering (Lambregts, 2021).	43
5.2.1	Model, methode en modelsimulaties	43
5.2.2	Processen voor aanleg van de suppletie	45
5.2.3	Processen na aanleg van de pilotsuppletie Ameland Zeegat	47
5.3	Morfodynamische modellering (Harlequin, 2021).	49
5.3.1	Model, methode en modelsimulaties	49
5.3.2	Morfologische invloed van de pilotsuppletie Ameland Zeegat	50
5.3.3	Alternatieve suppletieontwerpen	52
6	Synthese, Conclusies en Aanbevelingen	55

6.1	Synthese	55
6.1.1	Verschillende functies van buitendeltasuppleties	55
6.1.2	De werking van een suppletie op de buitendelta van het Zeegat van Ameland.	58
6.1.3	Toetsing van hypothesen	60
6.2	Conclusies	61
6.3	Aanbevelingen	61
7	Referenties	63
A	Kustgenese 2.0 metingen	69
B	Bodemmetingen	72
B.1	Overzicht van de Vaklodingen	72
B.2	Bodemdata buitendeltasuppletie	72
B.3	Bodemdata Radar	76
C	Morfodynamische modellering.	77

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling en doelstelling

Het beter begrijpen van het morfologische systeem en de sedimentuitwisselingen tussen kust, zeegat en bekken is een belangrijk doel van het deelproject Zeegaten van KPP B&O Kust (*Kennis Primaire Processen Beheer & Onderhoud Kust*). Dit deelproject bestudeert zeegaten en buitendelta's in detail. Ook voor het Zeegat van Ameland zijn verscheidene studies uitgevoerd, waarvan een aantal waren gerelateerd aan Kustgenese 2.0. Dit is een onderzoeksprogramma, gestart in 2015, met als doel kennis te genereren over het Nederlandse zandige kustsysteem, in het bijzonder om na 2020 goed onderbouwde besluiten te kunnen nemen over toekomstig beleid en beheer van dit systeem. Binnen Kustgenese 2.0 is de pilotsuppletie Amelander Zeegat aangelegd op de buitendelta. Dit leverde vele nieuwe inzichten op, gerapporteerd in meerdere rapporten en publicaties.

Na afronding van het Kustgenese 2.0 is de bodem- en radarmonitoring doorgezet en zijn er aanvullende modelleringsstudies uitgevoerd (Lambregts, 2021; Harlequin, 2021; Gawehn, 2021; Elias et al, 2022). Hiermee zijn aanvullende inzichten verkregen in de lange-termijn effecten van de suppletie op de morfologie.

In deze rapportage wordt de bestaande kennis van de werking van de buitendelta van Ameland en de pilotsuppletie samengevat, waarin ook de nieuwste inzichten uit de recente metingen en modelleringsstudies zijn meegenomen. In de discussie wordt hierbij ingegaan op de mogelijke rol van suppleties in handhaving van buitendelta's en de werking van deze suppleties.

1.2 Opbouw van deze rapportage

Hoofdstuk 2 geeft een overzicht van alle literatuur die in het kader van het Kustgenese 2.0, SEAWAD en KPP B&O kust is gepubliceerd. Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van de morfologische kenmerken van het zeegat van Ameland, de morfologische veranderingen die zijn opgetreden en de onderliggende processen. In hoofdstuk 4 doet verslag van de analyse van de pilotsuppletie in het Amelander Zeegat, op basis van de bodemhoogtemetingen en de X-band radarmetingen. De belangrijkste resultaten van de uitgevoerde morfostatische en morfologische modellering staan in Hoofdstuk 5. De inzichten vormen de basis voor de synthese, conclusies en aanbevelingen (Hoofdstuk 6).

2 Literatuur

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van de relevante studies uitgevoerd binnen KPP B&O kust en Kustgenese 2.0. Deze vormen de basis van de analyses in deze rapportage.

2.1 KPP B&O kust - zeegaten

Binnen KPP B&O kust zijn er voorafgaand en ter voorbereiding van Kustgenese 2.0 een aantal studies uitgevoerd. Deze geven een kennisbasis voor de morfologische modellering (Elias en Tonnon, 2016), vatten de morfologische veranderingen van het zeegat samen (Elias, 2017b, 2018) en zijn uitgevoerd ter ondersteuning van de locatie van een suppletie op de buitendelta (Bak, 2017; Elias et al., 2017a).

Een overkoepelend verhaal van de morfologische veranderingen van de buitendelta staat in Elias et al. 2019. Daarin worden de korte- en langetermijnontwikkeling van de buitendelta beschreven. Recentelijk zijn er aanvullende studies uitgevoerd naar systeemsuppleties op eilandkoppen (Elias et al., 2020; Elias, 2020) en een detailstudie naar de ontwikkeling van de Boschplaat (Elias et al. 2020).

- Elias, E.P.L. & Tonnon, P.K., 2016. Beschrijving kennisbasis modellering van zeegaten t.b.v. Kustgenese 2. Report 1230381-000, Deltares, Delft. 66 pp.
- Bak, J. (2017), Nourishment strategies for Ameland Inlet, Master's thesis, Delft University of Technology.
- Elias, E.P.L., 2017a. Stroming en sedimenttransport langs de Boschplaat op Terschelling. Rapport 11200878-000, Deltares, Delft, 60p.
- Elias, E.P.L., 2017b Understanding the present day morphodynamics of Ameland inlet, Rapport 1220339-006-ZKS-0006, 46 p.
- Elias, E.P.L., 2018. Understanding the present-day morphodynamics of Ameland Inlet – part 2. Kustgenese 2.0, product ZG-B04. Report 1220339-007-ZKS-0007, Deltares, Delft.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. Marine Geology 415.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F., Pearson, S., 2020. Systeemsuppleties op Eilandkoppen Modelling suppletievarianten Texel en Ameland, Rapport 11205236-005-ZKS-0006, Deltares, Delft, 202 p.
- Elias, E.P.L., 2020. Systeemsuppleties op Eilandkoppen. Synthese, Rapport 11205236-005-ZKS-0009, Deltares Delft, 43p.
- Elias, E.P.L., Pearson, S., Van der Spek, A.J.F., Pluis, S., 2022. Understanding meso-scale processes at a mixed-energy tidal inlet: Ameland Inlet, the Netherlands – implications for coastal maintenance. Ocean & Coastal Zone Management (accepted for publication)
- Elias, E.P.L., 2020. De morfologische ontwikkeling van de Boschplaat – Terschelling, Rapport 11205236-003, Deltares, Delft., 49 p.

2.2 Kustgenese 2.0

Kustgenese 2.0 richtte zich enerzijds op de werking van buitendelta's in algemene zin en anderzijds op de pilotsuppletie op de buitendelta van het Ameland Zeegat. Deze pilotsuppletie werd tussen maart 2018 en februari 2019 aangebracht. Dankzij de uitgebreide monitoring van deze suppletie en tijdens de Kustgenese 2.0 meetcampagne (van Prooijen et

al. 2019) is de systeemkennis van zeegatsystemen in het algemeen en van het Ameland Zeegat in het bijzonder vergroot. Zo geven de analyses van de bodemdata een uniek beeld van de vorming en ontwikkeling van “sediment bypassing banken” in buitendelta-systemen (Elias et al. 2019). De studie van Van Rhijn (2019) was gericht op de aanleg van de pilotsuppletie.

Na afronding van Kustgenese 2.0 zijn de behaalde inzichten samengevat in een serie rapporten die een synthese van de morfologische resultaten geven (Elias et al., 2020a), de rol van buitendelta's en mogelijke suppleties bediscussiëren (Elias et al. 2020b). Het opzetten van een proces-gebaseerd model is beschreven in Nederhoff et al. (2019). De toepassing van XBand radar is gedocumenteerd door Gawehn (2020) en Gawehn et al (2020,2021). Een (tussen)evaluatie van de suppletie direct na aanleg is gegeven door Ebbens (2019). Algemene inzichten vanuit Kustgenese 2 zijn samengevat in Rijkswaterstaat (2020).

Binnen het SEAWAD onderzoeksprogramma zijn er analyses uitgevoerd van de bodemvormen en sedimenttransporten door Brakenhoff et al. (2019a,b, 2020a,b) en Brakenhoff (2021) en golf-stroom interacties op de buitendelta zijn onderzocht door de Wit et al (2018,2019,2020). Nieuwe, innovatieve manieren voor de analyse van model- en meetdata worden gepresenteerd in Pearson et al. (2020; 2021). Gawehn et al. (2020) gebruiken de radardata voor het maken van schattingen van de morfologische veranderingen. Pearson et al. (2019,2021a, 2021b) geeft inzicht in de sedimenttransporten aan de hand van numerieke en fysieke sedimenttracers en presenteert nieuwe technieken voor het analyseren van sediment transportpaden (Pearson et al. 2020).

- Ebbens, E. (2019). Tussenrapportage Pilotsuppletie Buitendelta Ameland Zeegat. Rijkswaterstaat. RWS Bedrijfsinformatie, 90 p.
- van Rhijn, M.W., (2019). Sediment transport during the execution of the pilot nourishment Ameland Inlet. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 197 pp.
- Nederhoff, C.M., Schrijvershof, R., Tonnon, P.K., van der Werf, J.J., 2019. The Coastal Genesis II Terschelling - Ameland inlet (CGII-TA) model, Model setup, calibration and validation of a hydrodynamic-wave model. Rapport 1220339-008-ZKS-0004, Deltares, Delft, 88p.
- Van der Werf, J.J., 2019. Data report Kustgenese 2.0 measurements, Rapport 1220339-015-ZKS-0004, Deltares, Delft, 85 p.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., 2020a. Understanding the morphological processes at Ameland Inlet. Kustgenese 2.0 synthesis of the tidal inlet research, Report 1220339-008-ZKS-008, Deltares, Delft, 82 p.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Pearson, S., 2020b. Technisch advies Rol en Mogelijkheden Buitendelta's voor het Kustbeheer. Ten behoeve van beleidsadvies Kustgenese 2.0. Rapport 1220339-009-ZKS-0006, Deltares Delft, 32 p.
- Gawehn, M., van Dongeren, A., de Vries, S., Swinkels, C., Hoekstra, R., Aarninkhof, S., & Friedman, J., 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. Coastal Engineering, 159,
- Gawehn, M., 2020. 1220339-007-ZKS-0005_v2.0-Ontwikkeling en toepassing XBand radar voor morfologische analyses Ameland Zeegat, Deltares, Delft.
- Gawehn, M., 2021. Ontwikkeling en toepassing X-Band radar voor morfologische analyse van het Ameland Zeegat. Eindrapportage ten behoeve van Kustgenese 2.0. Deltares report 1220339-007-ZKS-005, Deltares, Delft, 25 p.
- Gawehn, M., 2021. 11207653-002-ZKS -Verdere ontwikkeling X-Band radar voor morfologische analyses Ameland Zeegat 2020-21, Rapport Deltares 1220339-016-ZKS-0004, 31 p.

- Lambregts P. (2021). Sediment bypassing at Ameland inlet. And the role of an ebb-tidal delta nourishment. Delft University of Technology
- Harlequin, D. (2021). Morphodynamic Modelling of the Ameland Ebb-Tidal Delta. An Assessment of the 2019 Pilot Nourishment. Delft University of Technology.
- Rijkswaterstaat (2020), Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust, Tech. rep., Rijkswaterstaat.
- Van Weerdenburg, R.J.A., Pearson, S., van Prooijen, B., Laan, S., Elias, E.P.L., Tonnon, P.K., Wang, Z.B. (2021). Field measurements and numerical modelling of wind-driven exchange flows in a tidal inlet system in the Dutch Wadden Sea. *Ocean & Coastal Management*, vol. 125, 10.1016/j.ocecoaman.2021.105941.

Vanuit het SEAWAD onderzoek zijn de volgende publicaties beschikbaar:

- Van Prooijen, B. C., Tissier, M. F. S., De Wit, F. P., Pearson, S. G., Holzhauer, H., Gawehn, M., Antolínez, J. A. A., De Vet, P. L. M., Reniers, A. J. H. M., Wang, Z. B., Den Heijer, C., Wilmink, R. J. A. & More Authors Measurements of hydrodynamics, sediment, morphology and benthos on Ameland ebb-tidal delta and lower shoreface. *Earth System Science Data*. 12, 4, p. 2775-2786 12 p. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2775-2020>.
- Brakenhoff, L., G. Ruessink, and M. van der Vegt (2019a), Characteristics of saw-tooth bars on the ebb-tidal deltas of the Wadden Islands, *Ocean Dynamics*, doi:10.1007/s10236-019-01315-w.
- Brakenhoff, L., M. Kleinhans, G. Ruessink, and M. Vegt (2019b), Spatio-temporal characteristics of small-scale wave-current ripples on the Ameland ebb-tidal delta, *Earth Surface Processes and Landforms*, doi:10.1002/esp.4802.
- Brakenhoff, L., R. Schrijvershof, J. van der Werf, B. Grasmeijer, G. Ruessink, and M. van der Vegt (2020a), From ripples to large-scale sand transport: The effects of bedform-related roughness on hydrodynamics and sediment transport patterns in delft3d, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 1–25, doi:10.3390/jmse8110892.
- Brakenhoff, L. B. (2021), Bedforms and their effect on sediment transport on ebb-tidal deltas, Phd, Universiteit Utrecht.
- de Wit, F. P., M. F. S. Tissier, S. G. Pearson, M. Radermacher, M. J. P. V. D. Ven, and A. P. V. Langevelde (2018), Measuring the Spatial and Temporal Variability of Currents on Ameland Ebb-Tidal Delta, in *NCK Days 2018*, Haarlem.
- de Wit, F. P., M. Tissier, and A. J. Reniers (2019), Characterizing wave shape evolution on an ebb-tidal shoal, *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 1–20, doi: 10.3390/jmse7100367.
- De Wit, F. P., M. Tissier, and A. Reniers (2020), The relationship between sea-swell bound wave height and wave shape, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), doi: 10.3390/JMSE8090643.
- Pearson, S. G., B. van Prooijen, F. P. de Wit, H. Meijer-Holzhauer, A. de Loeff, and Z. B. Wang (2019), Observations of Suspended Particle Size Distribution on an Energetic Ebb-Tidal Delta, *Coastal Sediments 2019*, pp. 1991–2003, doi:10.1142/9789811204487_0172.
- Pearson, S. G., B. C. Prooijen, E. P. L. Elias, S. Vitousek, and Z. B. Wang (2020), Sediment Connectivity: A Framework for Analyzing Coastal Sediment Transport Pathways, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(10), doi:10.1029/2020JF005595.
- Pearson, S. G., B. C. van Prooijen, J. Poleykett, M. Wright, K. Black, and Z. B. Wang (2021a), Tracking fluorescent and ferrimagnetic sediment tracers on an energetic ebb-tidal delta to monitor grain size-selective dispersal, *Ocean & Coastal Management*, 212, 105,835, doi:10.1016/j.ocecoaman.2021.105835.
- Pearson, S. G., R. Verney, B. C. van Prooijen, D. Tran, E. Hendriks, M. Jacquet, and Z. B. Wang (2021b), Characterizing Mixed Sand and Mud Suspensions using

Combined Optical and Acoustic Measurements in Estuarine Environments, Earth and Space Science Open Archive, p. 36, doi:10.1002/essoar.10506576.1.

- Pearson, S.G.B.C., Elias, E.P.L., van Prooijen, B.C., van der Vegt, H., van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B., A Novel Approach to Mapping Ebb-Tidal Delta Morphodynamics and Stratigraphy. Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3943525> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3943525>

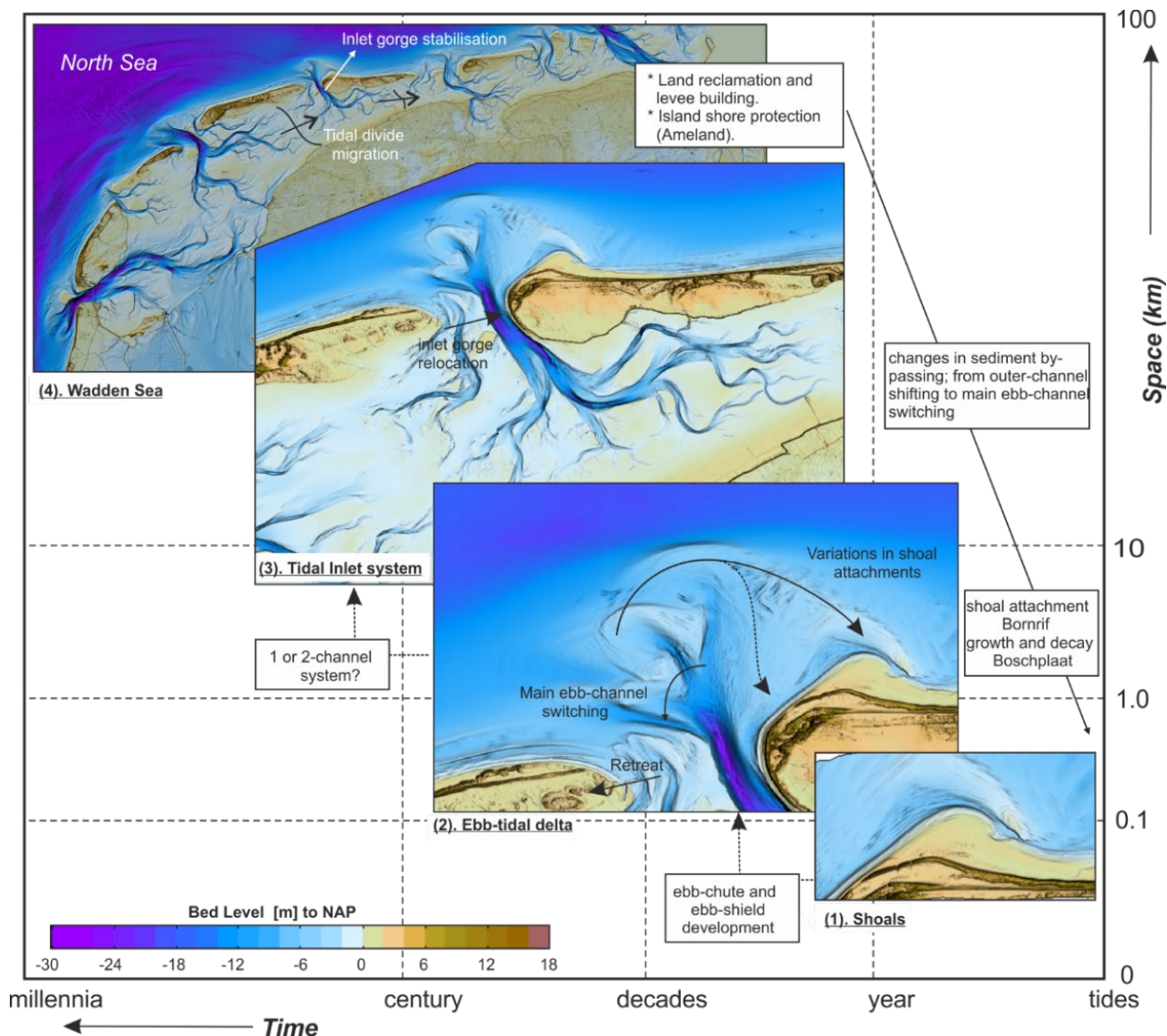
3 Het zeegat van Ameland

3.1 Een schaalcascade voor de buitendelta

Het in kaart brengen van de morfologische veranderingen rond zeegaten is complex, alhoewel het onderliggende principe eigenlijk eenvoudig is. Een zeegat vormt een smalle opening waarin ieder getij grote hoeveelheden water en sediment doorheen geperst worden. Er ontstaan hoge stroomsnelheden die zich tijdens eb ver zeewaarts en tijdens vloed landwaarts uitstrekken. Waar de snelheden kleiner worden dan de kritische transportsnelheid voor bezinking vormen banken. Hierdoor ontstaat aan de zeezijde de ondiepte die ebdelta of buitendelta wordt genoemd en aan de landzijde de vloeddelta. Vanuit de literatuur is welbekend dat het getijprisma, het totale watervolume dat het achterliggende bekken vult, een functie is van de getijslag en de geometrie van dat bekken (Davis en Hayes, 1984) en dat er een relatie bestaat tussen het getijprisma door de keel van het zeegat en het volume van de buitendelta.

De buitendelta's beïnvloeden en bepalen voor een groot deel de (lokale) dynamiek van de naastliggende eilanden en de zandtransporten langs de eilandkusten. Daarnaast vormt de buitendelta het doorgeefluik voor de sedimentstroom van het bovenstroomse eiland naar het benedenstroomse eiland. Een belangrijk onderdeel van deze dynamiek is sediment bypassing. Sediment bypassing beschrijft hoe de sedimentstroom zich over de buitendelta verplaatst. Als de buitendelta in evenwicht is, dan bepalen getij en golven het sediment bypassing proces (zie o.a. Bruun en Gerritsen, 1959; Oertel, 1977, FitzGerald, 1996). Er kan dan onderscheid gemaakt worden in twee verschillende vormen van sediment bypassing. Sediment kan rechtstreeks via de geulen getransporteerd worden en zo direct het zeegat passeren, of het sediment vormt banken op de buitendelta die dan over de buitendelta heen migreren. Bij aanlanding van deze banken groeit de eilandkust uit. Vaak wordt dit gevolgd door een (langdurige) periode van erosie van de aangelande bank. Veranderingen in de configuratie van het zeegat door natuurlijke processen of menselijk ingrijpen kunnen ervoor zorgen dat het sediment bypassing proces ander verloopt, wat dan ook direct zichtbaar is in de kustlijnontwikkeling.

De interactie van morfologische processen die over verschillende tijd en ruimteschalen spelen maakt het soms moeilijk de buitendelta ontwikkelingen goed te begrijpen en te beschrijven. Een hulpmiddel hierbij is de schaalcascade (De Vriend, 1991). Deze schaalcascade is door Elias et al. (2019) toegepast om de ontwikkeling van de buitendelta van Ameland gestructureerd in kaart te brengen (Figuur 3-1). Een belangrijke conclusie uit het werk van Elias et al. (2019) is dat de huidige buitendelta is ontstaan rond 1926. De hoofdgeul in het zeegat is toen richting Ameland verplaatst en heeft zich sindsdien, mede door de uitgevoerde kustverdedigingswerken (bestortingen) aan de westzijde van het eiland, gestabiliseerd. Een tweede belangrijke conclusie is dat niet alleen grootschalige processen belangrijk zijn voor de ontwikkeling van de buitendelta. De buitendelta kan in zijn geheel veranderen door initieel kleine verstoringen op de kleinste schaal, zoals de vorming van eb-schaar-schild systemen die groeien in omvang over tijd. Deze observatie is van rechtstreeks belang voor het kustbeheer, omdat de tijd- en ruimteschalen van ontwikkeling van geulen en banken van gelijke orde zijn als die van grootschalige suppleties zoals de pilotsuppletie.



Figuur 3-1: Een schaalcascade voor de dominante processen op de buitendelta van het Zeegat van Ameland (uit Elias et al. 2019).

Analyses van de ontwikkelingen van de eilandkoppen van Texel (Elias en van der Spek 2006, 2017, 2020), Terschelling (Elias, 2021), Ameland (Elias et al., 2019) en Schiermonnikoog (Elias en Oost, 2021) laten allen zien dat bankverhelingen voor een belangrijk deel de kustlijnontwikkeling van de benedenstrooms gelegen eilanden bepalen. Al deze eilandkoppen zijn uitgebouwd door grootschalige en kleinschalige bankverhelingen. Het aanlanden van banken treden vaak met enige regelmaat of herhaling op en word daarom opgevat als een cyclisch proces (Oertel, 1977; FitzGerald et al., 1984; Oost, 1995; Israël en Dunsbergen, 1999; Hein et al., 2016). Cyclischeit suggereert dat er sprake is van een regelmatige herhaling wat dan een zekere mate van voorspelbaarheid geeft. Deze cyclische benadering is de laatste tijd in toenemende mate ter discussie komen te staan. Enerzijds zijn de meetdata vaak beperkt of onvolledig, wat vaststellen van periodiciteit inherent onzeker maakt. (Son et al., 2011). Anderzijds worden alle ontwikkelingen in een dynamisch kustgebied beïnvloed door zowel deterministische processen, processen die een causaal verband hebben zoals bijv. morfologische respons op het gemiddeld getijd of golfklimaat, als stochastische processen die op toeval berusten (bijv. plaataanlanding of geulafsluiting door een extreme storm, menselijk ingrijpen), waardoor een eerder geobserveerde ontwikkeling

zich niet langer, of enkel nog op een andere wijze, kan voltrekken (Elias et al., 2019). Dit heeft gevolgen voor de voorspelbaarheid van ontwikkelingen in kustsystemen. Ter illustratie: voor Ameland laten Elias et al. (2019) zien dat voorspelbaarheid gebaseerd op een, eerder aangenomen, periodisch verlopende cyclus niet optreedt. In de studie wordt aangetoond dat de configuratie van de geulen en platen op de buitendelta het resultaat blijkt te zijn van zowel deterministische ontwikkelingen die gedreven kunnen worden vanuit de veranderingen in het bekken (langdurige en grootschalige processen), maar ook door stochastische interacties op de kleinste schaal (instabiliteiten op de buitendelta). De verstoringen die deze instabiliteiten veroorzaken zijn inherent onvoorspelbaar, waardoor modellen ten aanzien van de timing van cyclisch gedrag niet geldig of accuraat zijn. Resumerend kan gesteld worden dat er op de buitendelta's vaak sprake is van een herhaling van patronen, maar dat deze zich zeker niet met een vast interval voltrekken.

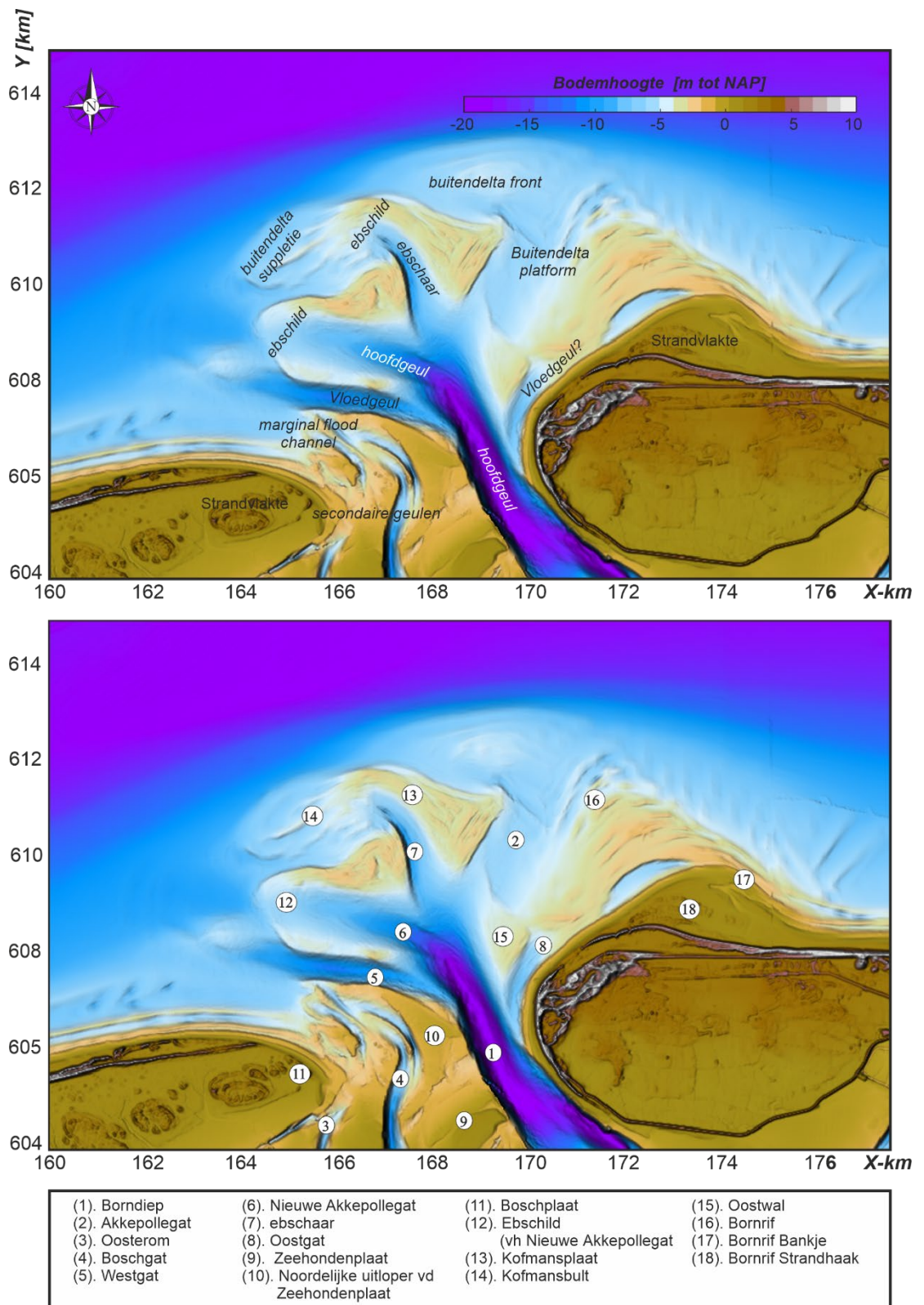
3.2 Ligging van geulen en platen op de buitendelta in 2021

De geulen en banken van de buitendelta zijn continue aan verandering onderhevig. Geulen en banken verplaatsen, verdwijnen en (her)vormen. Consistente naamgeving is hierdoor soms lastig. In deze rapportage wordt de 2021 bodem als basis gebruikt. De naamgeving van de belangrijkste geulen en platen wordt weergegeven in Figuur 3-2.

De 2021 bodem vertoont een duidelijke hoofdgeul aan de oostzijde van het zeegat, langs de westkust van Ameland (het Borndiep [1]). Tot ongeveer 2019 vormde het Akkepollegat [2] de dominante uitstroomgeul de buitendelta op. In de 2021 is het Akkepollegat [2] vrijwel niet meer als geul te onderscheiden. De meest landwaarts gelegen ebschaar [6] vormt in deze bodem de belangrijkste uitstroomgeul. Deze geul heeft de functie van het Akkepollegat overgenomen en heeft daarom de naam Nieuwe Akkepollegat gekregen. Aan weerszijden van het Nieuwe Akkepollegat zijn nog kleinere geulen te onderscheiden; een ebschaar [9] ten noorden ervan en de vloedgeul Westgat [7] aan de zuidzijde.

Op de buitendelta bevinden zich drie duidelijke platen [12, 13, 16]. De grootste plaat, Bornrif [16], ligt oostelijk van het Akkepollegat. Als onderdeel van de sediment-bypassing cyclus vormen er zich periodiek op het Bornrif kleinere platen zoals het Bornrif Bankje [17] dat in 2019 is verheeld met de kust van Ameland. De aanlanding van het Bornrif Bankje vond ten oosten van de Bornrif Strandhaak [18] plaats. De westzijde van de buitendelta, tussen Westgat en Akkepollegat, wordt ook wel Kofmansbult [14] genoemd. Op de Kofmansbult hebben zich recent twee ebscharen [6 en 7] met bijbehorende ebschilden gevormd [12 en 13]. Het zeewaartse ebschild [13] is de Kofmansplaat en aan de westzijde hiervan is de pilotsuppletie [14] nog zichtbaar.

Het oostelijke uiteinde van Terschelling wordt Boschplaat [11] genoemd. Aan de zeewaartse zijde hiervan bevindt zich de vloed-gedomineerde geul Westgat [5]. Tussen de Boschplaat en het Borndiep bevindt zich een ondiep gebied waarin diverse kleinere geulen zichtbaar zijn [3,4]. De grootte van deze geulen varieert door de tijd. Als er een duidelijke geul vormt dan ontstaat er een verbinding tussen de geulen in het bekken en het Westgat (zoals in de jaren 1975 en 1989). Deze verbinding is in het verleden vaak Boschgat [4] genoemd. In het bekken bevindt zich het hogere plaatoppervlakte van de Zeehondenplaat [9]. Deze plaat vormt een scheiding tussen het oostelijke en westelijke deel van het bekken. Het oostelijke deel maakt verbinding met het Borndiep, het westelijke deel met het Boschgat. Aan de noordzijde heeft de Boschplaat zich over de laatste jaren uitgebreid en is er een grote bank ontstaan [10].

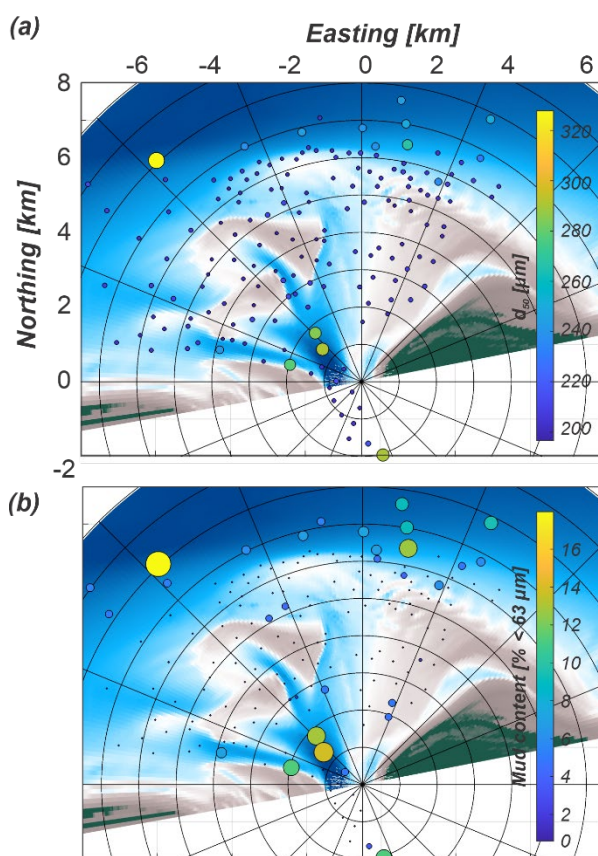


Figuur 3-2: Overzicht van de geulen en platen van de huidige buitendelta van het Zeegat van Ameland. Bodemligging gebaseerd op de 2021 Vaklodgingen van de buitendelta en 2017 Vaklodging in het bekken. De eilanden zijn ingevuld met het AHN. Alle dieptes in deze rapportage zijn t.o.v. NAP en worden weergegeven in het RD coördinatenstelsel.

3.3 Bodemsamenstelling

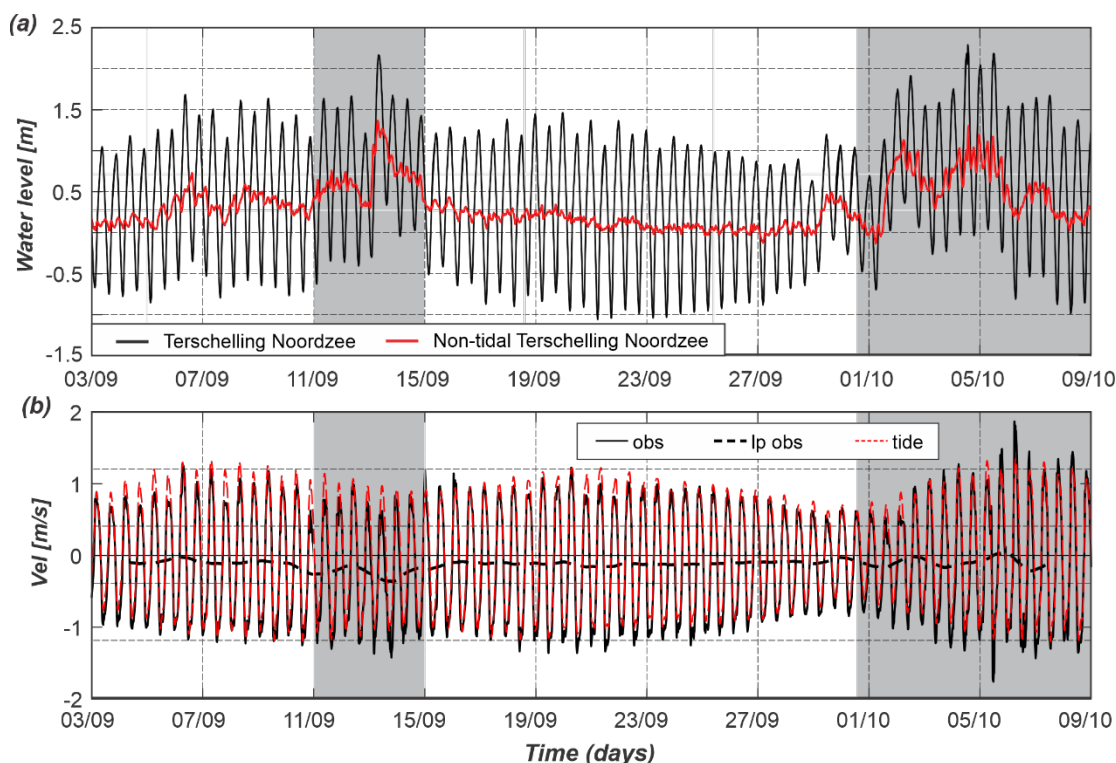
Als onderdeel van de Kustgenese2 meetcampagne is de samenstelling van het bodemsediment uitvoerig in kaart gebracht. In totaal zijn er 165 bodemmonsters genomen met een Reineck box corer (Van der Werf et al., 2019). De bodemmonsters op de ondiepere delen van de buitendelta werden tussen 4 en 5 September 2017 genomen en de diepere delen tussen 20 en 21 September 2017. Uit deze bodemmonsters is de korrelgrootteverdeling bepaald door middel van Malvern Mastersizer.

De gemiddelde korreldiameter (d_{50}) op de buitendelta is homogeen. Het merendeel van de bodem, 79% van de metingen, bestaat uit zand met een diameter tussen van 170-230 microns (Figuur 3-3a). Het sediment vertoont een trend van verfijning met de klok mee (θ van -90° naar 45°) en met toenemende afstand tot het zeegat. De grofste sedimentdiameter wordt gevonden in hoofdgeulen, nabij het zeegat waar de stroomsnelheden hoog zijn (> 1 m/s). Het slibgehalte is klein. In 81% van de metingen is dit kleiner dan 1%. Alleen in de diepere geulen en langs de rand van de buitendelta worden metingen aangetroffen met een slibgehalte van meer dan 1% (Figuur 3-3b). Visuele inspectie van de boxcores geeft aan dat het gemeten slib in de geulen bestaat uit klompen geconsolideerde klei. Deze worden waarschijnlijk geërodeerd uit oudere lagen en als bodemtransport verplaatst. Het slib langs de buitendelta rand is waarschijnlijk afkomstig uit de Waddenzee. De storm Sebastiaan vond enkele dagen voor de metingen plaats. Tijdens deze storm is er waarschijnlijk veel slib in de Waddenzee omgewoeld. Dit slib wordt dan tijdens eb zeewaarts getransporteerd, waarna het neerslaat langs de rand van de buitendelta.



Figuur 3-3(a) Overzicht van de gemiddelde korreldiameter (d_{50}) en (b) gehalte aan cohesief materiaal in de bodem.

Het getij is een belangrijke aandrijver van de stromingen en transporten in het Amelander zeegat. Langs de Waddenkust is het getij 'semi-diurnaal', 2x daags is er hoog- en laagwater (Figuur 3-4). Het getij propageert van west naar oost langs de Waddenkust en de gemiddelde getijslag neemt daarbij toe van ongeveer 1,4 m in Den Helder tot 2,0m bij Ameland. De gemiddelde getijslag ligt rond de 2 m, maar de getijslag vertoont een grote variatie over de springtij – doottij cyclus. Tijdens springtij neemt de getijslag toe tot 3 m en deze reduceert tot ongeveer 1,5 m tijdens doottij. Naast de getijbeweging kunnen stormen ook zorgen voor een aanzienlijke verhoging van de waterstanden. Tijdens de Kustgenese 2.0 metingen was een toename van meer dan 1 m in het gemiddelde waterniveau zichtbaar tijdens Storm Sebastiaan (11 -15 September 2017). In het bekken was de opslingering nog groter, bijna 2 m in het meetstation Nes. Van Weerdenburg et al. 2021 laten zien dat tijdens deze stormen er een aanzienlijke stroming en transport over het wantij optreedt.



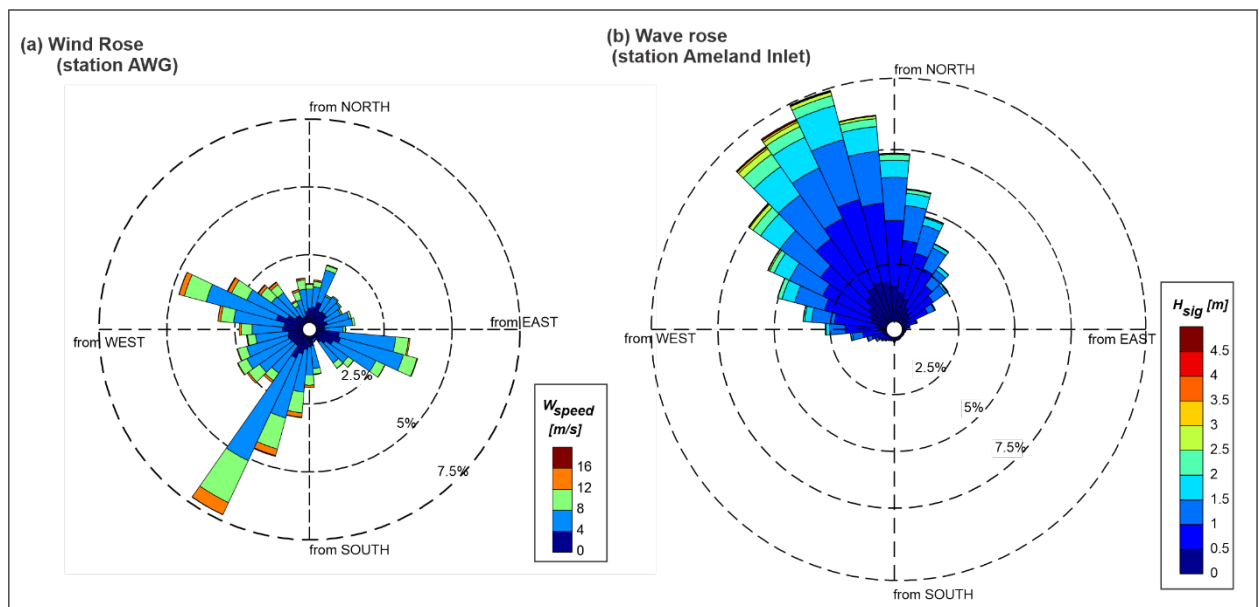
Figuur 3-4(a): Een overzicht van de waterstanden en (b) snelheden in het Borndiep tijdens de Kustgenese2 meetcampagne in 2017.

De binnen de Kustgenese2 uitgevoerde stroommetingen in de keel van het zeegat geven inzicht in met name de opgetreden getijstroomsnelheden (Elias, 2019; Van der Werf et al., 2019). Tijdens springtij worden er dieptegemiddelde stroomsnelheden tot 1,35 m/s gemeten. Deze stromingen reduceren tot rond de 0,50 m/s tijdens doottij (Figuur 3-4b). Door gebruik te maken van een low-pass filter kan de getijstrooming en de residuele stroming worden gescheiden. De residuele stroming laat zien dat er een netto uitstroming optreedt met een gemiddelde snelheid van 0,12 m/s, maar tijdens de stormen zijn deze snelheden hoger (0,2 m/s).

Op basis van drifterexperimenten (De Wit et al., 2018) kan worden geconcludeerd dat er een tweedeling in de uitwisseling van de stroming optreedt. De stroming langs de kust van Terschelling voedt via het Boschgat het westelijke deel van het bekken. De stroming die vanuit het Westgat, of over de buitendelta zeewaarts hiervan, het zeegat bereikt wisselt uit met het Borndiep en het oostelijke deel van het bekken. Deze stroombeelden zijn ook

zichtbaar in de modellering uitgevoerd door Lambregts (2021); zie Hoofdstuk 5 van deze rapportage. Tijdens eb strekt de stroming zich via Borndiep dan zeewaarts uit over de buitendelta (zie Appendix A, Figuur A-2).

De tijdens de Kustgenese 2.0 uitgevoerde debietmetingen (3 in totaal) geven geen duidelijk overheersend restdebiet. Het restdebiet varieert tussen de -9 en +39 miljoen m³/getij. Dit restdebiet is echter klein ten opzichte van de totale eb- en vloeddebieten. Doordat de metingen tijdens verschillende fasen van de springtij-doodtij cyclus zijn uitgevoerd, variëren de vloeddebieten tussen de 330 en 545 miljoen m³ per getij en de ebdebieten tussen de 339 en 506 miljoen m³ per getij. Een vergelijking van deze debieten met oudere metingen laat zien dat deze recente metingen in grootte vergelijkbaar zijn met de debietmetingen die in het verleden zijn uitgevoerd (Van Sijp, 1989; Barsingerhom et al. 2003; Briek et al., 2003; Studiedienst Hoorn, 1973). De grote morfologische veranderingen in het bekken hebben dus niet geleid tot een verandering van het getijprisma in het zeegat. Ook kan de conclusie worden getrokken dat er geen duidelijk overheersende eb- of vloeddominantie van de stroming aanwezig is. Deze dominantie is afhankelijk van het geselecteerde getij en de meteorologische condities (Duran Matute et al. 2014; Van Weerdenburg et al., 2021).



Figuur 3-5: Overzicht van het wind- en golfklimaat representatief voor het Amelanders zeegat gebaseerd op de periode 2007-2017.

Golven zijn een belangrijke factor in de sedimenttransporten op de buitendelta. Het volume van de buitendelta wordt bepaald door het getijprisma (Hayes, 1975; Oertel, 1975; Walton & Adams, 1976), maar de golven zorgen ervoor dat dit volume een bepaalde vorm krijgt en de golven bepalen in grote mate het sediment-bypassing mechanisme dat optreedt (FitzGerald, 1988).

Golven dragen rechtstreeks bij aan sedimenttransporten door golfbreking (opwoeling van sediment en genereren van stromingen) en golf asymmetrie. Uitgebreide analyses van de golven op de rand van de buitendelta worden gegeven door de Wit et al. (2019, 2020) en Reniers et al. (2019). Golven dragen indirect bij aan de sediment-transporten door vergroting van de bodemschuifspanning en door meer sediment in suspensie te brengen, waardoor het getij ook meer sediment kan verplaatsen.

Een overzicht van de wind- en golfcondities die optreden in het Amelanders zeegat wordt gegeven in Figuur 3-5. Een analyse van recente metingen over de periode 2007-2017 laat

zien dat de significante golfhoogte over het algemeen kleiner is dan 2 m. Tijdens stormen ligt de gemiddelde golfhoogte op 2 tot 3 m met een gemiddelde golfperiode van rond de 6 s. Tijdens zware stormen neemt de golfperiode toe naar 7 tot 8 s en worden hogere golven gemeten (4,5 en 9,1 m). Deze condities komen echter minder dan 1% van de metingen voor. Golfperiodes representatief voor swell (> 9 s) komen zelden voor (0,1 % van de metingen). Deze observaties laten duidelijk zien dat het golfklimaat wordt gedomineerd door windgolven die opgewekt worden in de Noordzee.

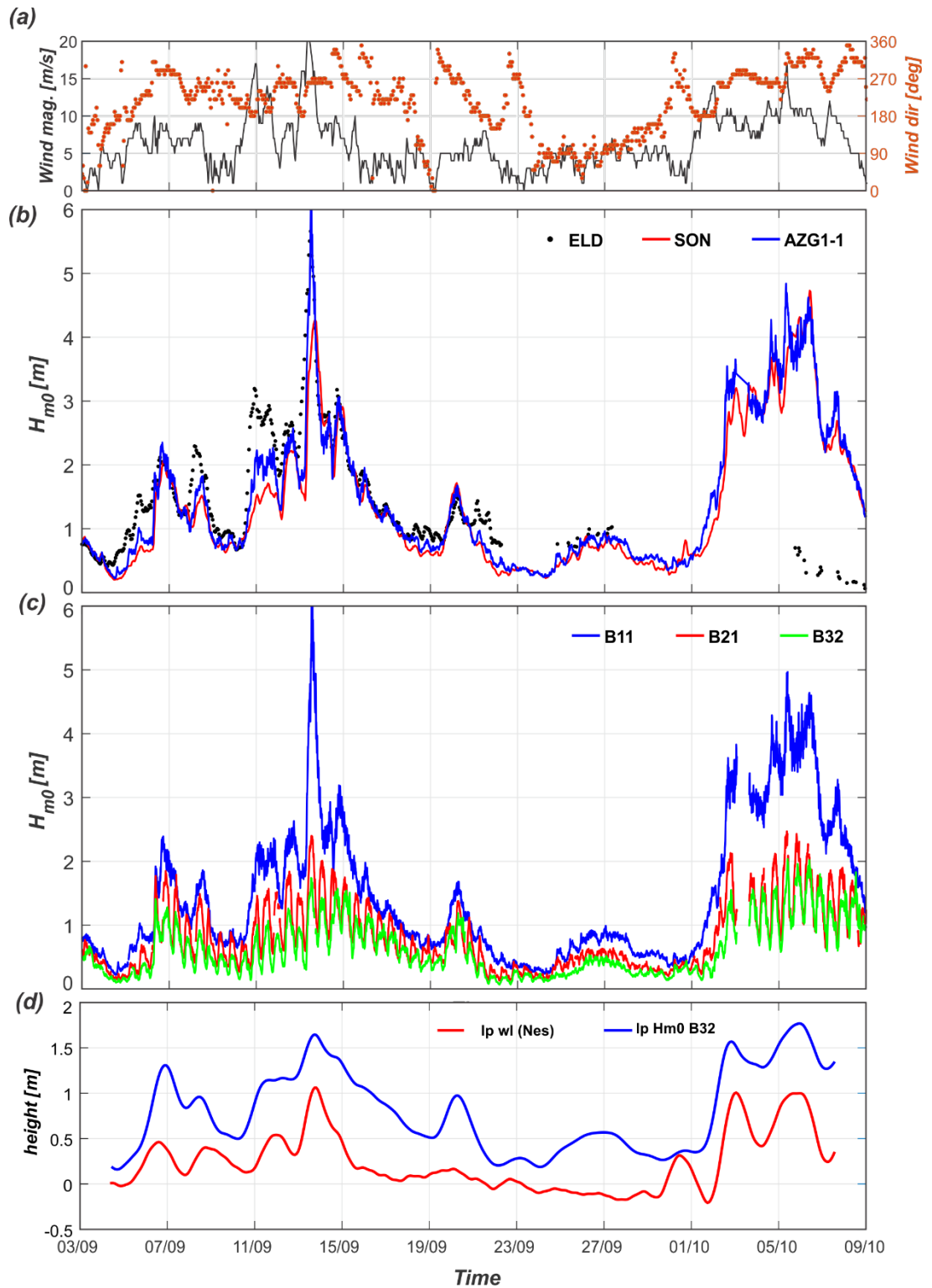
Een vergelijking van de dominante wind- en golfrichting vertoont een duidelijk verschil. De wind vertoont een zuidwestelijke (225°) component. Deze richting komt in de golfhoogte echter niet voor. Dit verschil wordt veroorzaakt door de afscherpende werking van de eilandkusten. Het golfklimaat wordt gedomineerd door de noordelijke richtingen. Ruwweg 33 % van de golven heeft een richting tussen westzuidwest en noordnoordwest (235° – 305°) en 66% van de golven komt uit de richting > 305°.

De buitendelta wordt vaak gezien als een natuurlijke golfbreker die ervoor zorgt dat golven niet tot de aangrenzende eilandkust kunnen doordringen (Hine, 1975; FitzGerald, 1988; Elias & Hansen, 2013). De uitgevoerde golfmetingen op verschillende locaties op zee en op de buitendelta bevestigen dat dit eigenlijk alleen optreedt tijdens storm condities (Figuur 3-6).

Gedurende het merendeel van de metingen ligt de windsnelheid onder de 10 m/s en komt deze uit zuidelijke tot westelijke richtingen (Figuur 3-6a). De golfhoogte blijft onder deze condities beperkt (< 1 m) en de golfperiode heeft een maximum van 4 s. Windsnelheden zijn beduidend hoger (tot 29 m/s) gedurende storm Sebastian die optreedt tussen 11 en 15 september 2017. De golfhoogte zeewaarts van de buitendelta (boei AZB11) neemt dan toe tot 2-3 m met een piekwaarde van bijna 6 m. Hogere golven zijn ook aanwezig tijdens storm Xavier (vanaf 30 september 2017). Tijdens deze storm ligt de windsnelheid lager (rond de 10 m/s) maar worden wel over langere tijd waargenomen uit westnoordwestelijke richtingen. Dit resulteert dan in een periode met golfhoogten van 3 – 4m (Figuur 3-6b).

De meetstations op de buitendelta (Figuur 3-6c) laten zien dat golfafscherming eigenlijk alleen optreedt tijdens stormcondities. Alleen golven hoger dan 2 meter vertonen een duidelijke afname in hoogte. golven gekenmerkt door golfhoogten lager dan 2 meter propageren ongestoord richting de eilandkusten. Aangezien deze golven procentueel gezien het meeste van de tijd voorkomen, spelen ze dus nog steeds een belangrijke rol in de sedimenttransporten van de achterliggende kust. Vanuit het oogpunt van kustveiligheid speelt de golfbrekende werking van de buitendelta echter wel een grote rol. De hoge golven tijdens stormen kunnen niet doordringen tot de achterliggende kust.

De golfmetingen uitgevoerd in het Akkepollegat – Borndiep laten een duidelijke golf-stroominteractie zien. Tijdens eb neemt de hoogte van de dan tegen de getijstroom inlopende golven significant toe (tot dubbel de golfhoogte) ten opzichte van de golfhoogten tijdens de vloedstroming.



Figuur 3-6: (a) Windsnelheid en richting geobserveerd in KNMI meetstation Terschelling (b). Golfhoogte op diep water (stations Eierlandse Gat, Schiermonnikoog Noordzee en boei AZB11 (Ameland), (c) golfhoogte gemeten in boeien AZB11, AZB21 en AZB32 (buitendelta van Ameland). (d) "Low-pass filtered" waterstand voor meetstation (Nes) en voor de golfhoogte van boei AZB32. Zie Appendix A, Figuur A-1 voor ligging van de meetstations.

3.5 Morfologische veranderingen

3.5.1 Ontwikkeling van geulen en platen

De studie van Elias et al. (2019) beschrijft de langetermijnontwikkeling van het zeegat van Ameland in detail. Deze studie vormt ook de basis voor dit hoofdstuk, waarbij de inzichten verder zijn aangevuld met de meest recente meetdata en studies sinds 2019.

Elias et al. (2019) concluderen dat de huidige configuratie van de buitendelta ontstond rond 1926. Voor 1926 grenst het Borndiep nog aan de kust van de eilandstaart van Terschelling. Sinds 1926 ligt de geul dan stabiel tegen de kust van Ameland aan en wordt hier op zijn plaats gehouden door de aangebrachte verdedigingswerken (bestoringswerken). De uitstroom van het Borndiep naar de buitendelta varieert dan nog wel in positie als onderdeel van het sediment-bypassing proces, met afwisselend perioden met een westelijke en noordelijke uitstroomrichting.

In de periode 1989-2021 zijn drie series van aanlandingsbanken te onderscheiden: (A) aanlanding van de Bornrif Strandhaak, (B) aanlanding van het Bornrif Bankje en (C) bankvorming door ebschilden (Figuur 3-7). De Bornrif Strandhaak (A) maakte rond 1985 verbinding met de kust van Ameland. Er vormt na aanlanding een grote strandhaak (Figuur 3-7, 1983) die vervolgens verheelt met de kust (Figuur 3-7, 1996). De overblijfselen van deze Strandhaak zijn ruim 35 jaar na aanlanding nog steeds zichtbaar in de zeevaartse ligging van het strand.

Een tweede bankaanlanding vond plaats rond 2017 met de aanlanding van het Bornrif Bankje (zie Figuur 3-7B). Het Bornrif Bankje ontstaat doordat er in de periode 1989-2005 veel sediment afgezet wordt op het front van de buitendelta. De hoogte van het front van de buitendelta neemt dan ook sterk toe en er ontstaat een grote, relatief hoge plaat op de buitendelta. Deze plaat beweegt zich, onder de invloed van getij en golven, langs de rand van de buitendelta richting Ameland. Het Bornrif bankje landt in 2017 aan op het eiland, net ten oosten van de Strandhaak. Langs deze bank verplaatsen er grote zandvolumes richting het eiland. Aan de zeezijde van deze bank ligt een serie kustdwarse banken (saw-tooth bars) met een hoogte tot 2,27 m. Deze banken spelen mogelijk een rol spelen in de sedimentuitwisseling tussen de buitendelta en de eilandkust (Brakenhoff et al. 2019). De opbouw van het Bornrif bankje is te volgen in Figuur 3-8, Raai B-B' en Raai G-G'.

Een derde serie banken die de basis vormen van een nieuwe bankaanlandingscyclus zijn ook al zichtbaar op de buitendelta (zie Figuur 3-7C). De vorming van deze banken is uitvoering beschreven in Elias et al. (2019). De unieke meetreeks met bijna jaarlijkse opname van de buitendelta tussen 2005 en 2021, maakt het mogelijk het sediment-bypassing proces in detail te beschrijven en te begrijpen. De bodemkaarten laten zien dat de morfodynamiek van de buitendelta gedomineerd wordt door de vorming en verplaatsing van verschillende ebschaar- en ebschild systemen (Figuur 3-7). Deze initieel kleine verstoringen beïnvloeden vervolgens het gehele gedrag van de buitendelta. De gehele cyclus bestaat uit 5 ontwikkelingsfasen.

Fase 1; Sedimentaccumulatie langs de bovenstroomse geulwand van de hoofdgeul.

Sedimentaanvoer langs de kust van Terschelling en de lokale erosie van de Boschplaat resulteren in een overvloedige zandtoevoer naar het zeegat. Via het Borndiep wordt een gedeelte hiervan afgezet aan de westelijke zijde van de geul. Hier vormt zich een langgerekte ondiepte of bank (Figuur 3-7, 2005 bodem).

Fase 2; Vorming van verstoringen (Figuur 3-7, 2006 -2007). Op deze bank vormen zich kleine instabiliteiten of verstoringen. Als deze verstoringen verbinding maken met de grote

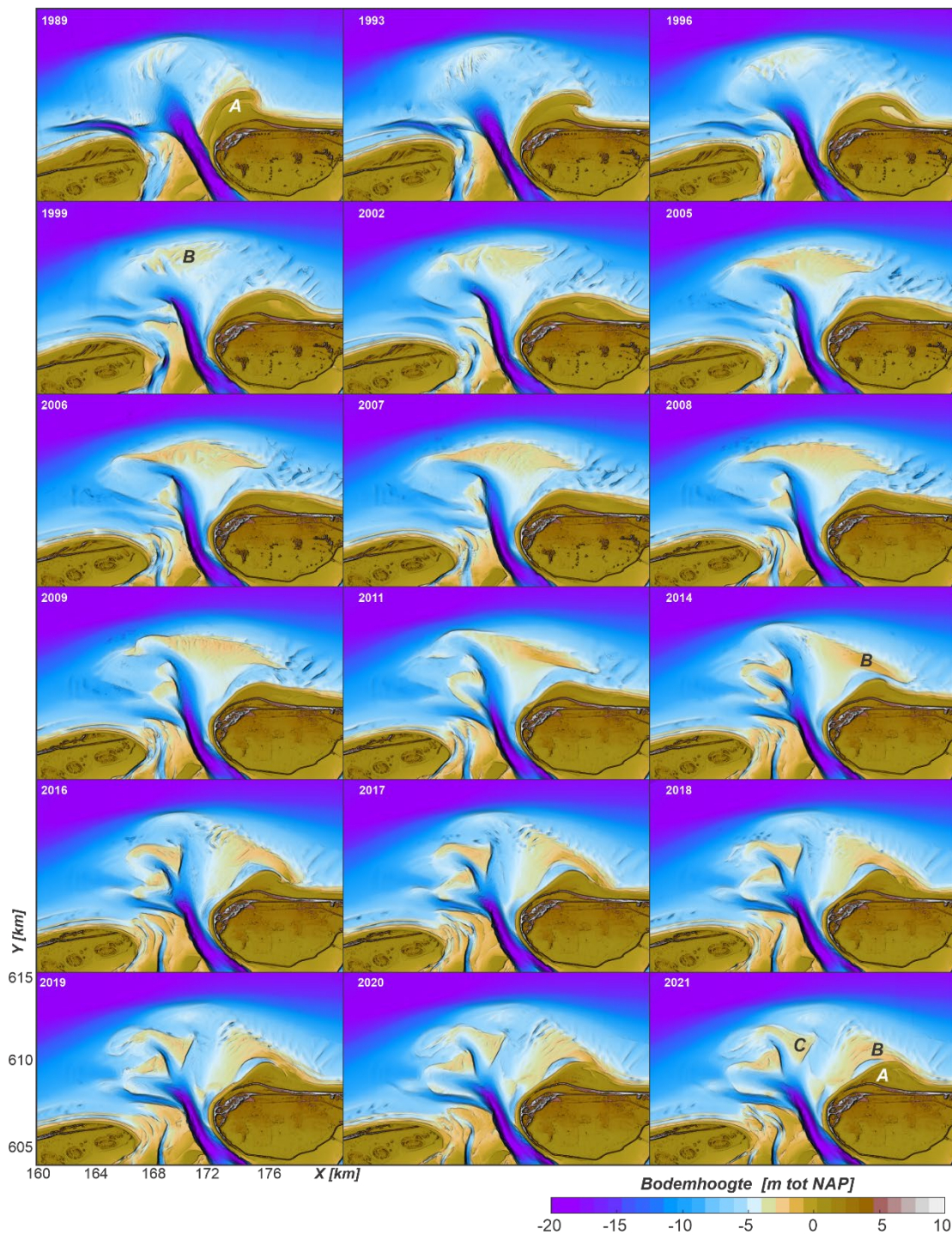
ebstromingen door het Borndiep ontstaat een klein geultje of ebschaar. Het geërodeerde sediment accumuleert zeewaarts van dit geultje in de vorm van een klein ebschild.

Fase 3; Vorming van ebscharen en ebschilden (Figuur 3-7, 2006-2014). De initieel kleine instabiliteiten groeien daarna snel uit. Een serie ebscharen met ebschilden ontstaat. Deze zijn niet allemaal stabiel. Soms worden ze opgenomen in een ander, nieuw ontwikkelend systeem. De gevormde eb- en vloedchilden beginnen de ontwikkeling van de westelijke zijde van het buitendeltaplatform te bepalen. De ebscharen ontwikkelen snel, en de ebschilden verplaatsen zich tot 500 m per jaar in zeewaartse richting. Raai C-C' in Figuur 3-8 geeft de groei van het meest landwaartse ebschild en de bijbehorende ebschaar goed weer.

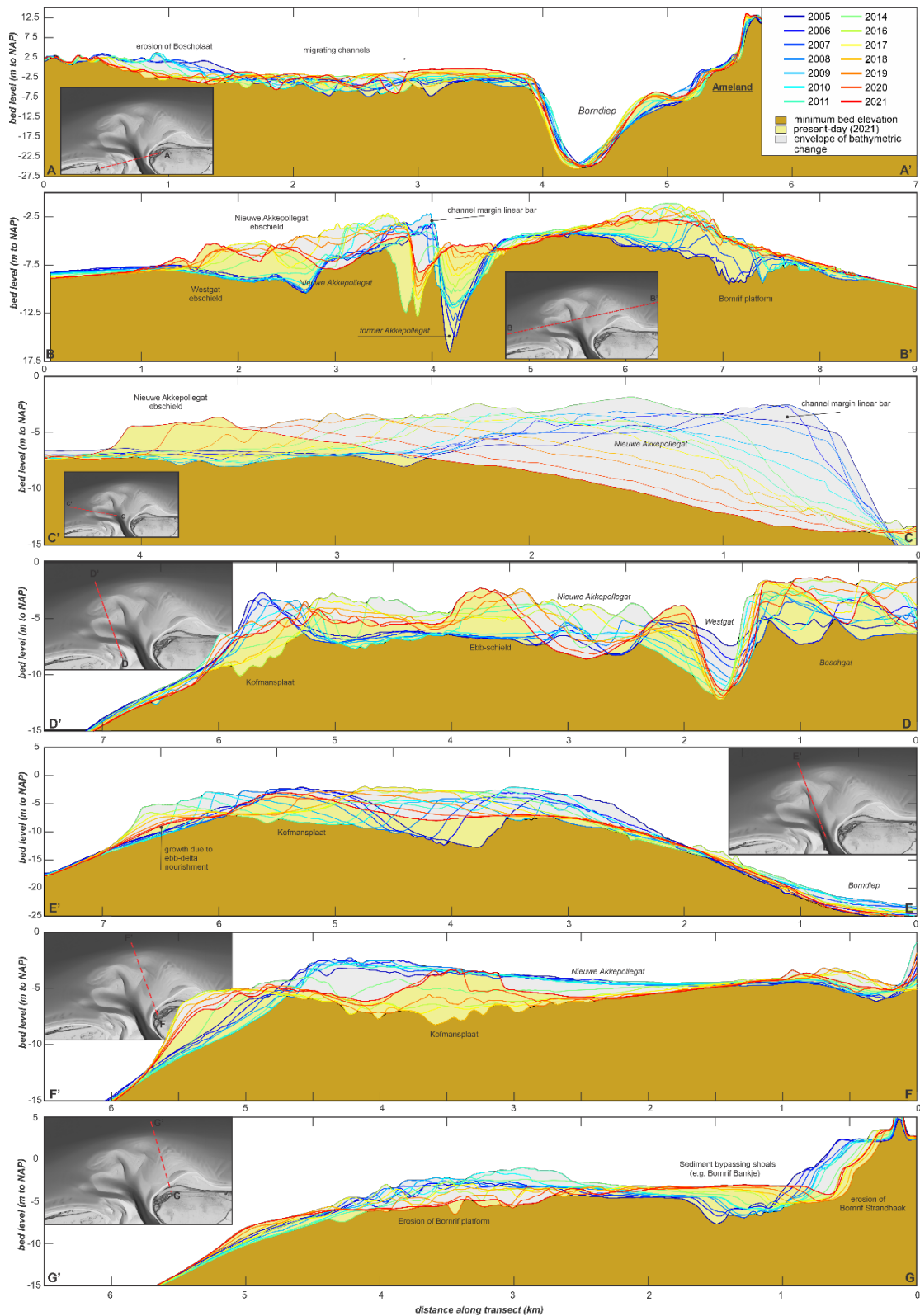
Fase 4; Geul-plaatinteracties (Figuur 3-7, 2014-2019). Met toenemende groei en zeewaartse verplaatsing van een ebschild worden de lokale golfgedreven transporten steeds belangrijker. Door de vorming van deze grote bank ver zeewaarts op de buitendelta gaan hier steeds meer golven breken. Deze golven genereren een oostwaarts transport en verplaatsen het ebschild oostwaarts. Hierbij begint de bank de voormalige ebgeul, Akkepollegat, steeds verder naar het oosten te drukken.

Fase 5; Heroriëntatie van de hoofdgeul en benedenstroomse bankaanlanding (Figuur 3-7, 2019-2020). Met de groei van de ebscharen ontstaan er meerdere uitstroomopeningen van het Borndiep de buitendelta op. De uitstroming door het Akkepollegat wordt daarbij steeds minder efficiënt doordat het zeewaartse ebschild de geul dichtdrukt en oostelijk wegduwt. De meest zuidelijke ebschaar heeft een sterker getijverhang en vormt daarmee een efficiënt(er) alternatief. Deze ebschaar ontwikkelt zich dan ook sterk. Rond 2019 zou kunnen worden geconcludeerd dat dit nu de hoofduitstroomgeul op de buitendelta vormt (het Nieuwe Akkepollegat). Hiermee is het proces van main ebb-channel switching 'afgerond' (zie Appendix A, Figuur A-3 voor een conceptuele weergave).

Het is nog de vraag hoe het Westgat gaat reageren op deze verandering. Langs het Nieuwe Akkepollegat vormt zich een langgerekte bank die deze geul scheidt van het Westgat. Deze bank zorgt ervoor dat het Westgat in breedte afneemt, maar de geuldiepte neemt toe. Het is mogelijk dat de banken het Westgat steeds verder wegdrücken. Een optie is dan dat het Westgat direct verbinding gaat maken met het Boschgat. Er ontstaat dan (tijdelijk) een twee-geulen systeem zoals dat ook in bijv. 1989 te zien was.



Figuur 3-7: Ontwikkeling van de buitendelta tussen 1989 en 2021 op basis van de Vaklodingen, SBW en Kustgenese 2 metingen (zie overzicht in Appendix B.1). De aanlandingsbanken van de 3 sediment-bypassing cycli zijn weergegeven met A, B en C. Representatieve dwarsdoorsneden worden getoond in Figuur 3-8.



Figuur 3-8: Morfologische ontwikkeling van de buitendelta aan de hand van een aantal representatieve dwarsdoorsneden.

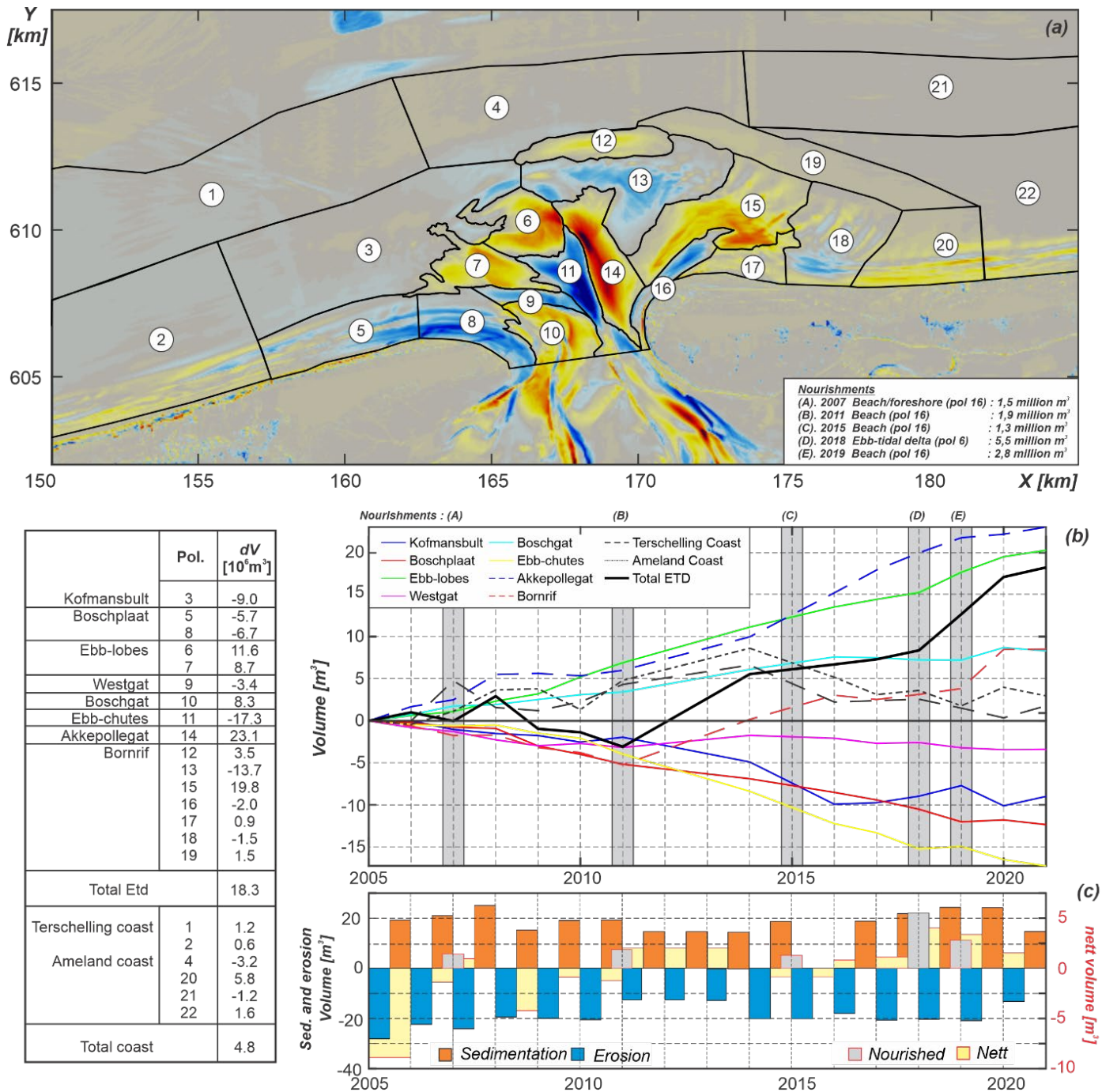
3.5.2 Volumeveranderingen

Een schatting van de volumeveranderingen is verkregen door het verschil in bodemligging tussen de 2005 en 2021 bodem te berekenen (Figuur 3-9). Op de buitendelta is een aaneenschakeling van sedimentatie- en erosiegebieden te zien. Tussen 2005 en 2011 resulteert dit in een verlies aan sedimentvolume van 0,5 miljoen m³/jaar. Sinds 2011 neemt het volume dan weer toe met gemiddeld 2,0 miljoen m³/jaar. In totaal geeft dit in de periode tussen 2005 en 2021 een netto volumetoename van ruim 18 miljoen m³. Deze verandering is klein ten opzichte van de bruto veranderingen. De jaarlijkse bruto verandering, de som van de absolute waarde van de sedimentatie en erosievolumes bedraagt gemiddeld 47 miljoen m³/jaar (Figuur 3-9c). Naast de natuurlijke processen spelen ook zandsuppleties een rol in de volumetoename van de buitendelta. Op de kop van Ameland is 7,5 miljoen m³ zand gesuppleerd tussen 2005 en 2021. Daarnaast is er nog 5,5 miljoen m³ gesuppleerd op de buitendelta (Hoofdstuk 4). Gecorrigeerd voor suppleties, betekent dit een netto volumetoename van ruim 5 miljoen m³ voor de periode 2005-2021.

Gebieden met grote erosie zijn de eilandstaart van Terschelling [5,8], het Westgat en de ebscharen [9,11]. Ook het zeewaartse deel van het Bornrif platform vertoont erosie. De totale erosie van de Boschplaat [5,8] bedraagt 12,4 miljoen m³. Een deel van dit materiaal is oostelijk van de Boschplaat afgezet in het ondiepe gebied van de Boschplaat, De Zeehondeplaat [10]. Dit ondiepe gebied tussen de Boschplaat en het Borndiep neemt met 8,3 miljoen m³ in sedimentvolume toe. Aanzanding is ook zichtbaar op de ebschilden [6,7] waar het volume met 11,6 miljoen m³ en 8,7 miljoen m³ toeneemt. Een deel van de volumetoename van polygoon 6 is gerelateerd aan de pilotsuppletie. Daarnaast speelt de 17,3 miljoen m³ erosie van de ebscharen [11] een rol in het sedimentaanbod. Het zeewaartse deel van het Bornrif platform erodeert. In polygoon 13 treedt 13,7 miljoen m³ erosie op. Het geërodeerde sediment wordt landwaarts verplaatst waar het bijdraagt aan de grote aanzanding net ten noorden van de Bornrif Strandhaak. In polygoon 15 treedt 19,8 miljoen aan aanzanding op. Een tweede gebied met grote aanzanding is gelegen aan de westzijde van het Bornrif platform. Door invulling van de geulrand van het Akkepollegat treedt er 23,1 miljoen m³ aan aanzanding op (zie [14]). De vorming van een nieuwe westelijk gerichte uitstroombgeul de buitendelta op heeft waarschijnlijk een belangrijke rol in deze aanzanding. Een klein gebiedje van aanzanding is zichtbaar op de noordelijke rand van de buitendelta. In deelpolygoon 12 is het volume met 3,5 miljoen m³ toegenomen. Deze aanzanding vond plaats tijdens de oostelijke rotatie van het Akkepollegat. Tijdens deze rotatie vormden Borndiep en het Akkepollegat tijdelijk een vrijwel rechte uitstroombgeul. Deze geul was dan zeer efficiënt, waardoor de geul zich ver zeewaarts doorzette en er sediment naar de rand van de buitendelta werd doorgevoerd (Figuur 3-7). Met doorgaande rotatie van het Akkepollegat en het opdringen van de ebschilden werd de geul minder efficiënt. Het sediment op de rand van de buitendelta ligt nu eigenlijk buiten het actieve deel van de buitendelta. Alleen grote golven, tijdens stormcondities, zijn in staat dit sediment te herverdelen waardoor het lange tijd aanwezig kan zijn. Eigenlijk speelt hier een soortgelijk proces als op de buitendeltasuppletie. Deze suppletie vervormt eerst snel tijdens stormcondities, waardoor deze dieper komt te liggen. Er zijn dan steeds grotere golven nodig om het overgebleven sediment te mobiliseren.

Een klein deel van de buitendelta, de zeewaartse rand, is in 2018 en 2019 halfjaarlijks opgenomen. Elias et al. (2021) laten zien dat de invulling van het zeewaartse deel van het Akkepollegat [14] treedt voornamelijk op tijdens winter condities. De netto sedimentatie tijdens de wintermaanden ligt op 2-2,2 miljoen m³. De sedimentatie tijdens de zomermaanden is met 0,2-0,7 miljoen m³ aanzienlijk kleiner. Op basis van deze waarnemingen is het waarschijnlijk dat de grotere golven in de winterperiode meer sediment landwaarts verplaatsen dan tijdens de kalme zomerperiode. Een soortgelijke, maar tegenovergestelde respons is zichtbaar op het Bornrif platform. Hier is de (golf-gedreven) erosie tijdens wintermaanden met 1,0–1,4 miljoen m³ veel groter dan de erosie van 0,2-0,3 miljoen m³

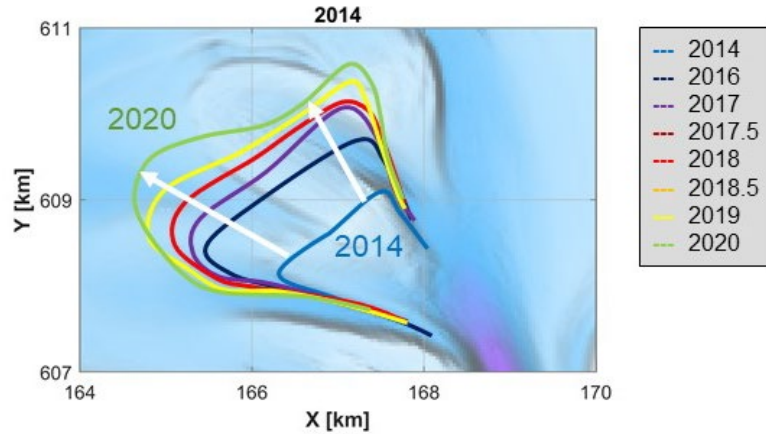
tijdens de zomermaanden. Deze sterke respons op de hogere golven die optreden gedurende het winterseizoen is ook zichtbaar in de erosie van de pilotsuppletie (zie Hoofdstuk 5).



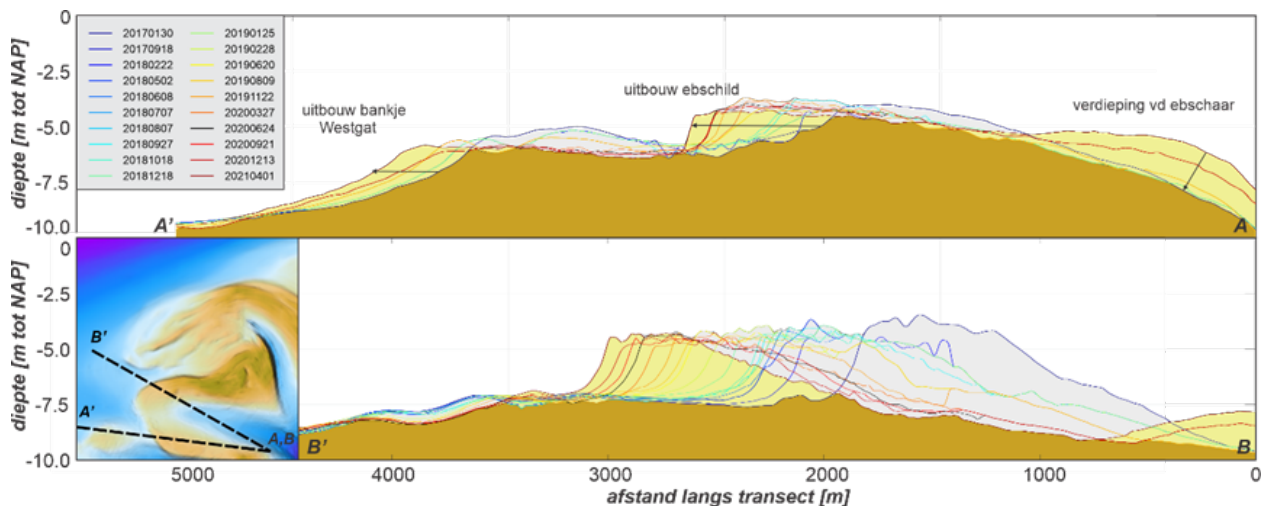
Figuur 3-9: Een samenvatting van de sedimentatie-erosiepatronen en volumeveranderingen tussen 2005 en 2021. (a). Verandering van de bodemhoogte. De polygoenen geven de morfologische gebieden aan (individuele sedimentatie en erosiegebieden) gebruikt voor de berekening van de volumeveranderingen. Bij de eilanden is de gemiddeld hoogwaterlijn gebruikt als begrenzing. (b) Tijdsreeks van volumeverandering van geaggregeerde gebieden zoals weergegeven in de tabel. De grijze vlakken geven de suppleties aan die hier zijn uitgevoerd langs de kust en op de buitendelta. (c) Overzicht van de jaarlijkse bruto sedimentatie (oranje) en erosievolumes (blauw) voor de gehele buitendelta. Gele blokken geeft de netto verandering weer.

3.5.3 Ontwikkeling van de ebschilden in detail

Een belangrijk onderdeel van de morfologische veranderingen op de buitendelta zijn de vorming en groei van de ebschaar en -schild systemen. Het landwaartse ebschild vormde rond 2014 en groeit dan snel in omvang (Figuur 3-7 en Figuur 3-10). De zeewaartse verplaatsing wordt geschat op 260 m/jaar (Lambregts, 2021). Het ebschild vertoont een duidelijk asymmetrie. Het merendeel van het ebschildvolume bevindt zich aan de noord-noordoostzijde van de ebschaar. Deze asymmetrie wordt mede veroorzaakt doordat het ebschild verbinding maakt met de zuidzijde van het meer zeewaarts gelegen ebschild waardoor een gezamenlijke bank wordt gevormd.



Figuur 3-10: Een schematische weergave van de groei van het meest landwaarts gelegen ebschild tussen 2014-2020. Bron: Lambregts (2021).

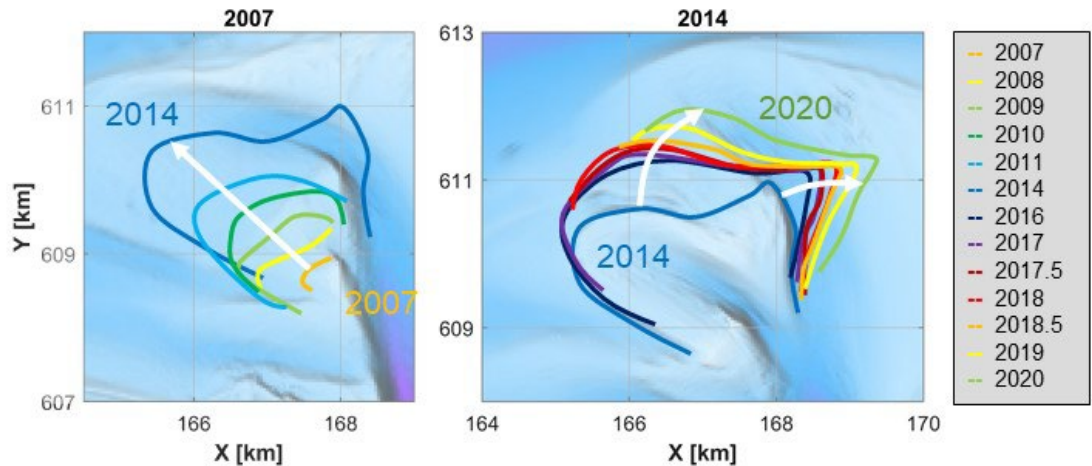


Figuur 3-11: Ontwikkeling van twee dwarsprofielen getrokken door het nieuwe Westgat en het westelijke deel van het landwaartse ebschild (ebschild 2).

De dwarsprofielen weergegeven in Figuur 3-11 geven een gedetailleerd beeld van de zeewaartse groei van de ebschaar en het ebschild. De dwarsdoorsnede laat zien dat de bank een evenwichtshoogte bereikt rond de -4 m NAP. De uitgroei van het ebschild lijkt zich over de gehele periode door te zetten. Een effect van de pilotsuppletie lijkt hierin niet direct op te treden, wel verloopt de verplaatsing sinds 2019 veel gelijkmatiger, dan in de periode ervoor (Lambregts, 2021). De gemiddelde uitbouwsnelheid van het ebschild ter hoogte van raai A-A' stabiliseert. In de periode 30-01-2017 – 24-06-2019 vertoont de uitbouwsnelheid grotere fluctuaties. In de wintermaanden ligt de snelheid tussen de 35 en 50 m/maand, terwijl in de zomermaanden de uitbouw reduceert tot minder dan 10 m/maand. Na de zomer van 2019 ligt de uitbouwsnelheid stabiel tussen de 15 en 20 m/maand. Het is mogelijk dat golfafscherming door het toegenomen volume van de zeewaarts gelegen banken (incl. de suppletie) hier een rol in speelt, maar waarschijnlijk is de ontwikkeling van de ebschaar hierin maatgevend. De

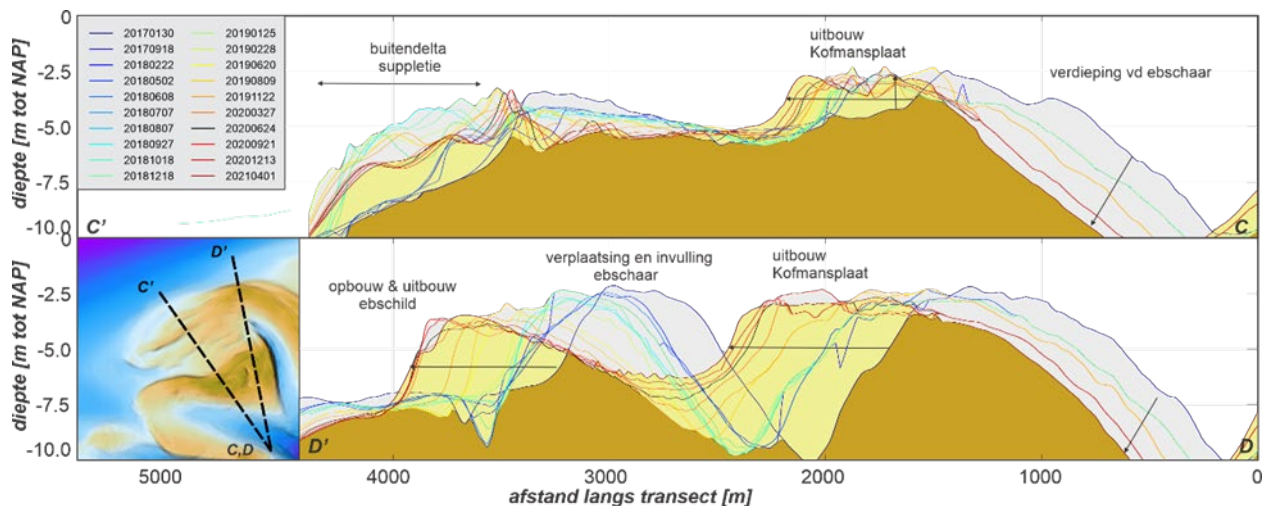
abschaar neemt rond 2019 de rol als dominante uitstroomegul van het Bordiep over van het Akkepollegat. Het is mogelijk dat het getij dan veel belangrijker wordt t.o.v. de golven, waardoor de morfodynamiek van het systeem stabiliseert.

De ontwikkeling van het zeewaarts gelegen ebschild (de Kofmansplaat) wordt weergegeven in Figuur 3-12 en Figuur 3-13. De vorming van dit systeem bestaat eigenlijk uit twee delen. Tussen 2006 en 2010 ontstaat een klein ebschaar- en schild systeem dat zich langs de westelijke rand van het Akkepollegat zeewaarts beweegt (Figuur 3-7). Dit systeem wordt opgenomen in een tweede ebschild en -schaar systeem dat zich in 2007 vormde. Dit systeem groeide snel uit, met een snelheid van gemiddeld 385 m/jaar tussen 2007 en 2014 (Figuur 3-12). De migratie van het ebschild stagneerde rond 2016 (Figuur 3-12), waarna er vooral een rotatie en oostelijke verplaatsing optreedt. Deze verplaatsing zorgt ervoor dat het Akkepollegat ook oostelijk verplaatst.



Figuur 3-12: Een schematische weergave van de groei van het meest zeewaarts gelegen ebschild (de Kofmansplaat) tussen 2007-2014 (links) en 2014-2020 (rechts). Bron: Lambregts (2021).

De stagnatie van de groei van het ebschild- en schaarsysteem is belangrijk voor de pilotsuppletie. De suppletie is tegen de noordrand van de het ebschild aangelegd (Figuur 3-13 en H4). Had het systeem zich nog steeds zeewaarts uitgebreid dan hadden de getijgedreven processen de suppletie waarschijnlijk snel opgeruimd en het sediment herverdeeld in het ebschild. Door de stabilisatie van de ebschaar speelt getij een veel kleinere rol en wordt het gedrag van de suppletie vooral door golfgedreven processen gedomineerd. De suppletie blijft dan ook lang, als ondiep platform, zichtbaar in de bodem.



Figuur 3-13: Ontwikkeling van twee dwarsprofielen getrokken door het nieuwe Westgat en het noordelijke deel van ebschild (ebschild 1).

3.5.4 Een conceptueel model van de werking van de buitendelta

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat de combinatie van procesmetingen en gedetailleerde, hoogfrequente bodemopnamen, het mogelijk maakt de morfodynamiek van de buitendelta van het Zeegat van Ameland beter te beschrijven. Op basis van de verkregen inzichten is de buitendelta in te delen in verschillende zones, waarin het gedrag of de onderliggende processen verschillen (Figuur 3-14). Dit concept beschrijft de werking van de buitendelta op schaalniveau 2 van de schaalcascade (Figuur 3-1).

Zone I – Eilandkust bovenstrooms (Terschelling); Hier vormt het langtransport en de erosie van de staart van het eiland een bron van zand voor het zeegat. Zowel getij als golven spelen hier een rol. Golfbreking en golfgedreven transporten zijn belangrijk langs de eilandkust. Met een dominante oostelijk gerichte golfenergie zijn deze transporten ook oostelijk gericht. Richting het zeegat wordt het oostelijk transport versterkt door de vloeddominante getijstrooming. Deze transporten voeden het ondiepe platform (zone II).

Zone II – Ondiepe platform van het Boschgat; Tussen de staart van Terschelling, de Boschplaat, en de hoofdgeul Borndiep bevindt zich een ondiep platform, doorsneden door verschillende kleine geultjes, gescheiden door kleine banken. Deze geultjes en banken vertonen een grote variabiliteit, maar het onderliggende platform is min of meer stabiel. De eb- en vloedstroming verplaatsen bruto veel zand tussen bekken en buitendelta, met een netto oostwaartse component richting het Borndiep. Deze oostelijke netto component wordt waarschijnlijk ten dele veroorzaakt door de relatief diepe, voorliggende buitendelta. Hierdoor breken veel golven op het ondiepe platform. Zodra het zand het Borndiep bereikt, wordt het naar de buitendelta of het oostelijke deel van het bekken getransporteerd, maar niet terug richting de Boschplaat. Dit betekent dat er een structureel verlies optreedt. Zolang dit verlies groter is dan de aanvoer vanaf de kustzone, zal Boschplaat eroderen.

Zone III – Ebscharen en ebschilden; De westelijke zijde van de buitendelta is een accumulatiezone van sediment. De hoofdgeul in de zeegaten van de Waddenzee heeft in essentie dominante, westelijk gerichte uitstroming (Sha, 1989). De ebstroming zorgt voor een toevoer van sediment en er worden (mesoschaal) banken gevormd. Deze banken kunnen verschillende vormen hebben. Vanaf 2005 zijn deze banken zichtbaar in de vorm van twee ebscharen met bijbehorende ebschilden. Deze systemen domineren sindsdien een belangrijk deel van de buitendelta morfodynamiek. De groei en zeewaartse uitbouw van deze twee systemen heeft uiteindelijk de hoofdgeul (Akkepollegat) verdrongen en op deze locatie zal zich waarschijnlijk in de nabije toekomst een nieuwe, meer westelijk gerichte ebgeul ontwikkelen. Met deze nieuwe hoofdgeul zal de dynamiek van de buitendelta op mesoschaal waarschijnlijk verschillen van de ontwikkelingen die in de periode 2005-2019 zijn opgetreden.

Zone IV – Rand van de buitendelta; De rand van de buitendelta is op zich geen apart morfologisch onderdeel, maar de processen zijn hier wel anders. Veranderingen aan de buitenkant doen zich vooral voor tijdens stormcondities. Het merendeel van de tijd kan door de ebstroom aangevoerd sediment bezinken op de zeewaartse zijde van de ebschilden, als gevolg van de relatief lage golven. Tijdens (winter)stormen breken de golven op deze relatief ondiepe banken. De banken worden geërodeerd en het vrijkomende zand verplaatst zich als een zandpuls naar het oosten, richting het Bornrif platform. Na een storm is de buitendeltarand dan inactief omdat hij te diep ligt voor normale condities. Het dominante transport is dan waarschijnlijk gerelateerd aan de open zee getijstrooming die langs de rand van de buitendelta versnelt. Door de vorming van de ebschilden vindt er wel veel plaatopbouw plaats in de ebschilden maar de aanvoer naar de buitendeltarand is beperkt. NB. Zone IV is de zone waarin de pilotsuppletie Amelander Zeegat is aangelegd.

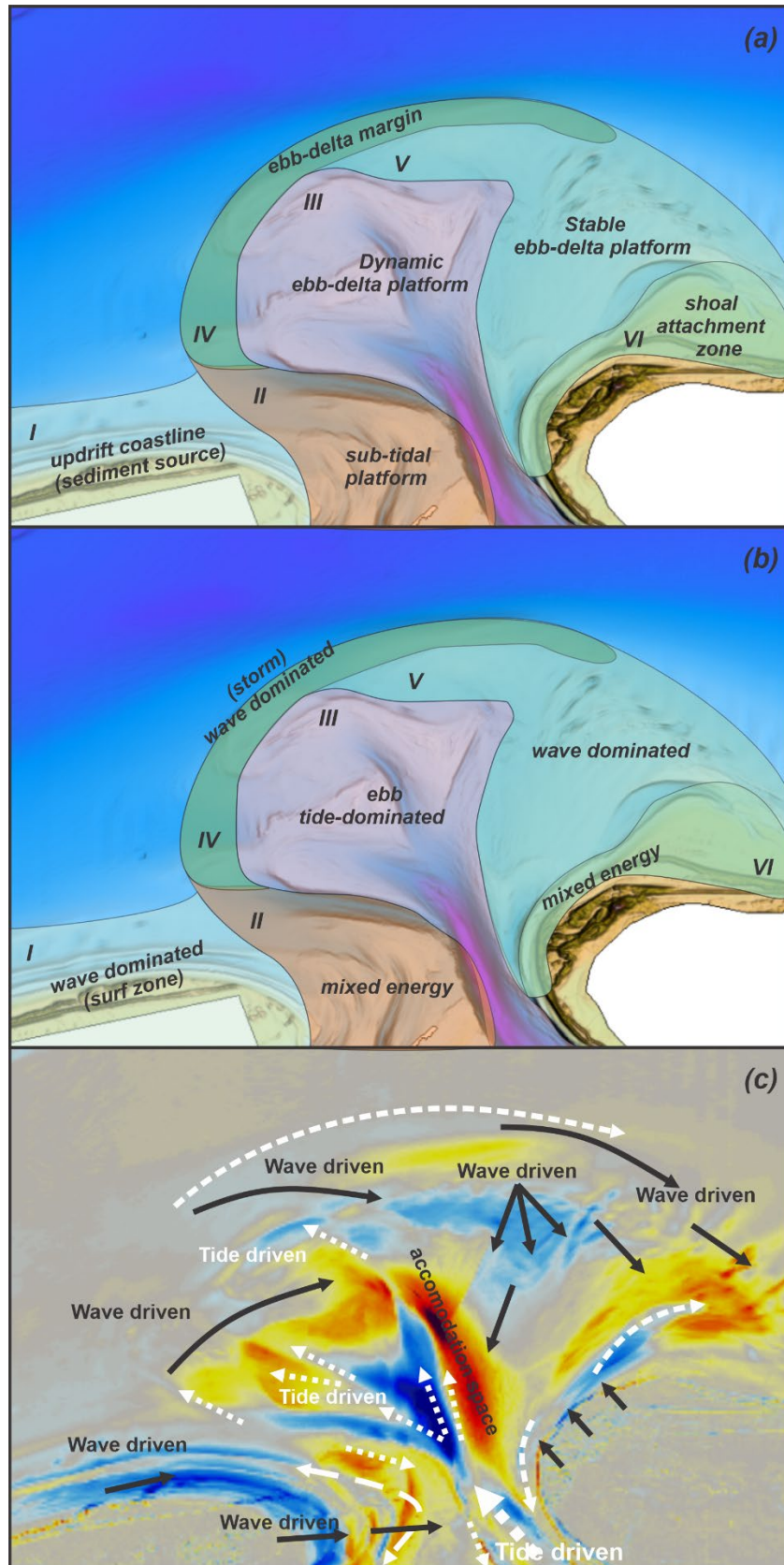
Zone V – Buitendeltaplatform (Bornrif); Het dominante zandvolume bevindt zich stroomafwaarts van de hoofdebgeul, op het Bornrif. Met een zeewaarts gericht Akkepollegat

wordt er sediment aan de noordkant van de buitendelta afgezet en wordt dit platform rechtstreeks gevoed door de hoofdegeul. Sediment dat aan de zeezijde wordt afgezet, wordt door de golfgedreven transporten het Bornrif op getransporteerd. Op het Bornrif verplaatst dit sediment zich landwaarts tot het bij de kust banken gaat vormen. Zodra deze banken groot genoeg zijn, een proces dat vele jaren kan duren, kunnen ze verhelen met de kust (bijv. de aanlanding van de Bornrif Strandhaak). Deze ontwikkeling is sinds 2005 slechts beperkt waar te nemen. In de periode 2005-2019 verliest het Akkepollegat in toenemende mate zijn stroomvoerende en sediment transporterende functie waardoor de voeding van het Bornrif platform afneemt. Sediment accumuleert nu vooral in de ebschilden aan de westzijde van de buitendelta. Vanaf deze ebschilden vindt er een golfgedreven transport plaats richting het Bornrif. Het is echter waarschijnlijk dat de toekomstige ontwikkeling van het Bornrif door de verplaatsing van de ebschilden zal worden gedomineerd. Zodra Akkepollegat zich verlegt naar het westen, worden de ebschilden onderdeel van het benedenstroomse platform en dus onderdeel van het Bornrif. Gezien de grootte van de ebschilden is het mogelijk dat deze niet volledig dissiperen en opgaan in het Bornrifplatform, maar zich als autonome bank over het platform richting kust gaan verplaatsen (vorming van een nieuwe aanlandingsbank).

Zone VI – Aanlandingsgebied van banken; De noordwestzijde van Ameland is het aanlandingsgebied van de buitendeltabanken. Dit gebied groeit stapsgewijs aan. Door aanlanding van een bank (bijv. Bornrif Strandhaak) bouwt de kust instantaan zeewaarts uit. Daarna begint er een periode van langdurige (jaren tot decennia) erosie. De erosie is vaak maximaal vlak voor aanlanding van de bank omdat er dan een geul tussen de bank en de kust vormt. Deze geul zorgt tijdelijk voor extra kusterosie.

Alhoewel de eilandkop door aanlandende banken in zijn geheel in volume toeneemt zijn er wel gebieden te onderscheiden die structureel eroderen of aanzanden. Nabij de eilandkop versnelt de stroming om de kop van het eiland. Het voorliggende Bornrif is hier vrij diep waardoor golven – die over het Bornrif richting de kust migreren - nog steeds een belangrijke rol spelen in de sedimenttransportprocessen. Tussen het Borndiep en de Bornrif strandhaak bevindt zich een zone met structurele erosie. Deze erosie wordt veroorzaakt door een divergentiepunt in de transporten en grote transporten langs de kust richting het Borndiep. Door het Borndiep wordt dit sediment dan effectief weggevoerd naar de randen van de buitendelta vindt er structurele erosie van de eilandkop plaats. Alleen een aanlanding direct op de eilandkop kan deze structurele terugtrekking een halte toe roepen.

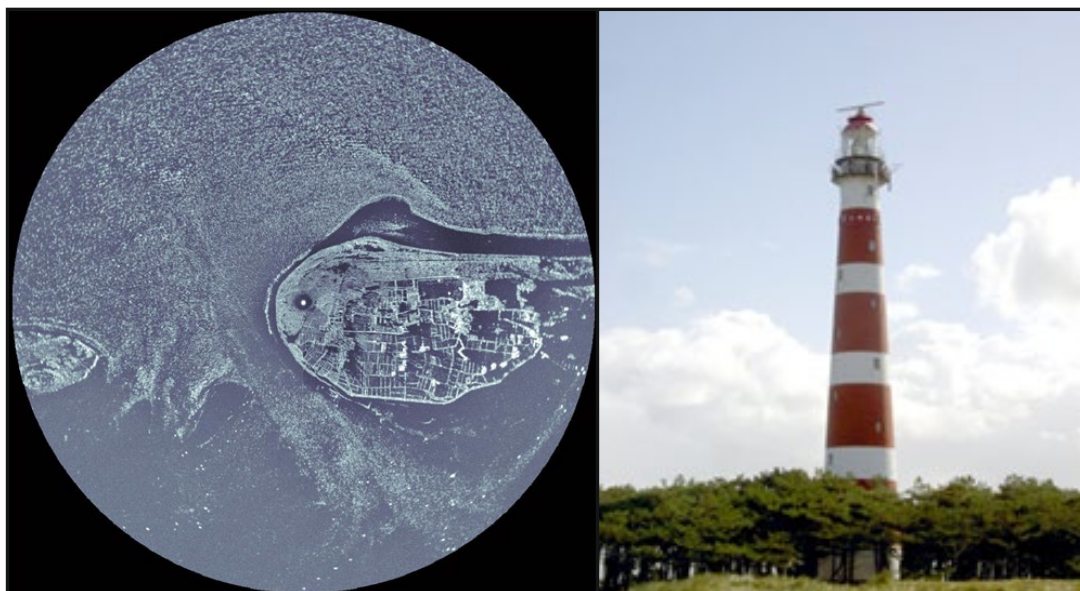
Ten oosten van de eilandkop hebben recentelijk de aanlandingen van de Bornrif Strandhaak en Bornrif Bankje plaatsgevonden. De kust is hier dan ook sterk uitgebouwd, maar vertoont wel een maximale erosie door contractie van de getijstrooming rond de kop van de strandhaak. Deze contractie zorgt voor grote stroomsnelheden en transporten, maar zorgt er ook voor dat het Bornrif Bankje oostwaarts geduwd wordt. De aanlanding van het Bankje vindt dan ook aan de oostzijde van de Bornrif strandhaak plaats. De kustlijn van Ameland, ten oosten van de buitendelta, wordt gevoed door het geërodeerde sediment. Dit geeft lokaal een uitbouw van de kust. Uit de grote zandsuppleties op het centrale deel van Ameland blijkt dat deze aanvoer van sediment niet voldoende is om de kustlijn te handhaven.



Figuur 3-14: Een conceptuele beschrijving van de werking van de buitendelta van het zeegat van Ameland. (a) onderverdeling in 6 grootschalige gebieden, (b) weergave van de dominante processen per deelgebied en (c) weergave van de transportmechanismen en indicatie van transportrichtingen. .

3.6 Innovatieve monitoring

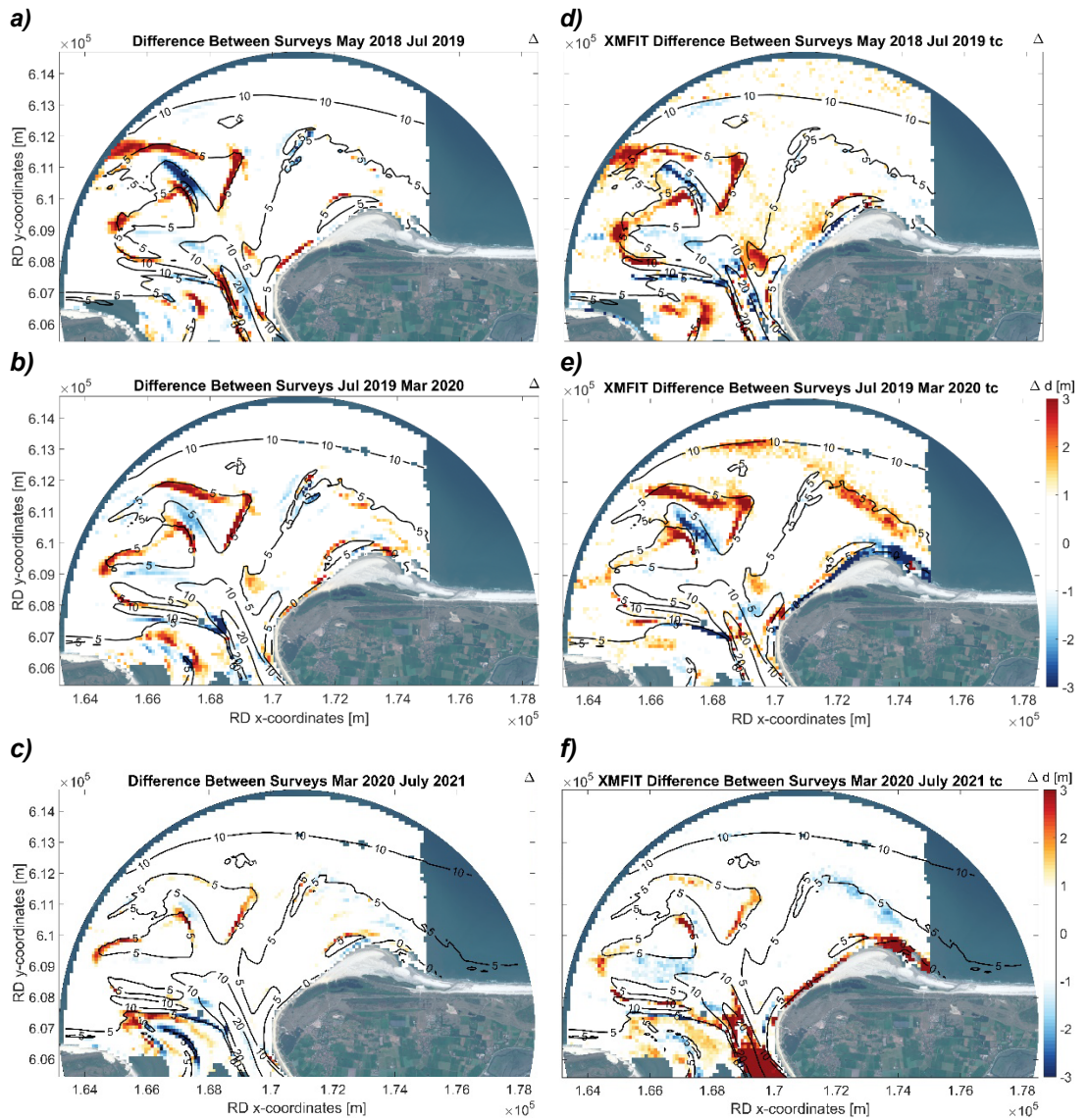
Op de vuurtoren van Ameland draait een navigatieradar (Figuur 3-15). De metingen van deze X-Band radar zijn naast navigatie ook bruikbaar om morfologische en hydrodynamische data te genereren en vervolgens te analyseren. Binnen het kader van Kustgenese 2.0 is medio 2017 een operationeel systeem opgezet waarbij radarbeelden (XBand-radar) van het Amelander zeegat lokaal worden verwerkt om een schatting te maken van de bodemligging in het gebied. De zogenaamde diepte inversie, waarbij een opeenvolgend blok van radarbeelden (een zogenaamde “stack”) wordt vertaald naar een waterdiepte, wordt gedaan aan de hand van een algoritme genaamd ‘XMFit’ (Gawehn et al. 2020).



Figuur 3-15: Een voorbeeld van de radar date (links) en de vuurtoren van Ameland met daarboven op de radar (rechts).

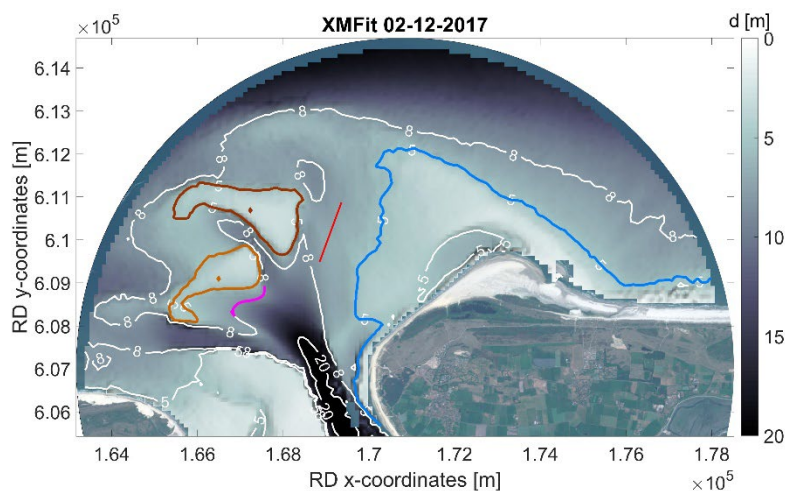
Een voordeel van radarmetingen is dat het systeem continue draait hierdoor kan een hoogfrequente tijdsresolutie (ca. één schatting per uur) van bodemopnamen worden bereikt. Sinds September 2017 zijn er ongeveer 29.000 schattingen van de bodemligging geproduceerd (Gawehn, 2020; 2021). In Appendix B, Figuur B-5 wordt een voorbeeld gegeven van zo'n bodem.

Een vergelijking tussen de gemeten en berekende morfologische veranderingen tussen mei 2018 en juli 2021 worden weergegeven in Figuur 3-16. Deze vergelijking laat zien dat de radar een goede representatie van de metingen geeft. Overschatting van de bodemverandering aan de noordoostzijde van de buitendelta is het gevolg van de XMFit codeverbeteringen. De ruimtelijk gemiddelde bias in bodemhoogteligging die voorheen rond $\Delta d = -1$ m is nu sterk verbeterd $\Delta d \rightarrow 0$ m. De diepte fout in de radar metingen ligt nu voor het overgrote deel binnen ± 1 m. De XMFit resultaten reproduceren de algehele trend van noordoostelijke rotatie van het zeewaartse ebschaar en -schild systeem en de noordoostelijke verplaatsing van dit ebschild (de Kofmansplaat). De totale verplaatsingen van de verschillende buitendelta elementen tussen dec 2017 en dec 2021 in de radar metingen zijn weergegeven in Figuur 3-17. Onder andere de noord en noordoostelijke verplaatsingen van banken van het ebschaar en -schild systeem kunnen worden getraceerd en gekwantificeerd op 700-800 m in 4 jaar tijd. De kloksgewijze rotatie van het Akkepollegat en het Bornrif worden inzichtelijk als ook details, zoals de aanzanding van een bankje aan de zuidpunt van het Bornrif, maar ook de recente plaatsing en zuidwaartse verplaatsing van suppletiezand aan de kop van Ameland. Deze suppletie is volgens de radar met 900-1200 m langs de kop van Ameland naar het zuiden verplaatst (Gawehn, 2021).

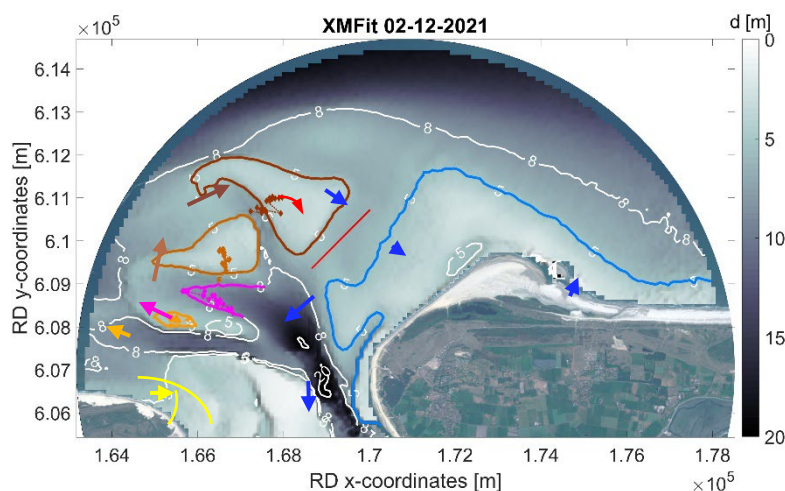


Figuur 3-16: Verschilkaarten tussen de periodes mei 2018 - juli 2019, juli 2019 - maart 2020 en maart 2020-juli2021 volgens (a,b,c) de vaklodingen en (c,d,e) de geschatte XMFit bodems. Rood geeft sedimentatie aan en blauw geeft erosie aan. Contourlijnen geven de gemeten bodem weer volgens vaklodingen van a, d) juli 2019, b,e) maart 2020 en c,f) juli 2021 (bron: Gawehn 2021).

a)



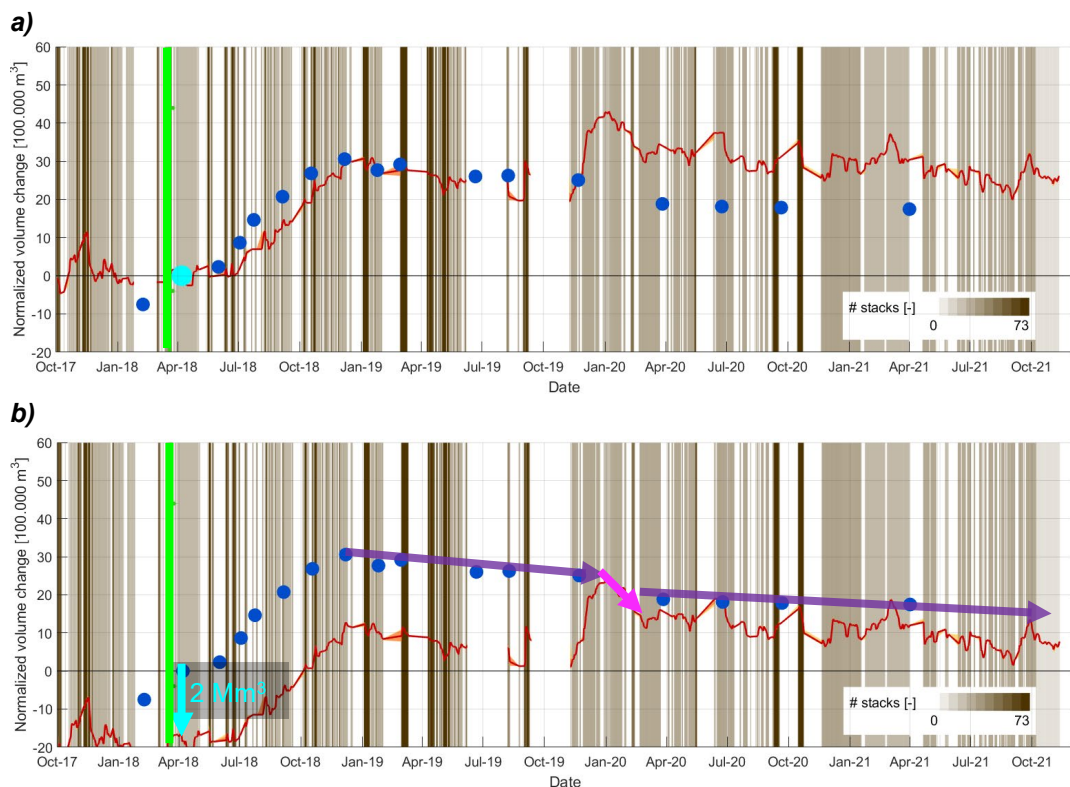
b)



Figuur 3-17: Geschatte bodems uit radargegevens volgens kleurenschaal van a) dec 2017 en b) dec 2021. Contourlijnen voor 5 m en 8 m diepte zijn toegevoegd. Deze dieptecontouren zijn gebruikt om buitendelta elementen van elkaar te onderscheiden. De 5 m dieptecontour definieert drie zandbanken, de zandbank ten zuiden van de westelijke ebgeul (kort: zuidelijk bankje, oranje), de zandbank ten noorden daarvan (kort: middelste bankje, licht bruin), de bovenkant van de Kofmansplaat (kort: noordelijk bankje, donker bruin). Diamantjes geven de posities van de zwaartepunten van elk bankje weer om de verplaatsingen daarvan te kunnen volgen in de tijd. De blauwe contourlijn definieert het Bornrif. De uitbouw van de westelijke ebgeul wordt getraceerd met behulp van de punt (magenta diamantje) in de lokale 8 m dieptecontour (magenta). De oriëntatie van het Akkepollegat wordt gevolgd door de middenlijn tussen Kofmansplaat en Bornrif (rode lijn), als proxy voor de buitendelta rotatie. In de meest recente bodem van dec 2021, b), traceren gele lijntjes de kleine vloedgeulen langs Terschelling. Pijltjes schetsen de totale verplaatsingen sinds dec 2017.

De eerste schattingen van de volumeveranderingen in het gebied van de buitendeltasuppletie lieten zien dat deze 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 multibeam metingen. Wel was er in deze eerste schatting een diepte bias aanwezig waardoor er een volumeverschil van 2 miljoen m³ in het suppletiegebied optrad. Door verbeteringen in de XMFit code zijn de volumeschattingen verder verbeterd (Gawehn et al., 2021 en b). De berekeningen van volumes uit radar resultaten in het suppletiegebied geven nu een accuraat beeld van de volumeverandering en ook een accurate weergave van de absolute hoeveelheid.

Tussen 9.-16. februari 2020 kwamen twee sterke winterstormen “Ciara” en “Dennis” over Nederland heen. Door de hoge golven van respectievelijk $H_s > 6.5\text{m}$ en $H_s > 5.5\text{m}$ verliest het geobserveerde gebied binnen korte tijd $\sim 750.000\text{ m}^3$ (Figuur 3-18b, magenta pijl). Daarna zet het geleidelijke volume verlies van vóór de stormen voort. Het laat zien dat sterke stormen tot grote volumeverliezen leiden, maar het laat ook zien dat zand uit het suppletiegebied verplaatst bij gemiddelde hydrodynamische condities. De volumeontwikkelingen in het suppletie gebied zijn met de radar te herkennen (Figuur 3-18b; rode lijn). De trendbreuk door Ciara en Dennis is omgeven door algemene fluctuaties van de volumeberekeningen. De daling lijkt wel geleidelijker te verlopen dan de omgevende fluctuaties.



Figuur 3-18: Volumeveranderingen in het suppletiegebied volgens radar (rode lijn) en volgens multibeam metingen (blauwe punten). De groene lijn geeft aan wanneer de uitvoering van de suppletie is begonnen. De dichtheid van de radar resultaten wordt weergegeven in grijsstinten volgens de legenda. De resultaten zijn gefilterd met behulp van een Kalman filter met procesvariantie $Q = 0.01\text{ [m}^2/\text{d]}$. a) Alle schattingen zijn genormaliseerd (nullijn) naar de 2e multibeam meting (zie turquoise punt). De normalisatie representeert een absoluut volume verschil van 2 miljoen m^3 tussen de multibeam metingen en de XBand-radar schattingen (zie ook Gawehn et al., 2020). b) De radar schattingen zijn niet genormaliseerd. Daardoor schuift de rode lijn met 2 miljoen m^3 omlaag (turquoise pijl). De paarse pijlen laten een vrij (lineaire) afname van het suppletie volume zien, echter treedt er een trendbreuk op van versterkte erosie begin feb 2020 (magenta pijl) door de impact van stormen “Ciara” en “Dennis” (bron: Gawehn 2021).

4 De pilotsuppletie in het Amelanders Zeegat

4.1 Inleiding

In opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, heeft Rijkswaterstaat een pilotsuppletie uitgevoerd op de buitendelta van het Zeegat van Ameland. Deze buitendeltasuppletie is onderdeel van Kustgenese 2.0 en is een pilot met als doel om de kennis omtrent het buitendelta systeem te vergroten en beter zicht te krijgen op de uitvoerbaarheid en vergunbaarheid van buitendeltasuppleties. Voor aanvang van het project zijn als doelstellingen neergezet (Ebbens, 2019):

1. Vergroten van systeemkennis over zeegatsystemen:
 - a. Morfologische kennis zeegatsystemen verder ontwikkelen:
 - i. Op welke wijze kan volumebehoud binnen de buitendelta verwezenlijkt worden?
 - ii. kan het sediment importerend vermogen (positief) beïnvloed worden?;
 - b. Kennis omtrent het effect op natuurwaarden in buitendelta's vergroten en Inzicht krijgen in kansen en bedreigingen voor natuur voor zowel habitats als soorten in Waddenzee en Noordzeekustzone;
2. Inzicht verkrijgen in ontwerp en haalbaarheid van buitendeltasuppleties ter onderbouwing van het advies van het programma Kustgenese 2.0 over de lange termijn zandsuppletie strategie:
 - a. Leren van uitvoerbaarheid en vergunbaarheid van buitendeltasuppleties;
 - b. Inzicht in kansen en bedreigingen van buitendeltasuppleties voor gebruiksfuncties;
 - c. Inzicht in draagvlak voor buitendeltasuppleties bij betrokken stakeholders;
3. Bijdragen aan versterken van het kustfundament conform beleid uit de derde kustnota;
4. Vergroten van de zichtbaarheid van onderzoeksprogramma Kustgenese 2.0 om daarmee kennisuitwisseling te bevorderen

Daarnaast zijn een aantal hypothesen geformuleerd. Voor de morfologie zijn deze:

1. Het zand van de pilotsuppletie zal zich vooral verspreiden door golfgedreven transport en in mindere mate door getijwerking.
2. Ter hoogte van de locatie van de pilotsuppletie is voldoende dynamiek aanwezig om van de suppletie te kunnen leren;
3. De vorming van de ebgeul (over ebschild) wordt versterkt door de pilotsuppletie.

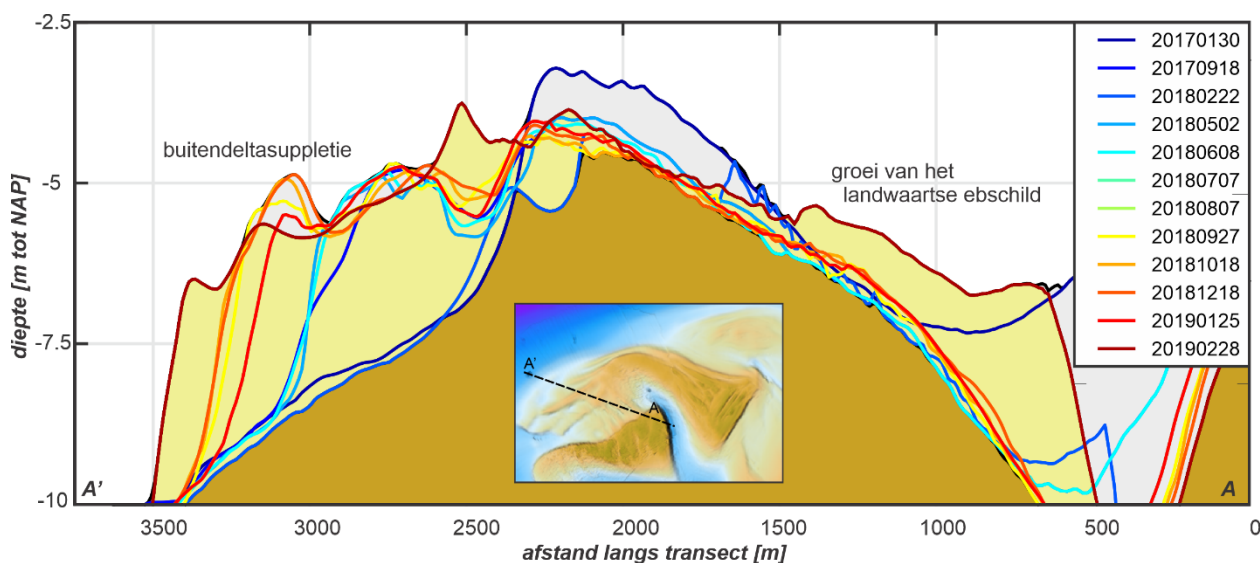
De suppletie is 22 februari 2019 afgerond, maar de monitoringsactiviteiten zijn voortgezet tot 2021. Een eerste integrale evaluatie van de pilotsuppletie is uitgevoerd door Ebbens (2019). Op basis van de initiële respons konden al een aantal belangrijke conclusies worden getrokken. Zo kan geconcludeerd worden dat deze suppletie uitvoerbaar en vergunbaar is. De morfologische respons van de buitendelta na suppletie kon, kort na aanleg, nog niet worden geëvalueerd. Met doorgaande bodemmetingen zijn er nu voldoende lange meetseries beschikbaar zodat deze analyse wel mogelijk wordt. De analyses uitgevoerd in dit hoofdstuk richten zich dan ook op de morfologische veranderingen tijdens en na aanleg van de suppletie. Deze analyses dienen als basis voor de beantwoording van de doelstellingen en toetsing van de gestelde hypothesen.

4.2 Aanleg van de suppletie

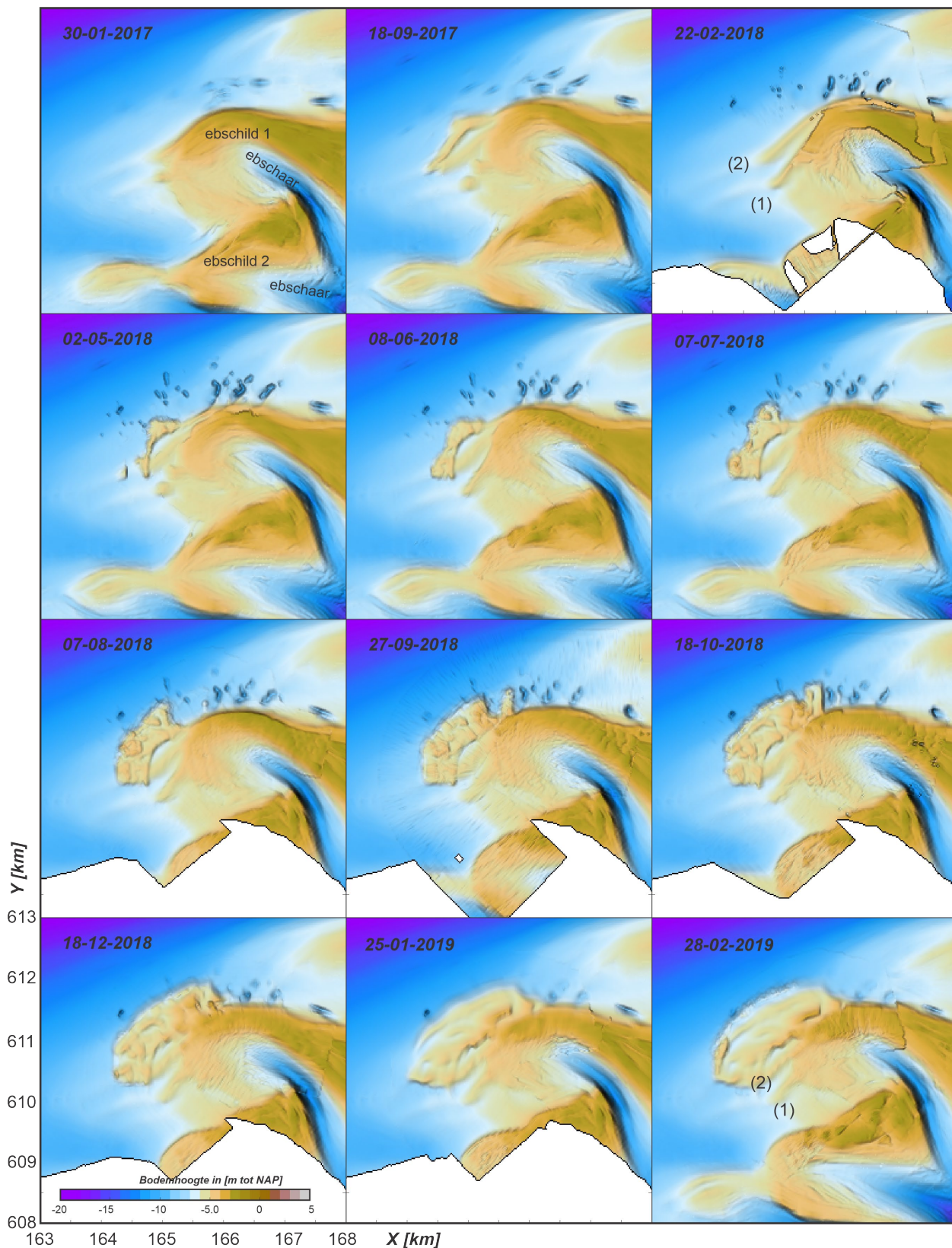
De pilotsuppletie is aangelegd in de periode tussen maart 2018 en februari 2019. In totaal is er bijna 5,5 miljoen m³ zand geplaatst op de Kofmansbult (Figuur 4-2). Een uitgebreide beschrijving van deze aanleg wordt gegeven in van Rhijn (2019).

De bodemopnamen opgenomen tussen van 30-01-2017 en 22-02-2018 (Figuur 4-1 en Figuur 4-2) geven een goed beeld van de geulen-plaat systemen die voor aanleg van de suppletie al aanwezig zijn op de Kofmansbult. Deze plaat-geul systemen zijn in de periode 2005-2017 gevormd (zie Hoofdstuk 2.4). Aan de zeezijde van het ebschild 1 (de Kofmansplaat) zijn periodiek grote banken aanwezig. Deze banken zijn aangeduid met (1) en (2) in de 22-02-2018 opname. De suppletie is gedeeltelijk op en tegen bank (2) aangelegd, aan de noord-noordwestzijde van de Kofmansplaat (zie opnamen 02-05-2018 – 28-02-2019). Tussen de suppletie en de Kofmansplaat zit nog een kleine trog. Deze trog wordt al tijdens het aanbrengen van de suppletie opgevuld, doordat de natuurlijke processen (getij en golven) het suppletie materiaal verspreiden. Van Rhijn (2019) geeft aan dat de suppletie ontworpen is met een in-situ volume van 5 miljoen m³ sediment. Ter compensatie van verliezen wordt er iets meer sediment gebaggerd uit het onttrekkingsvlak. Het totale gebaggerde volume is 5,75 miljoen m³. Van Rhijn (2019) berekent op basis van de bodemveranderingen dat er 5,45 miljoen m³ geplaatst is in en rond het suppletiegebied. Het merendeel 4,85 miljoen m³ bevindt zich in de ontwerppolygoon, terwijl er zich nog 0,6 miljoen m³ bevindt in de trog tussen buitendelta en de bank.

In de 28-02-2019 bodem (Figuur 4-2) is de suppletie dan volledig aangebracht. Er is nu een ondiep platform aan de noordwestzijde van de Kofmansplaat zichtbaar. Deze opname laat ook al goed zien dat de suppletie niet een vlak en uniform platform is. Al tijdens de aanleg vervormt de suppletie en beginnen er terug grote banken te ontstaan.



Figuur 4-1 Dwarsdoorsnede getrokken over de pilotsuppletie met bodemontwikkeling tijdens aanleg (22-02-2018 - 09-08-2019). Zie Appendix B.2 voor geselecteerde dwarsdoorsneden.

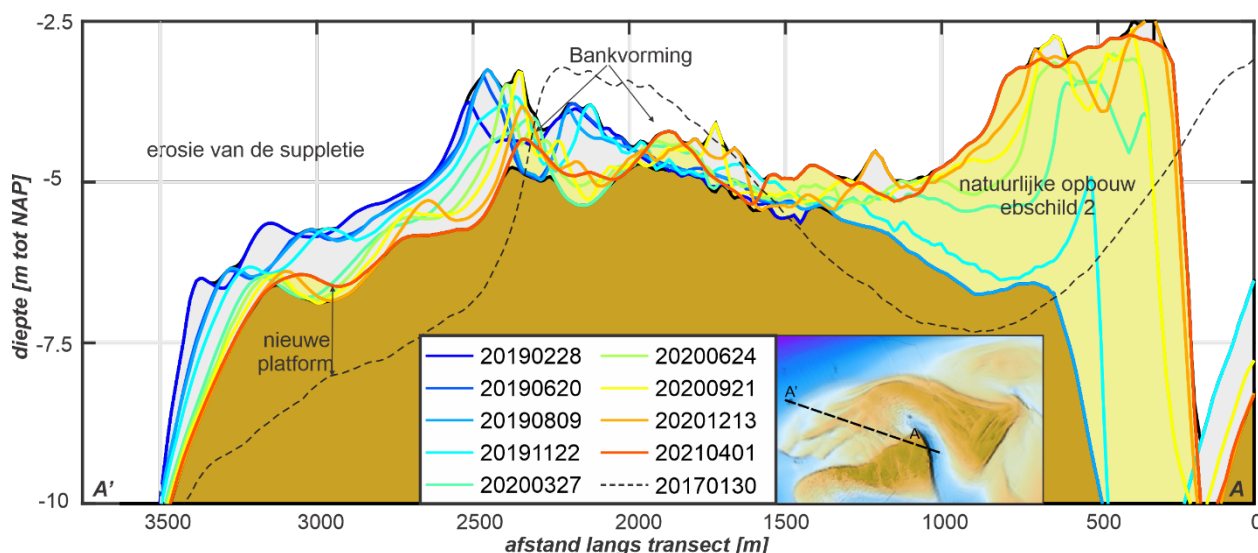


Figuur 4-2 Overzicht van de aanleg van de buitendeltasuppletie aan de hand van de metingen opgenomen in de periode 22-02-2018 - 09-08-2019.

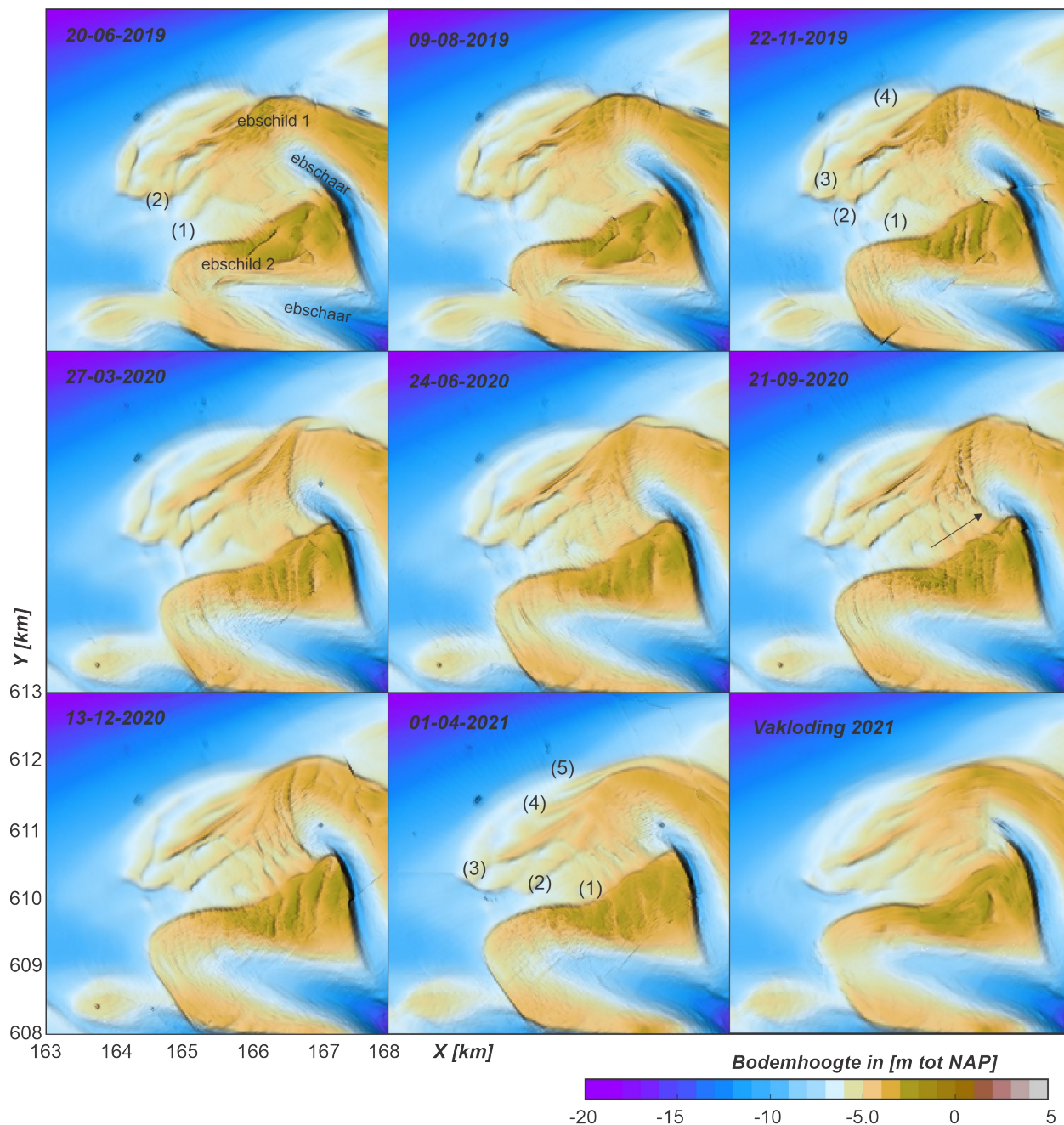
4.3 Morfologische veranderingen na aanleg

Na aanleg blijft de pilotsuppletie nog lang zichtbaar als ondiep platform (Figuur 4-3 en Figuur 4-4), wel ontstaat er een steeds vloeiendere overgang tussen de suppletie en de Kofmansplaat. In de 2021 opname is de suppletie nog wel zichtbaar maar vormt dan vrijwel een geheel met de al aanwezige bodem. Wat ook opvallend is, is dat er zich al snel na aanleg ook op de suppletie grote banken vormen. In de 22-11-2019 bodem zijn er naast de 2 autonome banken (1 en 2), twee nieuw gevormde banken (3 en 4) zichtbaar. In de winterperiode tussen 22-11-2019 en 27-03-2020, waarin ook een groot verlies van de suppletie optrad groeit bank 3 sterk aan. In de daaropvolgende metingen blijven de banken gehandhaafd en rond 01-02-2021 zijn er naast het diepere platform van de suppletie dan nog viertal banken zichtbaar. De meest zuidelijk gelegen bank (1) is dan eigenlijk al verdwenen. Deze bank is tussen 22-11-2019 en 24-06-2020 geroteerd en heeft zich dan in oostelijke richting tussen de twee ebschilden in verplaatst. Tussen de twee ebschilden ontstaat een gebied met kleine bodemvormen die richting de ebschaar zijn gericht. Deze bodemvormen duiden erop dat sediment tussen de twee ebschilden richting de ebschaar verplaatst.

In deze bodems valt ook sterke groei van ebschild 2 op. Dit ebschild neemt na aanleg van de suppletie duidelijk in omvang toe. Het meer zeewaarts gelegen ebschild neemt juist in hoogte af. De toename van ebschild 1 is waarschijnlijk niet direct gerelateerd aan suppletie, maar wordt veroorzaakt door de toenemende invloed van de zuidelijke ebschaar op het systeem. Deze ebschaar wordt de dominante uitstroombeging op de buitendelta ten koste van het Akkepollegat. Het merendeel van het sediment dat zich door het zeegat beweegt zal tijdens eb op het ebschild 2 worden afgezet.



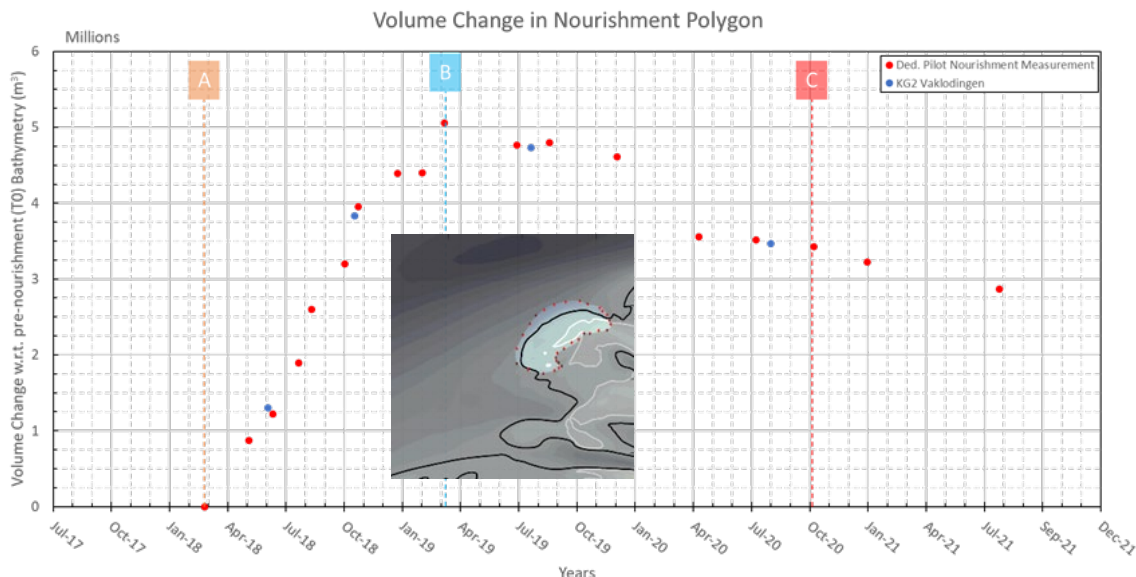
Figuur 4-3 Dwarsdoorsnede getrokken over de pilotsuppletie met bodemontwikkeling na aanleg (22-02-2018 - 09-08-2019). De bodem voor aanleg is weergegeven met de zwarte streepjeslijn. Zie Appendix B.2 voor aanvullende dwarsdoorsneden.



Figuur 4-4: Overzicht van de ontwikkeling van de buitendeltasuppletie na aanleg (22-02-2018 - 09-08-2019).

4.4 Volumeverandering van de suppletie

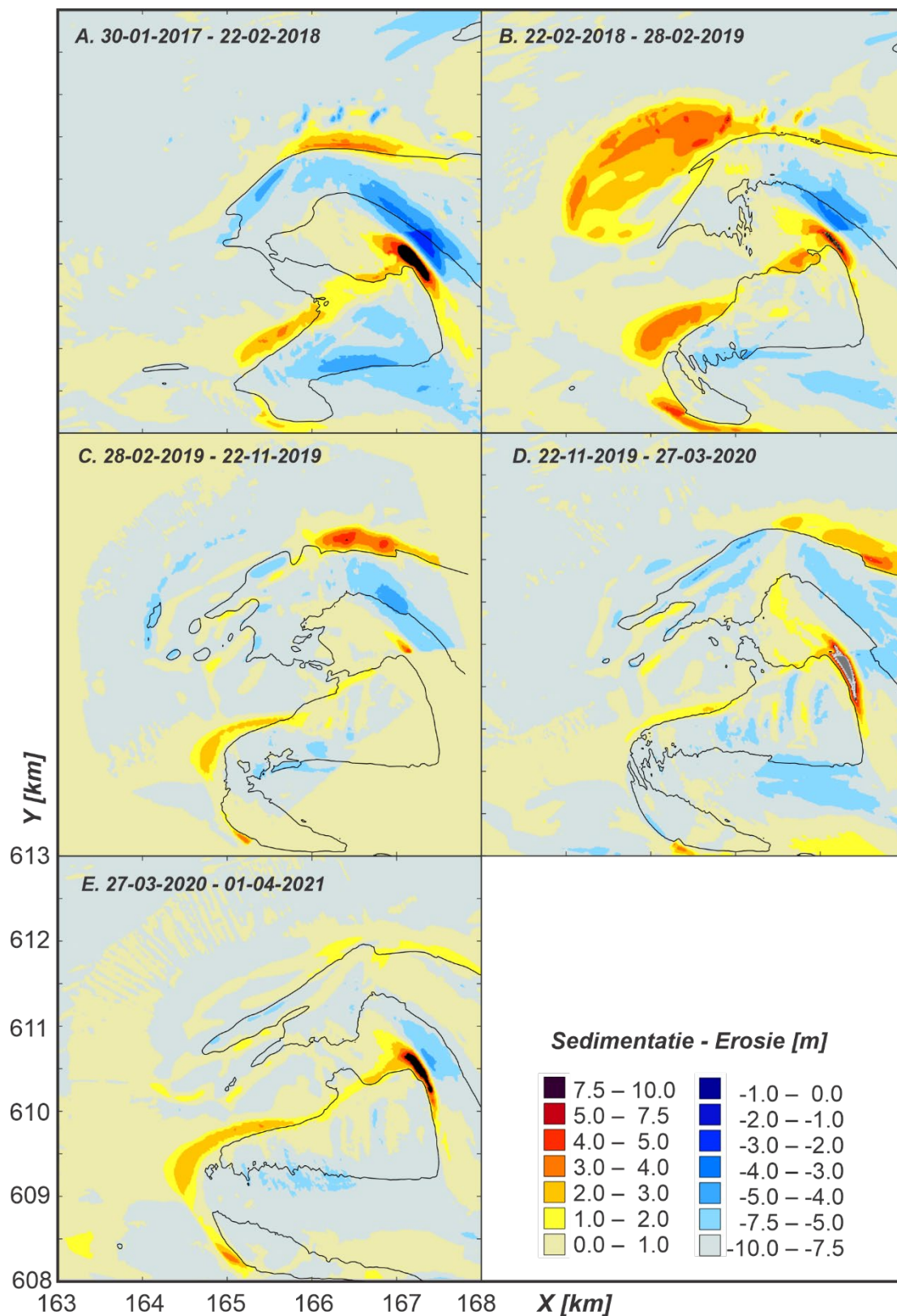
De ontwikkeling van de sedimentvolumes tijdens aanleg en daarna wordt weergegeven in (Figuur 4-5). De suppletiepolygoon laat een volume toename zien tot iets meer dan 5 miljoen m³. Na aanleg nemen de volumes dan weer af. In de meest recente meting ligt het volume in de suppletiepolygoon op 2,9 miljoen m³. Gemiddeld geeft licht de afname op 0,9 miljoen m³/jaar. Het volumeverloop laat wel zien dat perioden met grotere en kleinere erosiesnelheden elkaar afwisselen. Met name in de winterperiode van 2019-2020 treedt een groot verlies (0,8 miljoen m³) op. De afname van de volumes in de suppletiepolygoon wil niet zeggen dat dit zand de buitendelta heeft verlaten. Een groot deel van dit geërodeerde zand is terug te vinden in de aanzanding van de naastgelegen ebschilden, zoals ebschild 1 uit Figuur 4-1.



Figuur 4-5: Sedimentvolumeontwikkeling van de pilotsuppletie tijdens aanleg (A-B) en sinds aanleg (B-C).
Bron: Harlequin (2021).

De bodemhoogteveranderingen illustreren de volumeontwikkeling (Figuur 4-6). Voor aanleg van de suppletie worden de bodemhoogteveranderingen gedomineerd door de verplaatsing van de geul en plaatsystemen. Dit is duidelijk terug te zien (Figuur 4-6A); de geul erodeert en het front van het bijbehorende ebschild bouwt zeewaarts uit. De aanleg van de suppletie (Figuur 4-6B) resulteert in een bodemhoogte toename van 3 tot 4 meter. Na de aanleg van de suppletie (Figuur 4-6C) vindt een geleidelijke erosie van de suppletie plaats. Aan de noordzijde van de Kofmansplaat – waar ook ebschild 1 toe behoort - vindt de grootste sedimentatie plaats. Het is waarschijnlijk dat het suppletiezand langs de rand van de suppletie oostelijk wordt verplaatst. Het draagt dan bij aan de aanzanding die hier al plaatsvond.

In de winter van 2019 (Figuur 4-6D) treedt er relatief veel erosie van de suppletie op. Vrijwel de gehele suppletie neemt in hoogte af. Ook in het bovenaanzicht is dit terug te zien. Sedimentatie is zichtbaar aan de noordzijde van de Kofmansplaat en aan de noordoostzijde van het ebschild 2. Het is dus waarschijnlijk dat onder invloed van golven het sediment van de suppletie hier is afgezet. Een kleine maar consistente trend van erosie treedt op tussen het voorjaar van 2020 en april 2021 (Figuur 4-6E). Ook in deze figuur blijft de sedimentatie op de ebschilden zichtbaar. Het merendeel van de sedimentatie treedt op bij het ebschild 1 en niet meer bij de Kofmansplaat. Dit heeft waarschijnlijk te maken met het steeds verder dichtdrukken van Akkepollegat en het overnemen van ebdebiet door het Nieuwe Akkepollegat. Het merendeel van het sediment wordt hier dan tijdens eb ook afgezet.



Figuur 4-6: Overzicht van de bodemhoogteveranderingen over verschillende perioden voor en na aanleg van de suppletie.

5 Verdiepingsslag werking van de buitendelta en pilotsuppletie Ameland Zeegat

5.1 Inleiding

Aanvullend inzicht in de processen die spelen op de pilotsuppletie is verkregen door procesgebaseerde modellering. In de studie van Lambregts (2021) is een analyse uitgevoerd om de processen die spelen in het Zeegat van Ameland en op de suppletie beter te begrijpen. Deze studie bestaat uit een uitgebreide analyse van de metingen (zie ook H. 4) aangevuld met morfostatische modellering met behulp van Delft3D FM. Morfostatische modellering houdt in dat in het model wel de sedimenttransporten worden berekend, maar dat de modelbodem niet verandert. De berekende sedimenttransporten vormen de basis voor de berekening van de sedimenttransportpatronen door SedTRAILS (Elias et al., 2019). Door deze analyses uit te voeren op verschillende bodems (voor en na suppletie) en onder verschillende forcering (van getij en golven) kan inzicht worden verkregen in de maatgevende processen. Een samenvatting van de belangrijkste resultaten is weergegeven in H. 5.2.

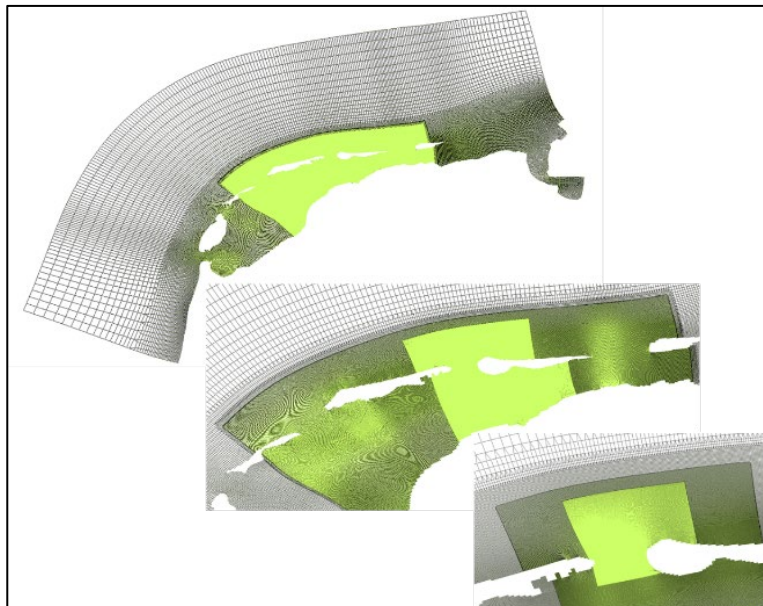
Door middel van morfodynamische modellering worden de bodemhoogte veranderingen rechtstreeks uitgerekend. Deze simulaties maken het enerzijds mogelijk de opgetreden veranderingen beter te begrijpen, daarnaast geeft zo'n model de mogelijkheid verschillende suppletievarianten door te rekenen en de effecten hiervan met elkaar te vergelijken. De resultaten van deze simulaties zijn uitvoerig behandeld in Harlequin (2022) en samengevat in H. 5.3.

5.2 Morfostatische modellering (Lambregts, 2021).

5.2.1 Model, methode en modelsimulaties

Als basis voor de morfostatische simulaties wordt een Delft3D Flexible Mesh (FM) stromings- en sedimenttransportmodel van de gehele Waddenzee gebruikt (De Graaff, 2009; Laan, 2019). Het Waddenzee model is van voldoende resolutie om grootschalig de getijvoortplanting en stromingen in de Waddenzee door te rekenen, maar nog niet gedetailleerd genoeg voor een doorrekening van de suppletie. De resolutie voor het Zeegat van Ameland is daarom geoptimaliseerd en verder verfijnt naar 20m (Elias et al. 2019). Door het opleggen van getijrandvoorwaarden op de buitenranden, kan met dit model de waterbeweging in het zeegat en op de buitendelta dan nauwkeurig worden doorgerekend. Alle berekeningen worden hierbij diepte gemiddeld uitgevoerd.

De in Delft3D FM aanwezige Van Rijn (2007a,b,c) sedimentformuleringen zijn gebruikt voor de online berekening van de sediment transporten. Lesser et al. (2004) geven een uitleg hoe de formuleringen zijn geïmplementeerd in Delft3D 4, deze aanpak is ook voor Delft3D FM geldig. In de Van Rijn formulering worden zowel de bodem- als suspensieve transporten berekend en bij elkaar opgeteld. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane (d_{50}) korreldiameter van 200 μm . Deze korreldiameter wordt gezien als representatief voor de buitendelta.



Figuur 5-1: Een overzicht van de modeldomeinen en optimalisatie van het Ameland Zeegat (Elias et al. 2020).

Koppeling met het spectrale golfmodel SWAN maakt het mogelijk de invloed van golven op de stromingen en sedimenttransporten mee te nemen. De gebruikte golfmodellen en instellingen zoals opgesteld binnen het Kustgenese 2.0 project zijn hiervoor gebruikt (Nederhoff et al. 2019).

In de studie van Lambregts (2021) wordt de bodemhoogte gedurende de simulatie niet aangepast, maar wordt er een morfostatische berekening uitgevoerd. De sedimenttransporten verkregen door deze methode worden ook wel de “potentiële sedimenttransporten” genoemd. In werkelijkheid zou de convergentie of divergentie van de transporten een bodemaanpassing veroorzaken. Hierdoor varieert de bodem en dus ook de transporten door de tijd. Door in het model de bodem constant te houden, kan juist de verandering in sedimenttransport onder verschillende hydrodynamische forcering zoals de verschillende golfcondities en voor verschillende bodemconfiguraties (met en zonder suppletie, verschillende jaren) nauwkeurig in kaart worden gebracht. Deze methode maakt het ook mogelijk om lange-termijn transportschattingen te verkrijgen zonder dat hier zeer rekenintensieve modelsommen voor gemaakt moeten worden. Hiervoor worden de transporten over verschillende representatieve golfcondities berekend en de resultaten gewogen bij elkaar opgeteld. Modelsimulaties zijn uitgevoerd op de bodems van 2005, 2007, 2011 en 2017 om een beter begrip te verkrijgen van de processen en transporten voor aanleg van de suppletie. De invloed en de ontwikkeling van de suppletie zijn onderzocht door modelsimulaties uit te voeren op 4 aanvullende bodems, waarin de metingen van de suppletie uit 22-02-2018, 28-02-2019, 27-3-2020 en 13-12-2020 zijn verwerkt.

De berekende sedimenttransporten worden nader geanalyseerd met behulp van SedTRAILS (Sediment TRANsport vlsualization & Lagrangian Simulator). SedTRAILS is geen nieuwe of apart uit te voeren modelsimulatie maar een nabewerking op de resultaten van de al uitgevoerde sedimenttransportmodellering. Op basis van de in Flexible Mesh berekende sedimenttransportvectoren worden transportpaden berekend. Door analyse van de transportpatronen en paden kan meer inzicht worden verkregen in het morfologische systeem, de maatgevende processen (Figuur 5-2) en de impact of verstoring van het systeem door aanleg van de suppletie (Figuur 5-3).

5.2.2 Processen voor aanleg van de suppletie

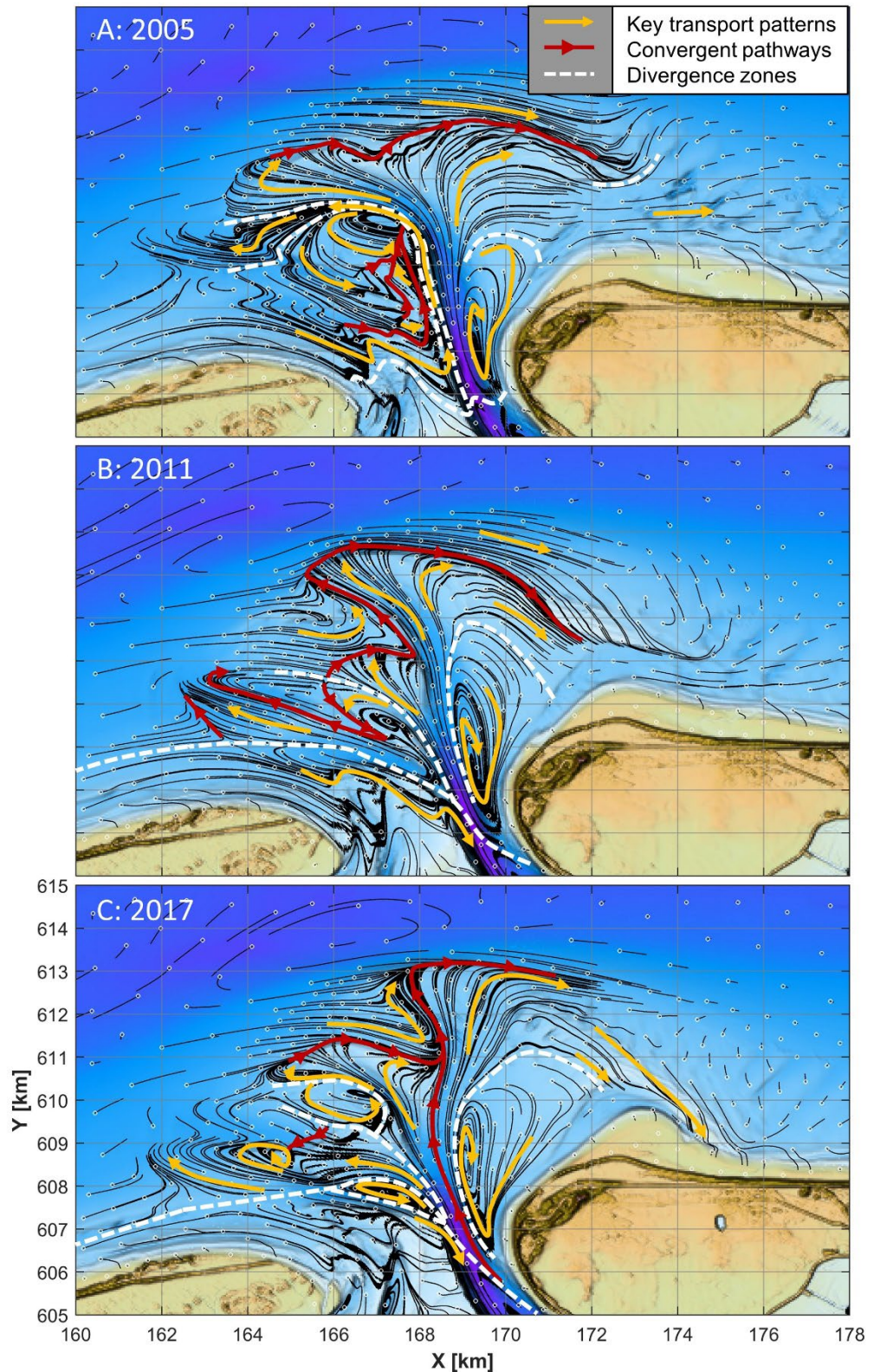
Modelsimulaties met hierin verschillende bodems (2005, 2011, 2017) laten zien dat de sedimenttransportpatronen op de buitendelta zijn veranderd na het ontstaan van de ebschildsystemen (Figuur 5-2). Het Borndiep speelt hierin een belangrijke rol. In het Borndiep bevindt zich een divergentiepunt in de sedimenttransporten. Ten noorden van dit divergentiepunt wordt sediment de buitendelta op verplaatst en ten zuiden hiervan vindt er transport richting het bekken plaats.

In de 2005 bodemconfiguratie ligt het divergentiepunt in de keel van het zeegat, ten zuiden van het Westgat (Figuur 5-2A). Het merendeel van het transport beweegt zich vanaf de vooroever van Terschelling langs het Westgat in het Borndiep, ten noorden van het divergentiepunt, waardoor er weinig uitwisseling met het bekken plaatsvindt. Sedimentdeeltjes worden via het Akkepollegat zeewaarts verplaatst naar het front van de buitendelta. Op dit buitendelta front is een transport van west naar oost zichtbaar richting het grote Bornrif platform. Daarnaast vindt er veel uitwisseling plaats met de westelijke zijde van de buitendelta, waar de ebschild- en schaarsystemen gaan vormen. Er worden hier grote circulaties (tegen de klok in) gevormd. Dit sediment wisselt actief uit met het Akkepollegat.

De transportpatronen op basis van de 2011 en 2017 bodemliggingen vertonen grote overeenkomsten (Figuur 5-2 B,C). In beide bodems is het Borndiep divergentiepunt zeewaarts verplaatst. Dit divergentiepunt ligt nu ter hoogte van het Westgat. Ten zuiden van het Westgat wisselen de deeltjes uit met het bekken terwijl ten noorden van het Westgat de deeltjes zeewaarts worden verplaatst. Op de buitendelta is het Akkepollegat niet langer de dominante uitstroomegul maar zijn er drie (kleinere) uitstroomegulen zichtbaar; het Akkepollegat en de twee ebscharen. Via deze twee ebscharen worden de transporten nu het westelijke deel van de buitendelta op getransporteerd en zijn er kleinere circulaties aanwezig. Het transport richting de noordzijde van de buitendelta vindt in de 2011 bodem nog hoofdzakelijk plaats via het Akkepollegat, maar in de 2017 bodem speelt ook de zeewaartse ebschaar een belangrijke rol. In beide bodems zijn de transporten op het front van de buitendelta van west naar oost gericht en deze voeden het naastgelegen Bornrif. Transporten op en over het Bornrif worden gedomineerd door golven. Sedimentuitwisseling vanaf het Bornrif richting de kust van Ameland vertoont in deze periode een duidelijke verandering. In de 2005 en 2011 bodemligging is er geen rechtstreeks transportpad zichtbaar vanaf het Bornrif naar de kust. De transportpaden eindigen hier op de rand van de buitendelta, waar een grote bankopbouw zichtbaar is (Figuur 3-7). In de 2017 bodem is het Bornrif, na aanlanding van het Bornrif Bankje, aangesloten op de kust van Ameland. Hierdoor ontstaat een doorgaand transportpad vanaf de buitendelta richting de kust.

In alle bodems is er een convergentiegebied zichtbaar aan de westzijde van het Bornrif, net ten noorden van de kust van Ameland. In dit gebied wordt sediment vanuit Borndiep en Akkepollegat langs de geul zeewaarts verplaatst en over de rand van Bornrif weer landwaarts. Deze circulatie verklaart de bankvorming die hier in de bodemmetingen zichtbaar is (Figuur 3-8).

Het belang van getij versus golven kan worden onderzocht door de resultaten van alleen een getijsimulatie te vergelijken met de resultaten van de jaargemiddelde condities. Uit analyse van deze simulaties blijkt dat de sedimenttransportpatronen bij de ontwikkelende ebschilden gedomineerd worden door het getij (2005-2007). In de 2017 bodem worden de transporten op het zeewaartse ebschild (ebschild 1) ook sterk beïnvloed door golven. Uit deze simulaties kan worden geconcludeerd dat het getij de aandrijver is van de groei en zeewaartse verplaatsing van de ebschilden en dat de rotatie van de ontwikkelde ebschilden het resultaat is van de combinatie van getij- en golfenergie (Lambregts, 2021).

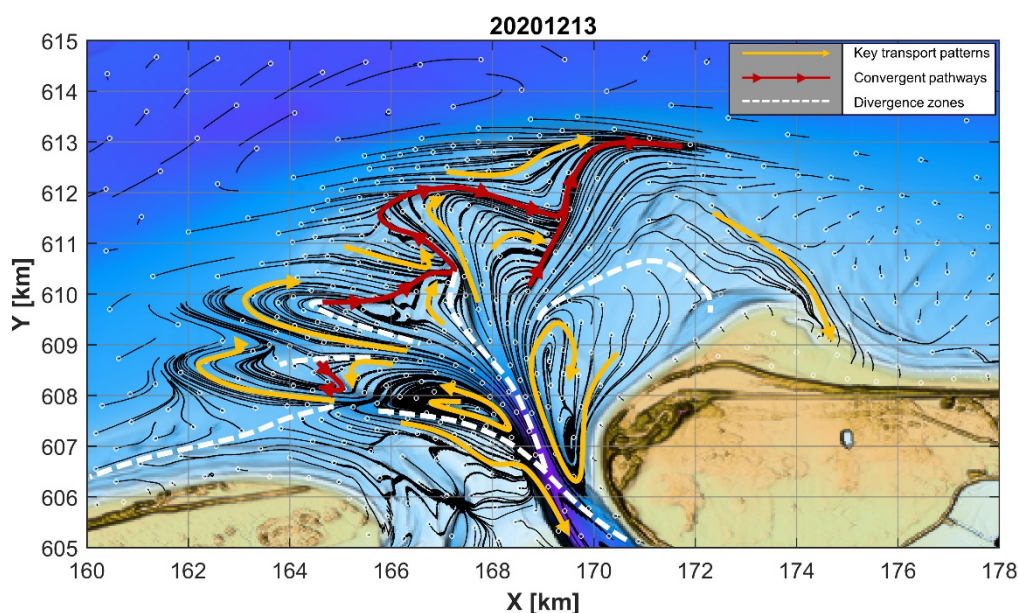


Figuur 5-2: Een voorbeeld van de verandering in sedimenttransportpatronen zoals bepaald met SedTRAILS voor jaargemiddelde condities en de 2005, 2011 en 2017 bodem. De beginpunten van de analyses (source) worden weergegeven door de witte cirkel en de verplaatsing van de deeltjes met de zwarte lijnen. De belangrijkste transportpatronen zijn weergegeven met de gele en rode pijlen. De witte lijnen geven gebieden met verschil in transportrichting weer. Bron: Lambregts (2021)

5.2.3 Processen na aanleg van de pilotsuppletie Amelandse Zeegat

De transportpatronen na aanleg van de suppletie worden weergegeven in Figuur 5-3. De bodemopname van 13-12-2020 is hierbij als meest recente bodem doorgerekend. Naast de aanleg van de suppletie hebben zich in de periode 2017-2020 ook (grote) natuurlijke veranderingen voorgedaan. Het verschil in transportpatronen (Figuur 5-2 versus Figuur 5-3) is voornamelijk het resultaat van de natuurlijke morfologische verandering. Een duidelijk afwijkend patroon op en nabij de suppletielocatie is niet te onderscheiden.

Ook in 2020 bevindt er zich een divergentiepunt in het Borndiep ter hoogte van het Westgat. Transporten ten zuiden hiervan wisselen uit met het bekken en transporten ten noorden hiervan met de buitendelta. Het merendeel van de uitwisseling met de buitendelta vindt nu plaats door het landwaartse ebschild (ebschild 2). Sedimenttransport naar de buitendelta rand vindt plaats via ebschild 1 en via het Akkepollegat. Waarbij de sedimentpaden eindigen op de banken gelegen tussen deze twee geulen. Dit geeft aan dat het zwaartepunt van de bankvorming in dit gebied ligt. Ten zuiden van het Akkepollegat vindt er nog steeds een sedimenttransport vanaf het Bornrif naar de kust plaats, maar het Akkepollegat vormt hier een scheiding tussen het westelijke en oostelijke deel van de buitendelta.

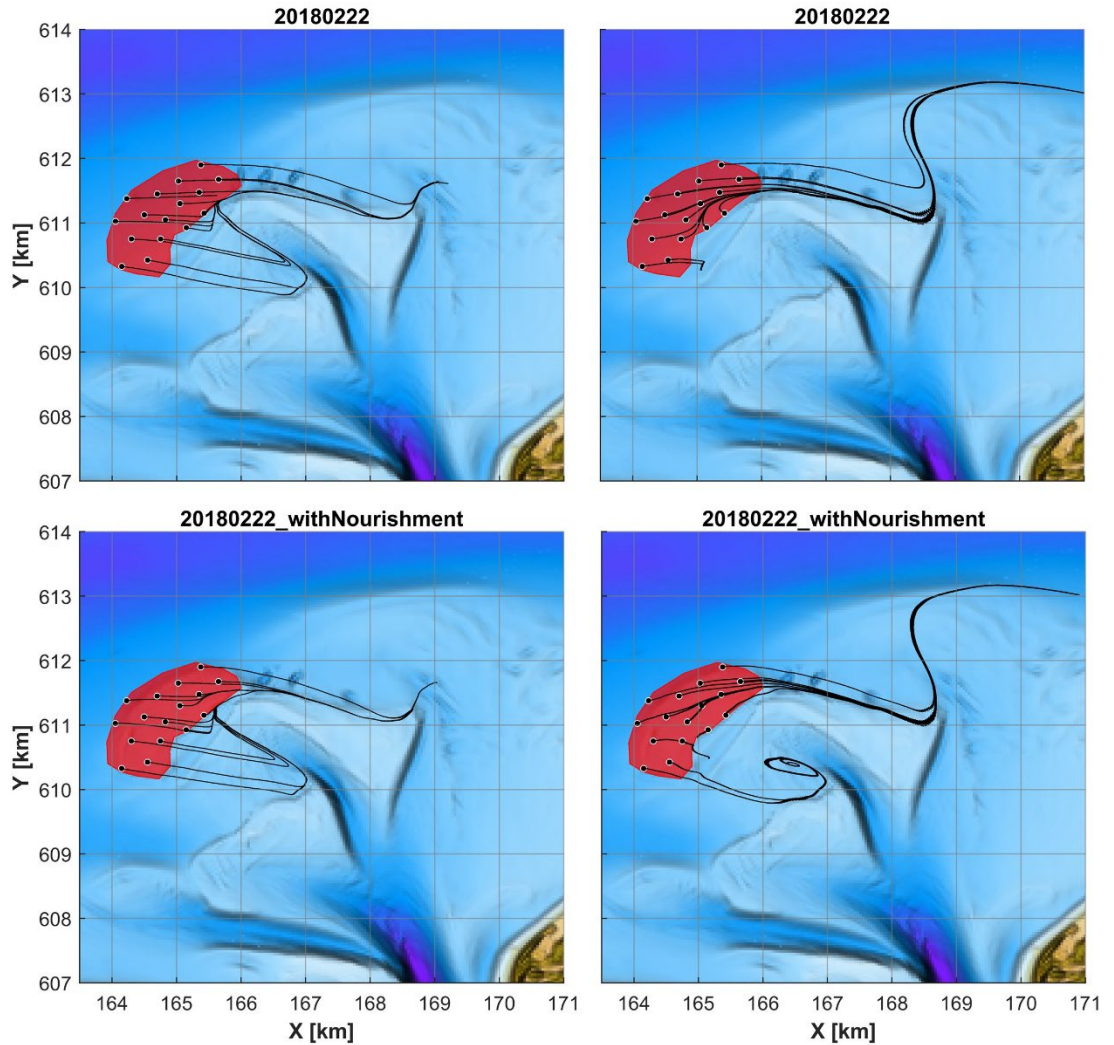


Figuur 5-3: Een voorbeeld van de verandering in sedimenttransportpatronen zoals bepaald met SedTRAILS voor jaargemiddelde condities en bodems voor suppletie (2017) en na suppletie (2020). De beginpunten van de analyses (source) worden weergegeven door de witte cirkel en de verplaatsing van de deeltjes met de zwarte lijnen. De belangrijkste transportpatronen zijn weergegeven met de gele en rode pijlen. De witte lijnen geven gebieden met verschil in transportrichting weer. Bron: Lambregts (2021)

Meer inzicht in de werking en invloed van de pilotsuppletie kan worden verkregen door alleen de sedimentbronnen op de suppletielocatie te analyseren (Figuur 5-4). Deze modelresultaten tonen de verplaatsing van het sediment voor de bodemligging in 22-02-2018 waarbij een aanvullende simulatie is gedraaid waarin de suppletie uit de bodemligging is gefilterd. De sedimenttransporten op deze bodems zijn vervolgens bepaald voor een simulatie met alleen getij en een simulatie met getij en golven (jaargemiddelde condities).

De transportpatronen in alle vier de simulaties vertonen overeenkomstige kenmerken. Sediment wordt onder invloed van getij vanaf de suppletielocatie richting het ebschild (1) (oostelijk) getransporteerd. Een deel van het transport verplaatst zich over het ebschild richting de ebschaar, waarna deze deeltjes weer zeewaarts getransporteerd worden. Aan de zeezijde van het ebschild ontstaat een netto oostelijk gericht transport. Deze transportpaden

zijn met en zonder suppletie gelijk. Hieruit kan geconcludeerd worden dat de suppletie geen beïnvloeding van de optredende processen geeft. Ook de toevoeging van golven geeft geen wezenlijke verandering van de transportpatronen. Door golfbreking op het ebschild en de suppletie ontstaat wel een sterkere transportstroom als gevolg van brandingstransport langs de rand van de buitendelta en treedt er minder uitwisseling op met de ebschaar. Golven zorgen er ook voor dat de deeltjes verder langs de rand van de buitendelta worden getransporteerd.



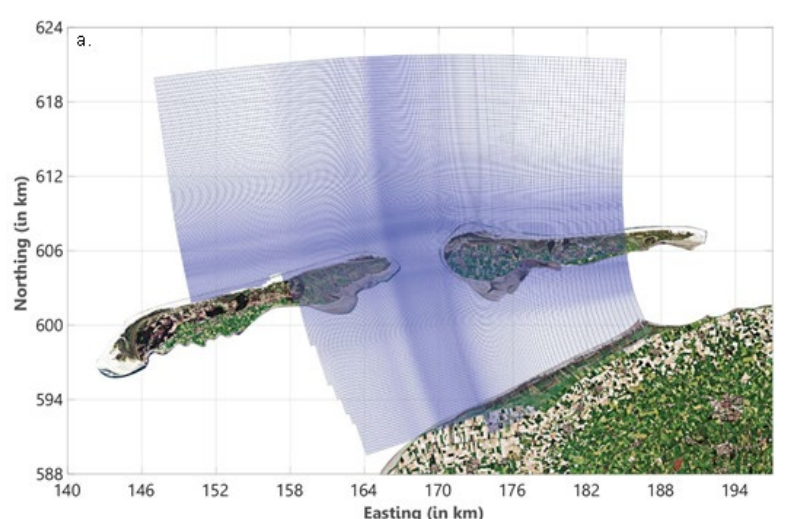
Figuur 5-4: Sedimenttransport patronen voor bronnen gelegen op de pilotsuppletie AZG met onderliggende bodem van 22-02-2018 zonder suppletie (boven) en met suppletie (onder). De linker kolom geeft de patronen ten gevolge van alleen getijforcering en de rechterkolom simulaties met getij en golven.

5.3 Morfodynamische modellering (Harlequin, 2021).

5.3.1 Model, methode en modelsimulaties

Als basis voor de morfodynamische simulaties wordt een Delft3D 4 stromings- en sedimenttransportmodel van het Amelander zeegat gebruikt. In eerdere studies is deze modelschematisatie al uitvoerig gekalibreerd, gevalideerd en toegepast (o.a. de Fockert, 2008; Teske, 2015; Jiao, 2014). Daarnaast laten studies door o.a. Lenstra (2019) zien dat periodiek bankgedrag op de buitendelta kan worden gereproduceerd. Voor de berekening van sedimentuitwisseling tussen Waddenzee en Noordzee is zo'n schematisatie niet geschikt, omdat de uitwisseling tussen de bekkens in de Waddenzee niet meegenomen wordt.

Het gebruikte rekenrooster voor stroming en sedimenttransport is weergegeven in Figuur 5-5. Dit rooster heeft een resolutie van 30x40m in de keel van het zeegat en grotere roostercellen op de Noordzee. Op de Noordzeeranden worden getijcomponenten, afgeleid uit een grootschalig model, opgelegd als randvoorwaarde. De invloed van golven wordt meegenomen door koppeling met SWAN en sedimenttransporten worden berekend met de Van Rijn 2007 transportformule, waarna de bodemhoogte aangepast wordt. De invloed van golven op het sediment transport zoals beschreven in Albernaz et al. (2019) wordt hierbij gebruikt. De modelsommen gaan uit van een bodemsamenstelling met onbeperkte hoeveelheid sediment met een mediane (d_{50}) korrel diameter van 250 μm .

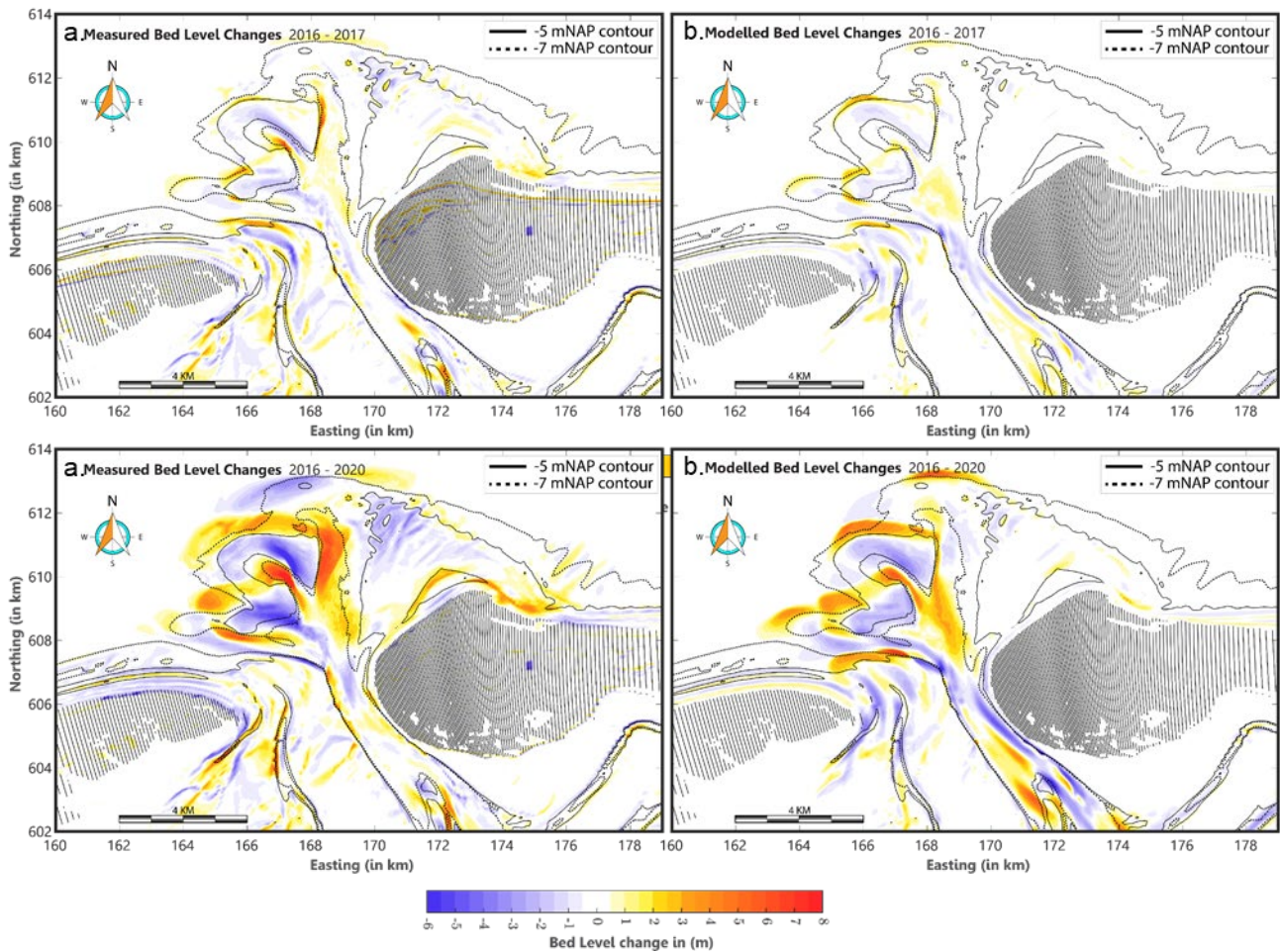


Figuur 5-5: Delft3D modeldomein zoals gebruikt voor de morfodynamische modellering van het Amelander Zeegat (Harlequin, 2021).

Langetermijn morfologische simulaties zijn mogelijk door de toepassing van de MorMerge methode (Roelvink, 2006). De gebruikte aanpak is erop gericht om over langere termijn, jaargemiddelde condities te reproduceren. Het effect van een enkele storm is in deze simulaties niet aanwezig.

Uit een gevoeligheidsanalyse blijkt dat het morfologische model in staat is morfologische veranderingen over kortere tijdschalen goed te voorspellen (1-2 jaar). Modelsimulaties over langere tijdschalen (4 jaar) vertonen een goede overeenkomst in de getijgedomineerde delen van de buitendelta (zoals de ebschaar en -schild systemen), terwijl in de golfgedomineerde delen (bijv. op het Bornrif) transporten worden onderschat (Figuur 5-6). Deze discrepantie zorgt ervoor dat in lange-termijn simulaties (12 jaar) de gemodelleerde morfologie steeds verder gaat afwijken van de geobserveerde morfologie, waardoor het model geen representatief beeld van het buitendelta gedrag weergeeft.

Validatie van het morfologische model aan de hand van de geobserveerde erosie van de pilotsuppletie laat zien dat het model de geobserveerde volumeafname accuraat kan reproduceren (Appendix C, Figuur C-1).



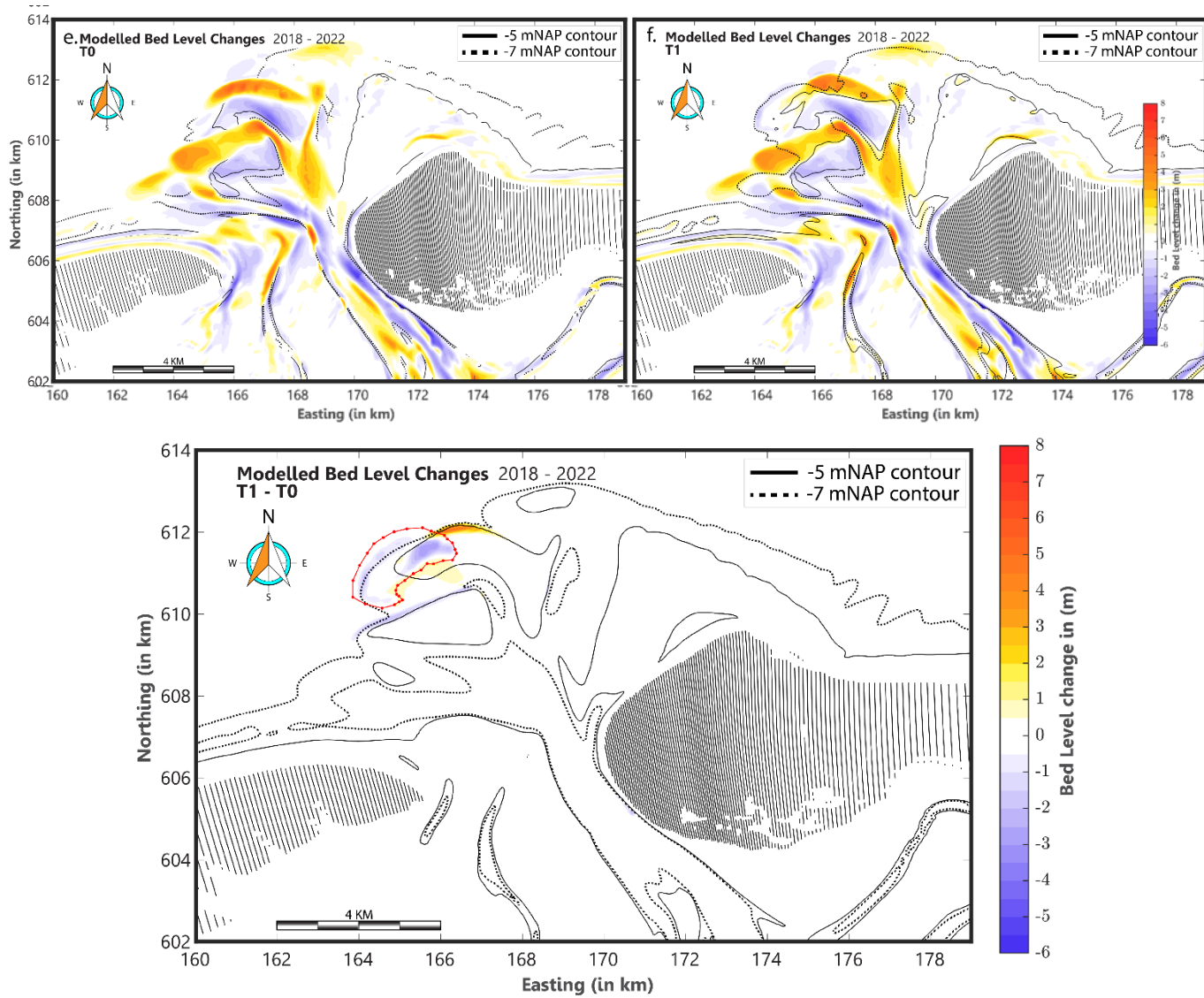
Figuur 5-6: Gemeten (a) en berekende (b) bodemhoogteveranderingen voor een 1-jaar simulatie (boven), een 4-jaar simulatie (onder)

5.3.2 Morfologische invloed van de pilotsuppletie Ameland Zeevat

De effecten van de pilotsuppletie zijn door Harlequin (2021) berekend door het uitvoeren van een simulatie op de 2018 bodem met en zonder de suppletie. De modelsimulatie is dan over een periode van 4 jaar uitgevoerd. De modelsimulaties laten zien dat de transporten in de ebschaar en – schild systemen gedomineerd worden door het getij. De ebtransporten zijn groter dan de vloedtransporten dit resulteert in een netto zeewaarts gericht transport op de ebschilden en veroorzaakt een uitbouw van de ebschilden.

Harlequin (2021) concludeert dat door aanleg van de suppletie de golfhoogte lokaal wordt beïnvloed. De suppletie zorgt hier lokaal voor een 20% grotere golfenergie dissipatie. Deze dissipatie treedt dan vooral op tijdens de hogere golfcondities, waarbij golven breken op de suppletie. Ook in de waterbeweging is een invloed zichtbaar. De west-oost gerichte stroming langs de zeewaartse rand van het ebschild (1) neemt toe. Dit resulteert in een netto oostwaarts transport. Daarnaast vindt er een landwaartse stroming en transport plaats. Aan de zuidwestelijk zijde van de suppletie verplaatst sediment richting het landwaartse ebschild (2). Op dit ebschild nemen de zeewaarts gerichte transporten iets af.

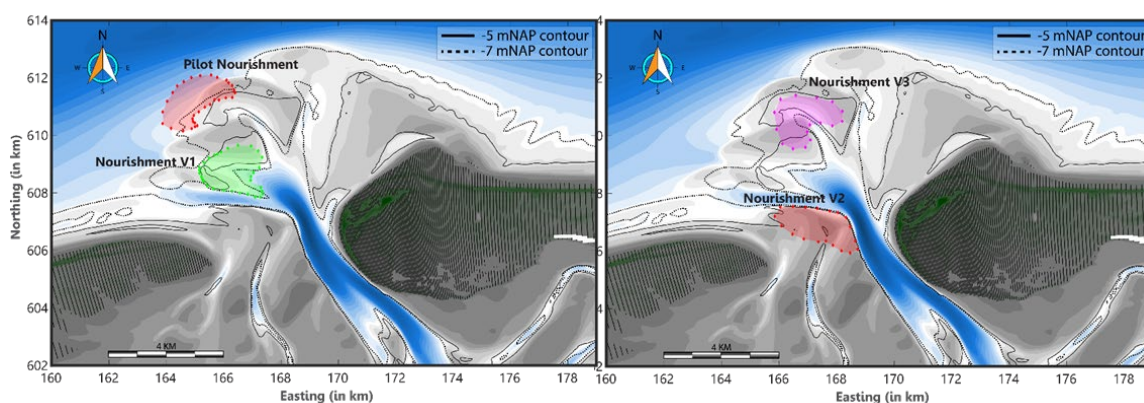
De berekende veranderingen in morfologie (Figuur 5-7) met en zonder suppletie zijn vrijwel identiek. De modelresultaten laten duidelijk zien dat transporten alleen ter plaatse van de ebschilden worden beïnvloed. De beperkte verschillen bevestigen nogmaals de conclusie dat op de schaal van de gehele buitendelta de hydrodynamische en morfologisch impact beperkt is.



Figuur 5-7: Morfologische verandering van de buitendelta zonder pilotsuppletie (linksboven) en met suppletie (rechtsonder) en het verschil tussen de T1 en T0 (onder).

5.3.3 Alternatieve suppletieontwerpen

Figuur 5-8).



Figuur 5-8: Een overzicht van de ligging van de verschillende suppletievarianten.

De verschillen in morfodynamische respons voor de varianten worden hieronder en in Figuur 5-9 samengevat. In Appendix C worden de volledige modelresultaten getoond.

Alternatieve suppletiehoogte van de pilotsuppletie (T1, H1 en H2)

De pilotsuppletie is voor 3 verschillende hoogten doorgerekend. De omtrek van de suppletie is daarbij gelijk gebleven maar de kruinhoogte neemt toe van -3,2 m NAP (T1), tot -2,5 m NAP (H1) en vervolgens tot 0 m NAP (H2). Het suppletievolume neemt daarbij toe van 4,9 miljoen m³ naar 6,1 miljoen m³ en 6,5 miljoen m³. Een deel van de geobserveerde respons is dan ook gerelateerd aan de grotere sedimentvolumes.

Deze verhoging van de kruinhoogte heeft tot gevolg dat golfbreking op de suppletie toeneemt. Hierdoor worden de lokale sedimenttransporten en morfologische veranderingen groter. De ligging van de sedimentatie-erosiegebieden blijft wel ongeveer gelijkwaardig, met erosie ter plekke van de suppletie en dominante sedimentatie aan de noordzijde van het ebschild (1). Daarnaast wordt een deel van de suppletie landwaarts verplaatst. De magnitude van de veranderingen, zowel sedimentatie als de erosie, nemen toe met hogere aanleghoogte, maar een deel van deze toename zal zeker ook gerelateerd zijn aan de grotere aanlegvolumes.

Naast deze lokale veranderingen neemt ook de invloed van de suppletie op het landwaartse ebschild (2) toe. De erosie van de zeezijde wordt groter met toenemende hoogte van de suppletie, maar ook sedimentatie op het ebschild neemt toe. Uit deze observaties kan geconcludeerd worden dat de verhoging van de suppletie het systeem op een iets grotere schaal (de ebschaar en ebschilden) direct beïnvloedt. Het lijkt echter onwaarschijnlijk dat deze veranderingen een wezenlijke verandering van het autonome gedrag veroorzaken.

Suppletie op het landwaartse ebschild (V1)

In deze variant is 5,4 miljoen m³ zand neergelegd op het landwaartse ebschild 2. Hierbij wordt ook een klein deel van de ebschaar dichtgezet. De ebschaar hervormt zicht snel waardoor het suppletiemateriaal herverdeeld wordt over het ebschild. Met name de noord- en zuidzijde van het ebschild nemen in volume toe. De zuidelijke groei van de bank zorgt er ook voor dat het Westgat beïnvloed wordt. Deze geul wordt dan ook iets dieper. Een deel van het suppletiemateriaal wordt via de ebscharen zeewaarts afgevoerd. De sedimentatie aan de noordzijde van het ebschild neemt toe.

Op basis van de geobserveerde veranderingen kan hier worden geconcludeerd dat deze variant een groter effect heeft op de processen van de buitendelta. Vrijwel de gehele westelijke zijde van de buitendelta wordt beïnvloed. Op het Bornrif zijn de verschillen beperkt, dit lijkt vooral te komen door de beperkte duur van de simulatie.

Suppletie aan de noordzijde van de Zeehondenplaat (V2)

Deze suppletie wordt aangelegd ten zuiden van het Westgat. Het volume bedraagt 4,9 miljoen m³. Deze suppletie heeft dan ook vooral effect in het gebied rond het Westgat. Een deel van het materiaal verplaatst door de ebstroming zeewaarts. Deze beïnvloedt de vloeddominante stroming door het Westgat, waardoor de geul dominantier wordt en er meer sediment zeewaarts wordt verplaatst. Daarnaast heeft de verkleining van het doorstroomoppervlakte van de keel van het zeegat tot gevolg dat er een nieuwe verbinding tussen bekken en kust wordt gevormd. Er ontstaat een nieuwe geul langs de kop van Terschelling die verbinding maakt met het Oosterom. Het voorliggende ebschild duwt het Westgat zeewaarts, waardoor de voorliggende geul relatief grote veranderingen vertoont. Ook hier geldt dat de verandering op de buitendelta nog beperkt is.

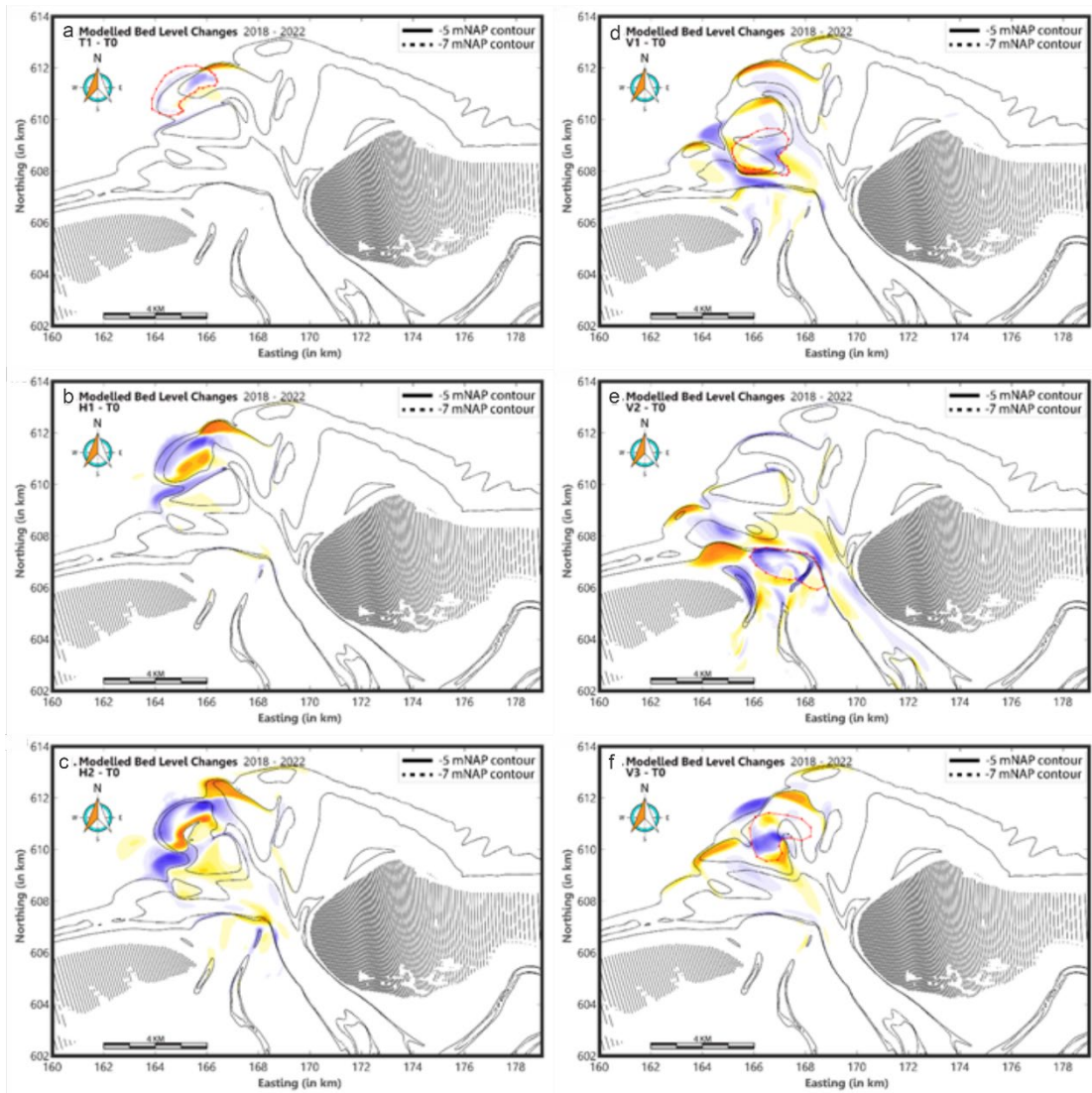
Suppletie aan de landwaartse zijde van de Kofmansplaat (V3)

In deze variant is de suppletie landwaarts verlegd. De suppletie ligt dan gedeeltelijk over het landwaartse ebschild 2 en vult het zeewaartse deel van de ebschaar op. Door het opvullen van de ebschaar is het volume toegenomen tot 6,5 miljoen m³. Na opvullen wordt de ebschaar snel hervormd en het geërodeerde sediment afgezet in een groot ebschild 1. Er vindt hier minder oostelijke verplaatsing plaats in vergelijking met de T1 simulatie, maar er vindt wel meer uitwisseling plaats met het landwaartse ebschild 2.

Samenvattend;

Op basis van deze gevoeligheidssimulaties kan worden geconcludeerd dat:

1. de buitendeltasuppletie (T1, H1, H2) vooral interacteert met de al aanwezige eb- en vloodschilden. Deze blijven aanwezig, maar volumeveranderingen zijn dan iets groter. Het oostwaarts transport neemt toe. Met een grotere suppletie nemen ook de verschillen toe, maar het morfologische gedrag van de eb- en vloodschilden verandert niet significant. Door suppleren in de ebschaar (V3) vindt er meer verspreiding plaats. De suppletie wordt sneller verspreid, waarbij ook een deel op het landwaartse ebschild 2 terecht komt.
2. Suppleties in het landwaartse ebschild 2 en -schaar systeem (V1) en Zeehondenplaat (V2) beïnvloeden ook het Westgat. Hierdoor vindt een grotere beïnvloeding van de buitendelta plaats.
3. Morfologische effecten op de schaal van de buitendelta zijn allen zichtbaar over langere tijdschalen. Op een tijdschaal van 4 jaar vindt er nog geen uitwisseling met het Bornrif plaats.



Figuur 5-9: Overzicht van het verschil in bodemhoogteverandering tussen de T0 en de verschillende suppletievarianten. In Appendix C worden de volledige modelresultaten per simulatie weergegeven.

6 Synthese, Conclusies en Aanbevelingen

6.1 Synthese

Deze synthese volgt de doelen en hypothesen zoals opgesteld door Rijkswaterstaat vóór aanleg van de pilotsuppletie gebruikt. De doelen, geformuleerd op een relatief hoog abstractieniveau, zijn:

1. vergroten van systeemkennis over zeegatsystemen,
2. inzicht verkrijgen in ontwerp en haalbaarheid van buitendeltasuppleties ter onderbouwing van het beleidsadvies op basis van Kustgenese 2.0 over de lange termijn zandsuppletie strategie,
3. bijdragen aan versterken van het kustfundament conform beleid uit de derde kustnota.

Een synthese van de morfologische inzichten (behorend bij doel 1) wordt in 6.1.1 uitgewerkt. Daarbij wordt de schaalcascade toegepast om de verschillende functies die de buitendeltasuppletie in het zanddelende systeem kan vervullen te beschrijven.

Algemene inzichten in de werking van een buitendeltasuppletie staan in 6.1.2. Daar worden ook de inzichten in alternatieve suppletieontwerpen, verkregen via de morfologische modellering en door vernieuwde inzichten in processen van de buitendelta besproken. Toetsing van de gestelde hypothesen gebeurt in 6.1.3.

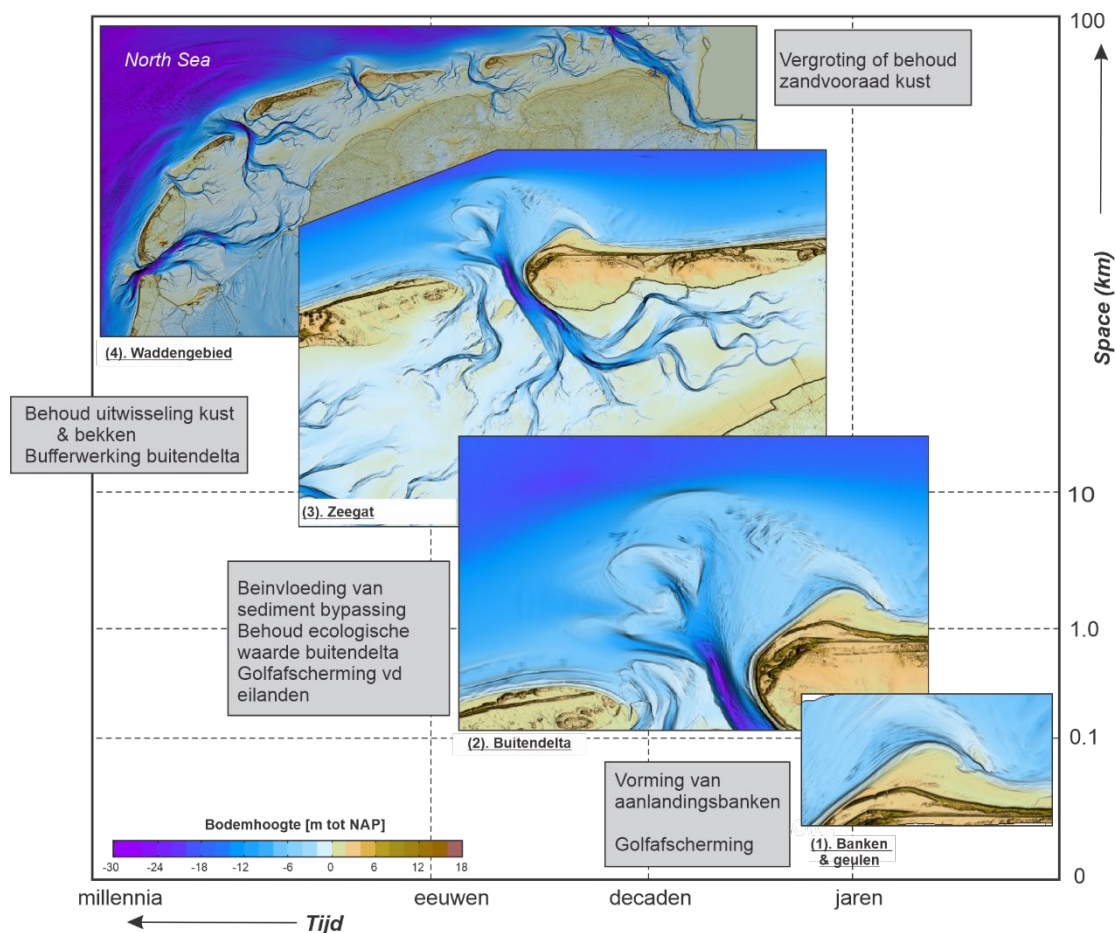
6.1.1 Verschillende functies van buitendeltasuppleties

Het onderzoek dat in de afgelopen jaren is uitgevoerd bij Ameland heeft veel inzicht opgeleverd in de complexiteit van de processen op de buitendelta. De morfologische veranderingen in de buitendelta treden op ten gevolge van processen die spelen op verschillende tijd- en ruimteschalen. De schaalcascade (H. 3.1) is een goed middel om deze veranderingen gestructureerd in kaart te brengen. De beleidsdoelen 'behoud van sedimentvolume van het kustfundament' en 'kustlijnhandhaving' spelen op verschillende tijd- en ruimteschalen. Beiden kunnen bereikt worden met buitendeltasuppleties, maar de uitwerking hiervan kan anders zijn. Ook hier is de schaalcascade een belangrijk hulpmiddel om doelstellingen en uitwerking gestructureerd in kaart te brengen (Figuur 6-1).

Buitendelta's en buitendeltasuppleties in relatie tot schaalniveau hele Waddengebied (4)

Op dit niveau moet het volume van de kustzone gelegen binnen het kustfundament gehandhaafd worden. Volumeverlies door zeespiegelstijging en verliezen richting de Waddenzee of over de landsgrenzen richting Duitsland moeten gecompenseerd worden door zandsuppleties. Voor dit doel, op deze schaal, maakt het eigenlijk niet uit welke suppletievorm en waar de suppletie wordt toegepast. Zolang het volume maar binnen het kustfundament wordt aangebracht. Een buitendeltasuppletie draagt dan ook altijd bij aan het doel van instandhouding van het kustfundament.

De volumeontwikkeling van de Waddenzee over de laatste eeuw (Elias et. al. 2012; Wang et. al. 2018, Elias, 2019) laat zien dat de sedimentimport ruim voldoende was om te compenseren voor de opgetreden (relatieve) zeespiegelstijging. Met name voor de oostelijke Waddenzee kan hieruit indirect geconcludeerd worden dat zowel het sedimentaanbod als de transportcapaciteit voldoende was. Het in stand houden van een gelijkwaardig systeem, door het op peil houden van de zandvolumes van de buitendelta's, zorgt er zeker voor dat het zand dat benodigd is voor het meegroeien van de Waddenzee met zeespiegelstijging, beschikbaar is. Als er niet voldoende sediment beschikbaar is op de buitendelta dan zullen de aanliggende kusten het sediment moeten leveren met aanzienlijke kusterosie tot gevolg.



Figuur 6-1: Een samenvatting van de rol van buitendeltasuppleties op de niveaus in de schaalcascade.

Buitendelta's en buitendeltasuppleties in relatie tot schaalniveau (2) en (3)

Het aanbrengen van zand op de buitendelta houdt de volumes van de buitendelta in stand. Dit is belangrijk voor de functie van zandbuffer van de buitendelta en de golfafschermende werking onder extreme stormcondities.

De functie van zandbuffer is als volgt: De buitendelta maakt samen met de keel van het zeegat en het bekken deel uit van een zanddelend systeem (*schaal 3*). Als er in één van de elementen binnen dit systeem een sedimentvraag ontstaat, bijvoorbeeld in het bekken, kan de buitendelta sediment leveren. Vice versa bij aanbod kan de buitendelta dit opslaan. Zonder buitendelta zouden de aanliggende eilandkusten waarschijnlijk aan veel meer variatie onderhevig zijn. Het is echter niet geheel duidelijk wat het benodigde minimale of optimale zandvolume van de buitendelta moet zijn om deze bufferwerking te garanderen.

De buitendelta beschermt de Waddenzee onder extreme stormcondities tegen de Noordzeegolven. De hogere golven breken op de voorliggende buitendelta, waardoor ze het

merendeel van de golfenergie verliezen en niet doordringen tot in de Waddenzee. Daarnaast draagt golfbreking op de buitendelta bij aan het genereren van sedimenttransporten door omwoeling en golf-gedreven stromingen die de sedimentstroom richting het bekken voedt. Als de buitendelta verdwijnt of dieper komt te liggen, kunnen grotere golven de Waddenzee indringen, waardoor grootschalige bodemveranderingen zullen optreden. Daarnaast kan doordringing van de golven door de grote geulen een directe bedreiging vormen voor de veiligheid van de achterliggende dijken en de zeeweringen in het zeegat.

Via de locatie en vorm van een suppletie kan erop gestuurd worden om de suppletie een actief of passief onderdeel van de buitendelta te laten zijn (Schaal 2). Een passief gedrag kan worden verkregen door de suppletie aan te brengen op een laag-dynamisch deel van de buitendelta in een vorm die overeenkomt met de al aanwezige buitendelta. Door de suppletie aan te brengen in een actief deel van de buitendelta, bijv. in gebieden met migrerende banken en geulen kan de buitendeltasuppletie juist snel worden verspreid. Zo'n suppletie vormt dan onderdeel van het sediment-bypassing proces (*Schaal 2*). Door de suppletie strategisch binnen de sediment-bypassing cyclus te plaatsen kan de hoeveelheid zand in de aanlandingsbanken of de frequentie van aanlanden worden vergroot. Deze strategie maakt het mogelijk de zandtoevoer naar het eiland te vergroten zonder rechtstreeks op het eiland te suppleren.

Op het schaalniveau 2 kan ook zodanig gesuppleerd worden dat de sedimentimport richting het bekken toeneemt. Deze suppleties moeten dan niet in de sediment bypassing cyclus worden ingepast, maar juist aansluiten op de sedimenttransportpaden richting het bekken. Een optie hiervoor is suppleren in de keel van het zeegat, waarbij een deel van het materiaal richting het bekken (vloedstroming) en een deel richting de buitendelta (ebstroming) zal worden verplaatst. Door de grote stromingen en transportcapaciteit in de keel van het zeegat zullen dit soort suppleties snel verspreid worden. Dit voeden van de getijstroming kan in principe in alle zeegaten plaatsvinden. Daarnaast kunnen suppleties worden ingepast in de vloeddominante transportpaden. Bij het zeegat van Ameland zou dit het gebied tussen Westgat en de kust van Terschelling zijn.

Buitendelta's en buitendeltasuppleties in relatie tot schaalniveau (1)

Op het kleinste schaalniveau kan een buitendeltasuppletie erop gericht zijn direct lokaal sediment te doen toenemen, bijvoorbeeld bij eilandkusten. Dit wordt uitgelegd aan de hand van de situatie aan de westzijde van Ameland. Zo'n suppletie kan daar in de vorm van zandplaat op het Bornrif platform of een systeemsuppletie waarbij een "aangelande bank" wordt gecreëerd. Het direct suppleren van eilandkop en -staart kan noodzakelijk zijn om de hier aanwezige dynamiek te beperken en kustveiligheid te garanderen. Op schaal 1 zijn suppleties noodzakelijk in dienst van het huidige beleid van kustlijnhandhaving met de Basiskustlijn (BKL) als referentie. Vanuit die doelstelling is volledig vrije dynamiek zoals die op zou treden in een natuurlijke sediment-bypassing cyclus niet mogelijk. De eilandkop van Ameland zou dan waarschijnlijk veel verder landwaarts verplaatsen tussen de bankaanlandingen. Dus strandsuppleties blijven noodzakelijk gezien de huidige ligging van de BKL op Ameland. Buitendeltasuppleties of systeemsuppleties kunnen een aanvulling vormen op dit onderhoudsregime.

6.1.2 De werking van een suppletie op de buitendelta van het Zeegat van Ameland.

Inzichten vanuit de pilotsuppletie

De manier waarop een suppletie is ingepast in het natuurlijke systeem bepaalt in grote mate de respons. Een goed begrip van de natuurlijke dynamiek (vóór aanleg) is dan ook essentieel om de werking van de pilotsuppletie goed te begrijpen.

De ebschaar en -schildsystemen vormen zich dicht bij het zeegat vanuit een initiële verstoring. De grote (kustdwarse) getijstroming door de hoofdgeul van de buitendelta zorgt ervoor dat de ebschaar groeit en zich zeewaarts uitstrekt. Om de ebschaar heen vormt zich een bank (het ebschild). Naarmate de ebschaar zich zeewaarts verplaatst neemt ook de kustdwarse stroming af en nemen de invloed van het kustlangse getij en de golven toe. Een maximale zeewaartse uitbouw wordt bereikt. De kustlangse (west – oost) gerichte getijstroming in de Noordzee en het overheersende golfklimaat zorgen ervoor dat de transporten op het ebschild ook van west naar oost gericht zijn.

De pilotsuppletie is aangelegd tegen een al maximaal uitgebouwd ebschild. Het kustdwarse zeegat getij speelt dan ook slechts een beperkte rol in de ontwikkeling van de suppletie. Golven en het kustlangs getij zijn de dominante processen. Voor aanleg van de suppletie vormt de natuurlijk gevormde zeezijde van het ebschild al een evenwicht met de overheersende processen. De suppletie verstoort dit evenwicht. De bodemhoogte ligt dan lokaal te hoog ten opzichte van de natuurlijke bodem. Direct na aanleg is deze verstoring het grootst en vindt er een eerste aanpassing plaats, waarbij relatief grote bodemveranderingen optreden. Zo'n respons is duidelijk zichtbaar na de eerste serie winterstormen. In een periode van 2,5 jaar is er 2,1 miljoen m³ geërodeerd van de pilot suppletie, 0,8 miljoen m³ hiervan vond plaats tijdens de eerste serie winterstormen.

Verlies aan zand van de suppletielocatie wil niet zeggen dat dit zand verloren is uit de buitendelta. Op basis van de bodemveranderingen en uitgevoerde morfologische modellering (4 jaar voorspelling) kan geconcludeerd worden dat dit sediment verplaatst richting de naastliggende banken van het Bornrif, maar nog niet veel verder. Een belangrijke conclusie is dan ook dat de suppletie bijdraagt aan het (langetermijn)behoud van het sedimentvolume van de buitendelta. Een tweede belangrijke conclusie is dat de suppletie de natuurlijke processen op de buitendelta niet wezenlijk verandert. De bodemmetingen laten zien dat de systemen van ebschaar en -schild behouden blijven, de morfologische veranderingen zich vóór en ná suppletie doorzetten en dat er op de suppletie banken ontstaan die ook voor aanleg al aanwezig zijn. Deze inzichten worden bevestigd door de modellering. Morfostatistische modellering laat identieke sedimenttransportpaden zien met en zonder suppletie. De morfodynamische modellering bewijst dat er identieke sedimentatie- en erosiepatronen ontstaan. In beide gevallen worden de natuurlijke banken die oostelijk van de suppletie zijn gelegen gevoed. De suppletie zorgt er wel voor dat er meer voeding (sedimentatie) optreedt.

Actieve versus passieve beïnvloeding door suppleties.

Een belangrijke conclusie die op basis van de observaties en uitgevoerde modellering van getrokken kan worden is dat zowel actieve als passieve beïnvloeding van de buitendelta door uitvoering van een suppletie mogelijk is. De pilotsuppletie is een voorbeeld van een passieve suppletievariant, waarbij de processen op de buitendelta en de natuurlijke dynamiek niet wezenlijk veranderen. Erosie van de suppletie zorgt ervoor dat er meer sediment beschikbaar is waardoor sedimentatie in de banken toeneemt, maar de patronen van sedimentatie en erosie veranderen daarbij niet. De locatie van de suppletie bepaalt dit. De morfologische modellering laat zien dat een andere hoogteligging (en volume) op deze locatie de respons niet verandert.

Actieve beïnvloeding van de processen op de buitendelta kan wel worden verkregen door een andere locatie van de suppletie te kiezen. Op basis van de morfodynamische modellering van verschillende suppletievarianten kan worden geconcludeerd dat alle suppleties die richting het zeegat zijn aangelegd, en daardoor onder directe invloed staan van de zeegat-gedreven stroming, een veel grotere respons en dynamiek op de buitendelta veroorzaken. Deze suppleties beïnvloeden bestaande geulen (zoals het Westgat) of kunnen zelfs nieuwe geulvorming veroorzaken. Zo ontstond bij een gemodelleerde variant bij de Zeehondenplaat een nieuwe kortsluitgeul om de Boschplaat heen. De ligging en vorming van geulen en platen kan wel degelijk gestuurd worden door suppleties, maar hieraan zit wel een grote mate van onzekerheid in de voorspelbaarheid van de respons.

Op basis van de conceptuele beschrijving van de werking van de buitendelta (Figuur 3-14) kan de invloed van verschillende suppletievarianten weergegeven worden. Een aanname in onderstaande beschouwing is dat het volume van de suppletie ongeveer gelijk is aan dat van de pilotsuppletie.

Zone I – Eilandkust bovenstrooms (Terschelling);

Een suppletie aangebracht op de bovenstroomse eilandkust wordt door getij en golven verspreid. Het is waarschijnlijk dat de autonome processen zich doorzetten. Het merendeel van dit sediment zal door het langstransport richting het zeegat verplaatsen. De toegenomen sedimentstroom kan er mogelijk voor zorgen dat de eilandstaart terug uitbouwt. Daarnaast zal een deel van het sediment zal zich via de geulen (Boschgat) richting het westelijk deel van het bekken verplaatsen. Sediment dat het Borndiep bereikt verplaatst zich zowel richting de buitendelta en richting het oostelijk deel van het bekken.

Of een dergelijke suppletie zich actief of passief gedraagt is afhankelijk van de respons van de eilandstaart. Dit is op voorhand niet te voorspellen. Als de eilandstaart inderdaad uitbouwt kan dit veranderingen in de daar aanwezige geulen en platen veroorzaken.

Zone II – Ondiepe platform van het Boschgat;

Op basis van de modellering wordt geconcludeerd dat bij een suppletie op het ondiepe platform tussen de staart van Terschelling en de hoofdgeul Borndiep veranderingen in de geulensystemen van Westgat en Boschgat (Oosterom) kunnen optreden. Door het ondiepe gebied geeft een suppletie hier een relatief grote verandering. De suppletie beïnvloedt niet direct de ebstroming maar zorgt ervoor dat de vloedgeulen zich anders kunnen vormen. Dit kan de vorming van secundaire geulen, zoals kortsluitgeulen om de Boschplaat heen veroorzaken. Dit soort geulen geeft een grote impact op de kustlijnen en kan ook grootschalig een verandering in sediment bypassing in gang zetten. Suppleties die hier uitgevoerd worden, worden gecategoriseerd als actieve suppleties.

Zone III – Ebscharen en ebschilden;

Suppleties uitgevoerd in de door het zeegat gedomineerde getijgeulen geven over het algemeen een actieve beïnvloeding van de processen (Harlequin, 2021). De suppleties uitgevoerd in de secundaire ebgeulen (ebscharen) worden snel opgeruimd, waarbij het gesuppleerde materiaal in de ebschilden belandt. Initieel kan dit misschien nog gezien worden als een passieve beïnvloeding, maar het sediment accumuleert in het al aanwezige ebschild. Dit ebschild groeit dan snel uit waardoor ook veranderingen in de omliggende geulen in gang kunnen worden gezet (zie resultaten modellering in Hoofdstuk.5). Op langere tijdschalen kunnen deze suppleties het autonome gedrag veranderen. Het aanbrengen van suppleties op deze locaties geeft een grotere onzekerheid in de toekomstige ontwikkeling van de buitendelta.

Een variant hierop is de suppletie in de keel van het zeegat aan te brengen. Een voordeel hiervan is dat het sediment gedeeltelijk zeewaarts (de buitendelta op) en gedeeltelijk het

bekken in wordt getransporteerd. Het sedimentvolume wordt dan veel beter verdeeld over het gehele systeem. De effecten op de autonome ontwikkeling zullen dan veel kleiner zijn dan bij suppletie in de ebscharen. Met behulp van deze suppleties is het ook mogelijk het sedimenttransport richting het bekken te vergroten.

Zone IV – Rand van de buitendelta;

De pilotsuppletie is hierbij aangebracht op de rand van de buitendelta, zoals bij de pilotsuppletie. Evaluatie daarvan laat zien dat de suppletie zich passief gedraagt. Er vindt geen directe beïnvloeding van de autonome processen plaats en door het geleidelijk opruimen van het suppletievolumes lijkt ook op langere tijdschalen geen verandering in dynamiek van de buitendelta op te treden. Suppleties in deze zone kunnen dus relatief veilig worden aangebracht zonder risico van grootschalige beïnvloeding van het systeem.

Zone V – Buitendeltaplatform (Bornrif);

Suppleren op het buitendeltaplatform geeft geen beïnvloeding van de grootschalige stromingen. Het is daarom onwaarschijnlijk dat een grootschalige beïnvloeding van het systeem zal optreden. Suppleties die hier aangebracht worden kunnen rechtstreeks bijdragen aan het vergroten van de sedimentstroom richting het eiland (Zone VI – Aanlandingsgebied van banken). Voor voeding van de eilanden, zonder direct op het eiland te suppleren, is deze locatie het meest geschikt.

6.1.3 Toetsing van hypothesen

Er zijn voorafgaand aan de pilotsuppletie drie hypothesen opgesteld die hieronder worden getoetst:

Het zand van de pilotsuppletie zal zich vooral verspreiden door golfgedreven transport en in mindere mate door getijwerking.

Gedeeltelijk correct. Het getij door het zeegat is niet direct van belang, maar het Noordzegetij speelt wel een rol. Door de aanleg van de suppletie aan de zeezijde van het gestabiliseerde ebschild ligt deze suppletie net buiten het bereik van de getijstroming die door het zeegat aangedreven wordt. De zeegat-gedreven getijstroming is dan ook niet direct van belang voor de verspreiding van het suppletiemateriaal. Golven spelen wel een belangrijke rol. Golfbreking op de suppletie woelt sediment op, dat door de golfgedreven stromingen en het kustlangse Noordzee getij verplaatst. Deze sedimenttransporten verplaatsen zich hoofdzakelijk in (noord)oostelijke richting, waar het bijdraagt aan de sedimentatie van het ebschild.

Ter hoogte van de locatie van de pilotsuppletie is voldoende dynamiek aanwezig om van de suppletie te kunnen leren.

Gedeeltelijk correct. De pilotsuppletie vertoont eigenlijk een beperkte dynamiek. De suppletie verplaatst niet, maar erodeert wel. In een periode van 2,5 jaar bedraagt het volumeverlies van de suppletie meer dan 2 miljoen m³. Doordat de dynamiek beperkt is, is de trendmatige erosie van de suppletie juist goed, over meerdere jaren, te volgen in de metingen. Hierdoor geeft de suppletie veel inzicht in de werking van het systeem en de invloed van de suppletie hierop.

De vorming van de ebgeul (over ebschild) wordt versterkt door de pilotsuppletie.

Niet correct. De suppletie oefent geen directe invloed op de ebgeul uit. Het systeem van ebschild en -geul was voor aanleg van de suppletie al gestabiliseerd. Hierdoor is de suppletie buiten het directe bereik van de ebgeul aangelegd. Dit wordt verder versterkt door de oostelijke rotatie van de ebgeul die zich daardoor van de suppletie af verplaatst.

6.2 Conclusies

Onderzoek naar aanleiding van de pilotsuppletie en de uitgebreide Kustgenese 2.0 metingen heeft veel inzicht opgeleverd in de morfologische werking van de zeegaten. De uitgevoerde metingen zijn uniek (in de wereld) en geven inzicht in de mesoschaal dynamiek van zeegaten.

De uitgevoerde suppletie laat zien dat een suppletie van 5 miljoen m³ aangelegd kan worden op de buitendelta zonder het autonome gedrag van de buitendelta te significant te beïnvloeden. De pilotsuppletie vertoont geen grootschalige dynamiek, maar wel een trend van erosie. Het volume neemt af van 5 miljoen m³ na aanleg in Februari 2018 tot 2,9 miljoen m³ in Juli 2021. Door plaatsing van de pilotsuppletie op de rand van de buitendelta, gedraagt deze zich als een passieve suppletie: er vindt geen beïnvloeding van de autonome processen en dynamiek plaats.

Buitendelta suppleties kunnen ingezet worden om sedimentuitwisseling in en rond een zeegat te beïnvloeden. Dit kan met weinig beïnvloeding van de natuurlijke processen (passief suppleren) of juist door beïnvloeding van de natuurlijke processen (actief suppleren). Actief suppleren geeft de mogelijkheid het systeem dusdanig te beïnvloeden dat er meer sediment richting de eilandkusten beweegt (bijv. vergroten van de aanlandingsvolumes of frequentie) of dat de sedimentstroom van buitendelta naar bekken toeneemt. Actieve beïnvloeding van de processen op de buitendelta schept mogelijkheden, maar geeft ook risico's. Het is niet altijd voorspelbaar hoe op lange termijn de morfologische veranderingen uitpakken.

De ontwikkeling van innovatieve meettechnieken zoals de Xband radar, maakt het mogelijk morfologische verandering continue en op afstand in te winnen en te analyseren. De radar diepteschattingen zijn voldoende nauwkeurig om geul- en plaatbewegingen te volgen en kwantificeren. Hierdoor zijn ze een nuttige aanvulling op de 3-jaarlijkse Vaklodingen.

De combinatie van uitgebreide metingen en modellering geeft veel inzicht in de morfologische veranderingen op de buitendelta en de maatgevende processen. Zowel morfostatische als morfodynamische modellering zijn succesvol ingezet om de pilotsuppletie beter te begrijpen. Morfostatische modellering geeft daarbij een gedetailleerd beeld, hoge resolutie in tijd en ruimte, van de sedimenttransportpatronen en de onderliggende processen. De morfologische modellering blijkt succesvol in het reproduceren van de middellange termijn veranderingen (tot een jaar of 4). Deze simulaties verschaffen veel inzicht in de werking van buitendelta-suppleties.

6.3 Aanbevelingen

1. Zet de jaarlijkse metingen in het zeegat van Ameland door

De reguliere monitoring van de zeegaten heeft een interval van 3 jaar. Deze frequentie is voldoende om grootschalige dynamiek van het zeegat te monitoren. De jaarlijkse metingen van het zeegat van Ameland geven veel inzicht in de kleinschalige dynamiek en heeft ons vele unieke inzichten in buitendelta gedrag verschaft. Vanuit dit oogpunt is het doorzetten van de jaarlijkse meetfrequentie aan te bevelen. Hier speelt mee dat in de toekomst nog relatief grote veranderingen te verwachten zijn in ligging van de hoofdgeul, verplaatsing van de ebschilden en mogelijke vorming van een nieuw Boschgat rond de eilandstaart van Terschelling.

2. Verhoog de meetfrequentie voorafgaand bij voornemen tot suppleren op een buitendelta.

De pilotsuppletie op de buitendelta van Ameland laat zien dat zo'n suppletie kan worden toegepast zonder dat het autonome gedrag van het systeem verandert. De modellering laat

ook zien dat de locatie van de suppletie een belangrijke rol speelt in de mogelijke beïnvloeding. Het (tijdelijk) verhogen van de meetfrequentie is aan te bevelen als er een suppletie gepland wordt op een andere buitendelta. Alleen zo kunnen de processen op de buitendelta in voldoende detail worden geanalyseerd.

3. Verbeter het modelinstrumentarium zodat simulaties langer dan vier jaar mogelijk worden

De morfologische modellering blijkt succesvol in het reproduceren van de middellange termijn veranderingen, maar op langere tijdschalen (> 4 jaar) gaan de modelsimulaties in toenemende mate afwijken van de observaties. De onderschatting van de golfgedomineerde morfologische veranderingen lijkt hier een rol te spelen. Het verbeteren van het modelinstrumentarium zodat langere termijn simulaties mogelijk worden is essentieel. Bij modelverbetering kan enerzijds worden gedacht aan verbetering van de golfgedreven processen in de modelformuleringen en anderzijds aan een verbeterde aansturing van de modellen waarbij stormen in meer detail worden meegenomen (brute-force simuleren Luijendijk, 2019).

7 Referenties

- Bak, J. (2017), Nourishment strategies for Ameland Inlet, Master's thesis, Delft University of Technology.
- Barsingherom, S., Briek, J., Huizinga, M.A., Hut, J., Noordstra, P., 2003. Meting Bornrif/Borndiep september 1996. Project Strobodi. Report 98.006 (in Dutch). Rijkswaterstaat, directie Noord-Nederland, Delftzijl.
- Brakenhoff, L. B. (2021), Bedforms and their effect on sediment transport on ebb-tidal deltas, Phd, Universiteit Utrecht.
- Brakenhoff, L., M. Kleinhans, G. Ruessink, and M. Vegt (2019b), Spatio-temporal characteristics of small-scale wave-current ripples on the Ameland ebb-tidal delta, *Earth Surface Processes and Landforms*, doi:10.1002/esp.4802.
- Brakenhoff, L., M. Kleinhans, G. Ruessink, and M. van der Vegt (2020b), Spatio-temporal characteristics of small-scale wave-current ripples on the Ameland ebb-tidal delta, *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(5), 1248–1261, doi:10.1002/esp.4802.
- Brakenhoff, L., G. Ruessink, and M. van der Vegt (2019a), Characteristics of saw-tooth bars on the ebb-tidal deltas of the Wadden Islands, *Ocean Dynamics*, doi:10.1007/s10236-019-01315-w.
- Brakenhoff, L., R. Schrijvershof, J. van der Werf, B. Grasmeijer, G. Ruessink, and M. van der Vegt (2020a), From ripples to large-scale sand transport: The effects of bedform-related roughness on hydrodynamics and sediment transport patterns in delft3d, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(11), 1–25, doi:10.3390/jmse8110892.
- Briek, J., Huizinga, M.A., Hut, J., 2003. Stroommeting Zeegat van Ameland 2001. RIKZ-report 2003-169 (in Dutch), Rijkswaterstaat, Directie Noord-Nederland, Delftzijl.
- Buonaiuto, F. S., & Kraus, N. C., 2003. Limiting slopes and depths at ebb-tidal shoals. *Coastal Engineering*, 48(1), 51–65. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00160-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00160-6)
- Cheung, K.F., Gerritsen, F., Cleveringa, J., 2007. Morphodynamics and sand bypassing at Ameland Inlet, The Netherlands. *Journal of Coastal Research* 23(1), 106-118.
- Davis, R.A., & Hayes, M.O., 1984. What is a wave-dominated coast? *Marine Geology* 60, 313-329.
- De Graaff, R.F., 2009. SBW Wadden Sea, water level modelling; Calibration hydrodynamic model. Technical report, Deltares, Delft.
- De Ruig, J.H.M., 1998. Coastline management in The Netherlands: human use versus natural dynamics. *Journal of Coastal Conservation*, 4 (2): 127-134.
- De Vriend, 1991. Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour, Part 1: physical processes. *Journal of Hydraulic Research* 29, p. 727-740.

- De Wit, F. P., M. Tissier, and A. J. Reniers (2019), Characterizing wave shape evolution on an ebb-tidal shoal, *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 1–20, doi: 10.3390/jmse7100367.
- De Wit, F. P., M. Tissier, and A. Reniers (2020), The relationship between sea-swell bound wave height and wave shape, *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(9), doi: 10.3390/JMSE8090643.
- Duran Matute M., Gerkema T., de Boer G.J., Nauw J.J., Gräwe U., 2014. Residual circulation and freshwater transport in the Dutch Wadden Sea: a numerical modelling study. *Ocean Sciences* 10 (4), 611–632.
- Ebbens, E. (2019). Tussenrapportage Pilotsuppletie Buitendelta Amelanders Zeegat. Rijkswaterstaat. RWS Bedrijfsinformatie, 90 p.
- Elias, E.P.L., 2017a. Stroming en sedimenttransport langs de Boschplaat op Terschelling. Rapport 11200878-000, Deltares, Delft, 60p.
- Elias, E.P.L., 2017b Understanding the present day morphodynamics of Ameland inlet, Rapport 1220339-006-ZKS-0006, 46 p.
- Elias, E.P.L., 2020a, Systeemsuppleties op Eilandkoppen. Synthese, Rapport 11205236-005-ZKS-0009, Deltares Delft, 43p.
- Elias, E.P.L., 2020b. De morfologische ontwikkeling van de Boschplaat – Terschelling, Rapport 11205236-003, Deltares, Delft., 49 p.
- Elias, E.P.L., 2018. Understanding the present-day morphodynamics of Ameland Inlet – part 2. *Kustgenese 2.0*, product ZG-B04. Report 1220339-007-ZKS-0007, Deltares, Delft.
- Elias E.P.L., Pearson, S., Van der Spek, A.J.F., Pluis, S., 2021. Understanding meso-scale processes at a mixed-energy tide-dominated tidal inlet: Ameland Inlet, the Netherlands. Submitted to *Ocean & Coastal Management*.
- Elias, E.P.L., Roelvink, F., Pearson, S., 2020. Systeemsuppleties op Eilandkoppen Modelleringsuppletievarianten Texel en Ameland, Rapport 11205236-005-ZKS-0006, Deltares, Delft, 202 p.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., 2020a. Understanding the morphological processes at Ameland Inlet. *Kustgenese 2.0 synthesis of the tidal inlet research*, Report 1220339-008-ZKS-008, Deltares, Delft, 82 p.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F, Wang, Pearson, S., 2020b. Technisch advies Rol en Mogelijkheden Buitendelta's voor het Kustbeheer. Ten behoeve van beleidsadvies *Kustgenese 2.0*. Rapport 1220339-009-ZKS-0006, Deltares Delft, 32 p.
- Elias, E.P.L. & Tonnon, P.K., 2016. Beschrijving kennisbasis modellering van zeegaten t.b.v. *Kustgenese 2*. Report 1230381-000, Deltares, Delft. 66 pp.
- Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Pearson, S., Cleveringa, J., 2019. Understanding sediment bypassing processes through analysis of high-frequency observations of Ameland Inlet, the Netherlands. *Marine Geology* 415.

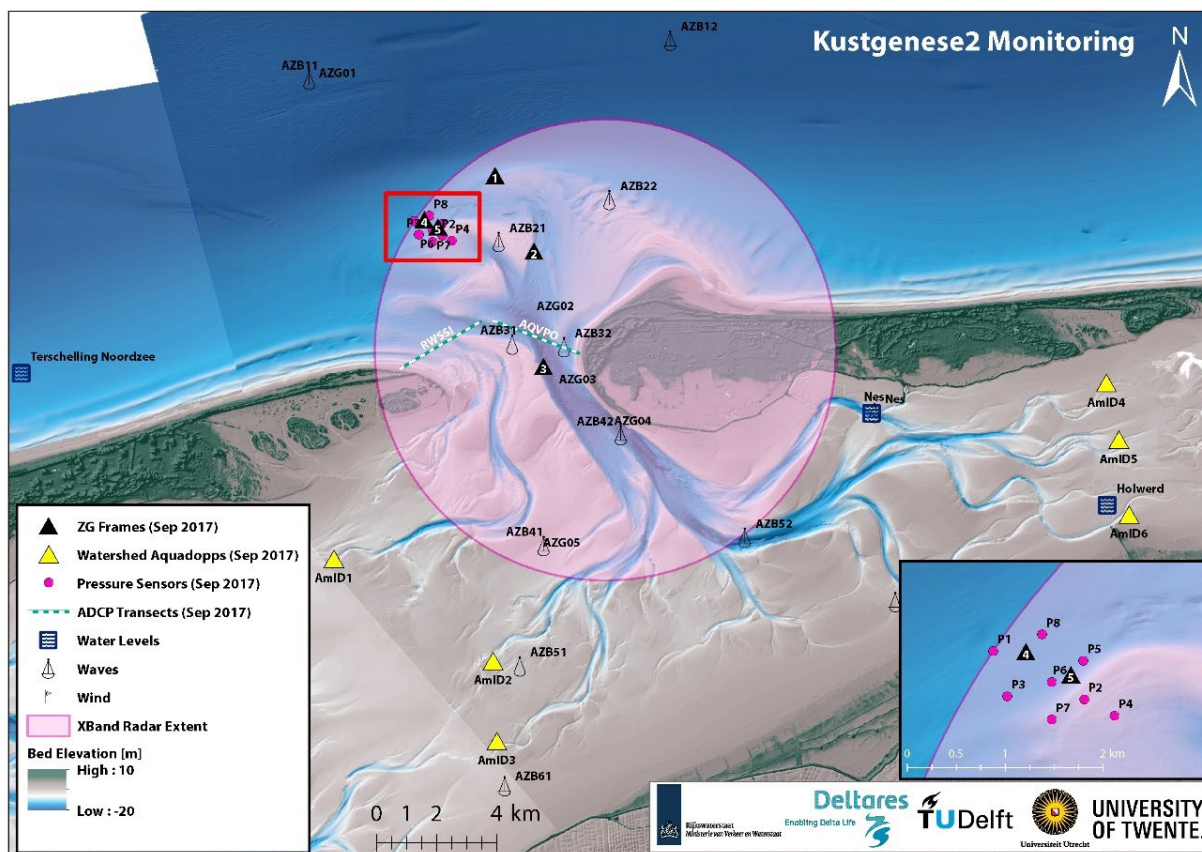
- Eysink, W. D., 1993. Impact of Sea Level Rise on the Morphology of the Wadden Sea in the Scope of its Ecological Function. General Considerations on Hydraulic Conditions, Sediment transports, Sand Balance, Bed Composition and Impact of Sea Level Rise on Tidal Flats. Report ISOS*2, Project Phase 4. Rijkswaterstaat, National Institute for Coastal and Marine Management RIKZ, The Hague.
- Ernstsen, V. B., Lefebvre, A., Bartholdy, J., Bartholomä, A., & Winter, C., 2011. Spatiotemporal height variations of large-scale bedforms in the Grådyb tidal inlet channel (Denmark) a case study on coastal system impact. *Journal of Coastal Research*, 746-750.
- Ernstsen, V. B., Noormets, R., Winter, C., Hebbeln, D., Bartholomä, A., Flemming, B. W., & Bartholdy, J., 2006. Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea. *Geo-Marine Letters*, 26(3), 151-163.
- Fraccascia, S., Winter, C., Ernstsen, V. B., & Hebbeln, D., 2016. Residual currents and bedform migration in a natural tidal inlet (Knudedyb, Danish Wadden Sea). *Geomorphology*, 271, 74–83. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.017>
- FitzGerald, D.M., 1982. Sediment bypassing at mixed energy tidal inlets. *Proceedings of 18th International Conference on Coastal Engineering*, Cape Town, pp. 1094-1118.
- FitzGerald, D.M., 1988. Shoreline erosional-depositional processes associated with tidal inlets. In: Aubrey, D., Weishar, L. (Eds.), *Hydrodynamics and Sediment Dynamics of Tidal Inlets. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies 29*. Springer, New York, pp. 186-225.
- FitzGerald, D.M., 1996. Geomorphic variability and morphologic and sedimentologic controls on tidal inlets. In: Mehta, A.J. (Ed.). *Understanding Physical Processes at Tidal Inlets Based on Contributions by Panel on Scoping Field and Laboratory Investigations in Coastal Inlet Research. Journal of Coastal Research SI 23*, 47-71.
- Gaudio, D. J., & Kana, T. W., 2001. Shoal bypassing in mixed energy inlets: Geomorphic variables and empirical predictions for nine South Carolina inlets. *Journal of Coastal Research*, 280-291.
- Gawehn, M., 2020. 1220339-007-ZKS-0005_v2.0-Ontwikkeling en toepassing XBand radar voor morfologische analyses Amelanders Zeegat, Deltares, Delft.
- Gawehn, M., 2021. Ontwikkeling en toepassing X-Band radar voor morfologische analyse van het Amelanders Zeegat. Eindrapportage ten behoeve van Kustgenese 2.0. Deltares report 1220339-007-ZKS-005, Deltares, Delft, 25 p.
- Gawehn, M., van Dongeren, A., de Vries, S., Swinkels, C., Hoekstra, R., Aarninkhof, S., & Friedman, J., 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. *Coastal Engineering*, 159,
- Harlequin, D. (2021). *Morphodynamic Modelling of the Ameland Ebb-Tidal Delta. An Assessment of the 2019 Pilot Nourishment*. Delft University of Technology.
- Hayes, M.O., 1975. Morphology of sand accumulation in estuaries: an introduction to the symposium. In: Cronin, L.E. (Ed.), *Estuarine Research*, Vol. 2. Academic Press, New York, pp. 3-22.

- Hayes, M.O., 1979. Barrier Island morphology as a function of tidal and wave regime. In: Leatherman, S.P. (Ed.), *Barrier Islands: from the Gulf of St Lawrence to the Gulf of Mexico*. Academic Press, New York, pp. 1-27.
- Hayes, M.O., FitzGerald, D.M., 2013. Origin, evolution, and classification of tidal inlets. In: Kana, T., Michel, J., Voulgaris, G. (Eds.), *Symposium in Applied Coastal Geomorphology to Honor Miles O. Hayes*. *Journal of Coastal Research* SI 69, 14-33.
- Herrling G., Winter, C., 2017. Spatiotemporal variability of sedimentology and morphology in the East Frisian barrier island system. *Geo-Marine Letters* 37, 137–149.
- Herrling, G., Winter, C., 2018. Tidal inlet sediment bypassing at mixed-energy barrier islands. *Coast. Eng.* 140, 342–354.
- Hillen, R. & de Haan, Tj., 1993. Development and implementation of the coastal defense policy for the Netherlands. In: Hillen, R. & Verhagen, H.J. (eds.), *Coastlines of the southern North Sea*, p. 118-201. American Society of Civil Engineers (New York, NY).
- Hillen, R. & Roelse, P., 1995. Dynamic Preservation of the Coastline in the Netherlands. *Journal of Coastal Conservation*, 1 (1): 17-28
- Hine, A. C., 1975. Bedform distribution and migration patterns on tidal deltas in the Chatham Harbor Estuary, Cape Cod, Massachusetts, *Estuarine Research*, 2: 235-253.
- Hubbard, D.K., Oertel, G., Nummedal, D., 1979. The role of waves and tidal currents in the development of tidal-inlet sedimentary structures and sand body geometry: examples from North Carolina, South Carolina and Georgia. *Journal of Sedimentary Petrology* 49, 1073-1092.
- Holzhauser, H. (2017). Meetlocaties benthos bemonstering van de buitendelta van Ameland in September 2017 voorafgaand aan de proefsuppletie. University of Twente, The Netherlands. (in Dutch)
- Israël, C.G., Dunsbergen, D.W., 1999. Cyclic morphological development of the Ameland Inlet, The Netherlands. *Proceedings of Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Genova, Italy, Volume 2, pp. 705-714.
- Koch, M., Niemeyer, H.D., 1978. Sturmtiden-Strommessungen im Bereich des Norderneyer Seegats. *Forschungsstelle Norderney, Jahresbericht Nr. 29*, 91–108.
- Krögel, F., 1995. Sedimentverteilung und Morphodynamik des Otzumer Ebbdeltas (südliche Nordsee). *Senckenbergiana Maritima* 25 (4/6), 127-135.
- Laan, S.C., 2019. Understanding coastal dynamics at an ebb-tidal delta in the Wadden Sea. A case study of Schiermonnikoog NW with Delft3D Flexible Mesh. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 105 pp.
- Lambregts P. (2021). Sediment bypassing at Ameland inlet. And the role of an ebb-tidal delta nourishment. Delft University of Technology
- Lefebvre, A., Ernsten, V. B., & Winter, C., 2013. Estimation of roughness lengths and flow separation over compound bedforms in a natural-tidal inlet. *Continental Shelf Research*, 61, 98-111.

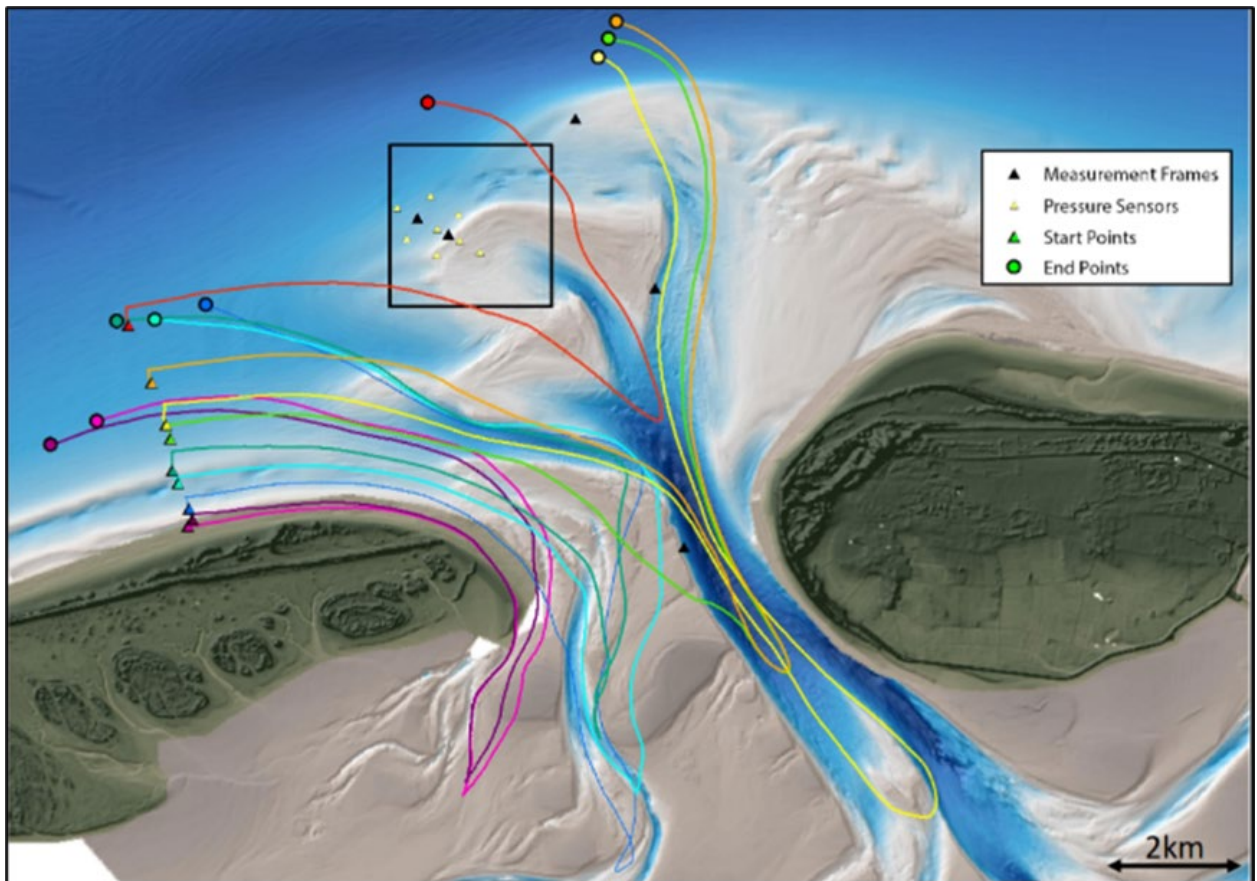
- Lesser, G.R., J.A. Roelvink, J.A.T.M. van Kester, and Stelling, G.S., 2004, Development and validation of a three-dimensional morphological model: *Coastal Engineering*, v. 51, p. 883–915.
- Nederhoff, C.M., Schrijvershof, R., Tonnon, P.K., van der Werf, J.J., 2019. The Coastal Genesis II Terschelling - Ameland inlet (CGII-TA) model Model setup, calibration and validation of a hydrodynamic-wave model. Rapport 1220339-008-ZKS-0004, Deltares, Delft, 88p.
- Oertel, G.F., 1975. Ebb-tidal deltas of Georgia Estuaries. In: Cronin, L.E. (ed.): *Estuarine Research*, vol. 2. Academic Press, New York, pp. 267-276.
- Oertel, G.F., 1977. Geomorphic cycles in ebb deltas and related patterns of shore erosion and accretion. *Journal of Sedimentary Petrology* 47, 1121-1131.
- Pearson, S. G., B. van Prooijen, F. P. de Wit, H. Meijer-Holzhauer, A. de Looft, and Z. B. Wang (2019), Observations of Suspended Particle Size Distribution on an Energetic Ebb-Tidal Delta, *Coastal Sediments 2019*, pp. 1991–2003, doi:10.1142/9789811204487_0172.
- Pearson, S. G., B. C. van Prooijen, E. P. L. Elias, S. Vitousek, and Z. B. Wang (2020), Sediment Connectivity: A Framework for Analyzing Coastal Sediment Transport Pathways, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 125(10), doi:10.1029/2020JF005595.
- Pearson, S. G., B. C. van Prooijen, J. Poleykett, M. Wright, K. Black, and Z. B. Wang (2021a), Tracking fluorescent and ferrimagnetic sediment tracers on an energetic ebb-tidal delta to monitor grain size-selective dispersal, *Ocean & Coastal Management*, 212, 105,835, doi:10.1016/j.ocecoaman.2021.105835.
- Pearson, S. G., R. Verney, B. C. van Prooijen, D. Tran, E. Hendriks, M. Jacquet, and Z. B. Wang (2021b), Characterizing Mixed Sand and Mud Suspensions using Combined Optical and Acoustic Measurements in Estuarine Environments, *Earth and Space Science Open Archive*, p. 36, doi:10.1002/essoar.10506576.1.
- Pugh, D. T., 2004. *Changing Sea Levels: Effects of Tides, Weather, and Climate*. Cambridge University Press (Cambridge, UK): 267 pp.
- Rijkswaterstaat, 1990. A new coastal defense policy for the Netherlands. Rijkswaterstaat, Tidal Waters Division (The Hague): 100 pp.
- Rijkswaterstaat (2020), *Kustgenese 2.0: kennis voor een veilige kust*, Tech. rep., Rijkswaterstaat.
- Ridderinkhof, W., Hoekstra, P., Van der Vegt, M., De Swart, H.E., 2016. Cyclic behaviour of sandy shoals on the ebb-tidal deltas of the Wadden Sea. *Continental Shelf Research* 115, 14-26.
- Sha, L.P., 1989. Variation in ebb-tidal delta morphologies along the west and East Frisian Islands, the Netherlands and Germany. *Marine Geology* 89, 11-28.
- Son, C.S., Flemming, B.W., Bartholomä, A., 2011. Evidence for sediment recirculation on an ebb-tidal delta of the East Frisian barrier-island system, southern North Sea. *Geo Marine Letters* 31, 87–100.
- Spanhoff, R., Biegel, E.J., Van de Graaff, J., Hoekstra, P., 1997. Shoreface nourishment at Terschelling, the Netherlands: feeder berm or breaker berm? In: Thornton, E.B. (Ed.), *Proceedings 3rd International Conference on Coastal Dynamics '97*. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 863- 872.

- Studiedienst Hoorn, 1973. De waterbeweging in het Borndiep. Report 73.3 (in Dutch). Rijkswaterstaat, Studiedienst Hoorn.
- Tanczos, I.C., Aarninkhof, S.G.J., Van der Weck, A.W., 2000. Ruimte voor de Zandrivier (in Dutch). Report Z3200, WL|Delft Hydraulics, Delft.
- Van der Werf, J.J., 2019. Data report Kustgenese 2.0 measurements, Rapport 1220339-015-ZKS-0004, Deltares, Delt, 85 p.
- van Rhijn, M.W., (2019). Sediment transport during the execution of the pilot nourishment Ameland Inlet. MSc. Thesis, Delft University of Technology, Delft, 197 pp.
- Van Rijn, L.C., 2007a, Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of motion, bed roughness, and bed-load transport: *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, p. 19.
- Van Rijn, L.C., 2007b, Unified view of sediment transport by currents and waves. II: Suspended transport: *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, p. 22.
- Van Rijn, L.C., 2007c, Unified view of sediment transport by currents and waves. III: Graded beds: *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, p. 15.
- Van Prooijen, B. C., Tissier, M. F. S., De Wit, F. P., Pearson, S. G., Holzhauer, H., Gawehn, M., Antolínez, J. A. A., De Vet, P. L. M., Reniers, A. J. H. M., Wang, Z. B., Den Heijer, C., Wilmink, R. J. A. & More Authors Measurements of hydrodynamics, sediment, morphology and benthos on Ameland ebb-tidal delta and lower shoreface. *Earth System Science Data*. 12, 4, p. 2775-2786 12 p. <https://doi.org/10.5194/essd-12-2775-2020>.
- Van Sijp, D., 1989. Correcties op Gemeten Eb- en Vloedvolume bij Omrekening naar Gemiddeld Getij in het Friesche Zeegat. Report ANW 89-02 (in Dutch), Rijkswaterstaat, Directie Friesland, Leeuwarden.
- Van Weerdenburg, R.J.A., Pearson, S., van Prooijen, B., Laan, S., Elias, E.P.L., Tonnon, P.K., Wang, Z.B. (2021). Field measurements and numerical modelling of wind-driven exchange flows in a tidal inlet system in the Dutch Wadden Sea. *Ocean & Coastal Management*, vol. 125, 10.1016/j.ocecoaman.2021.105941.
- Walton, T.L., Adams, W.D. 1976. Capacity of inlet outer bars to store sand. Proceedings 15th Coastal Engineering Conference, Honolulu, Hawaii. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 19-37.
- Wang, Y., Yu, Q., Jiao, J., Tonnon, P. K., Wang, Z. B., & Gao, S., 2016. Coupling bedform roughness and sediment grain-size sorting in modelling of tidal inlet incision. *Marine Geology*, 381, 128-141.
- Zijderveld, A., Peters H., 2006. Measurement program Dutch Wadden Sea. Proceedings 30th International Conference on Coastal Engineering, San Diego, USA. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 404-410.

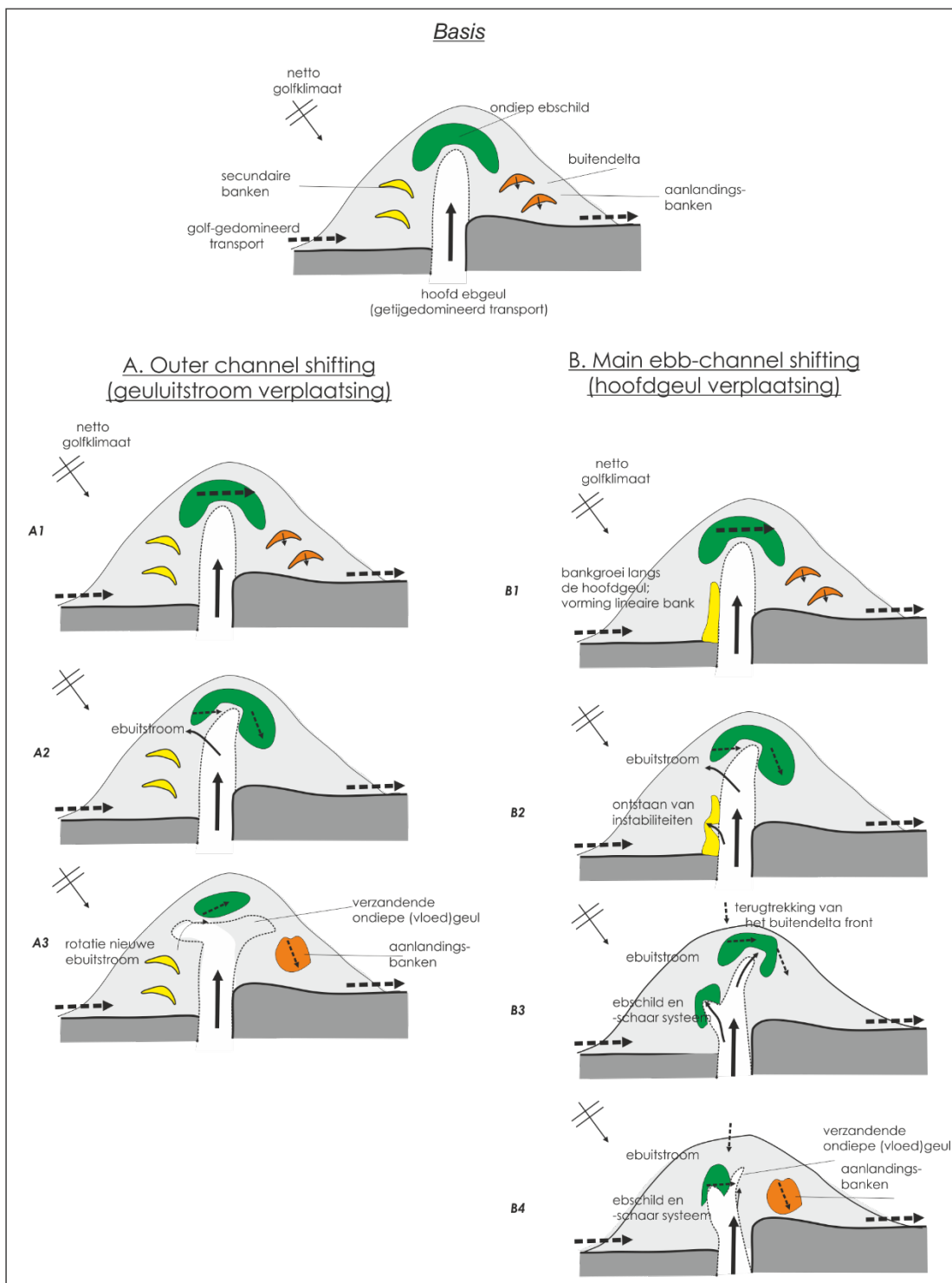
A Kustgenese 2.0 metingen



Figuur A- 1: Overzicht van de ligging van de meetstations tijdens de Kustgenese 2.0 meetcampagne (uit Elias et al. 2019).



Figuur A- 2: Verplaatsing van drifters losgelaten op 9 September 2017 langs een 3-km lange dwarsraai loodrecht op de kust van Terschelling (bron: Van der Werf et al. 2019; de Wit et al. 2018)



Figuur A- 3: Twee variaties van sediment bypassing zoals dit optreedt op de buitendelta's van de Waddenzee zeegaten. Deze modellen zijn gebaseerd op FitzGerald et al. (2000) en aangepast zodat ze representatief zijn voor de Waddenzee (Zoutkamperlaag buitendelta). Model A (links) beschrijft het concept van Outer channel shifting (het meest zeewaartse deel van de geul verplaatst periodiek van west naar oost) en model B (rechts) het proces van main eb-channel shifting waarbij de gehele geul verplaatst

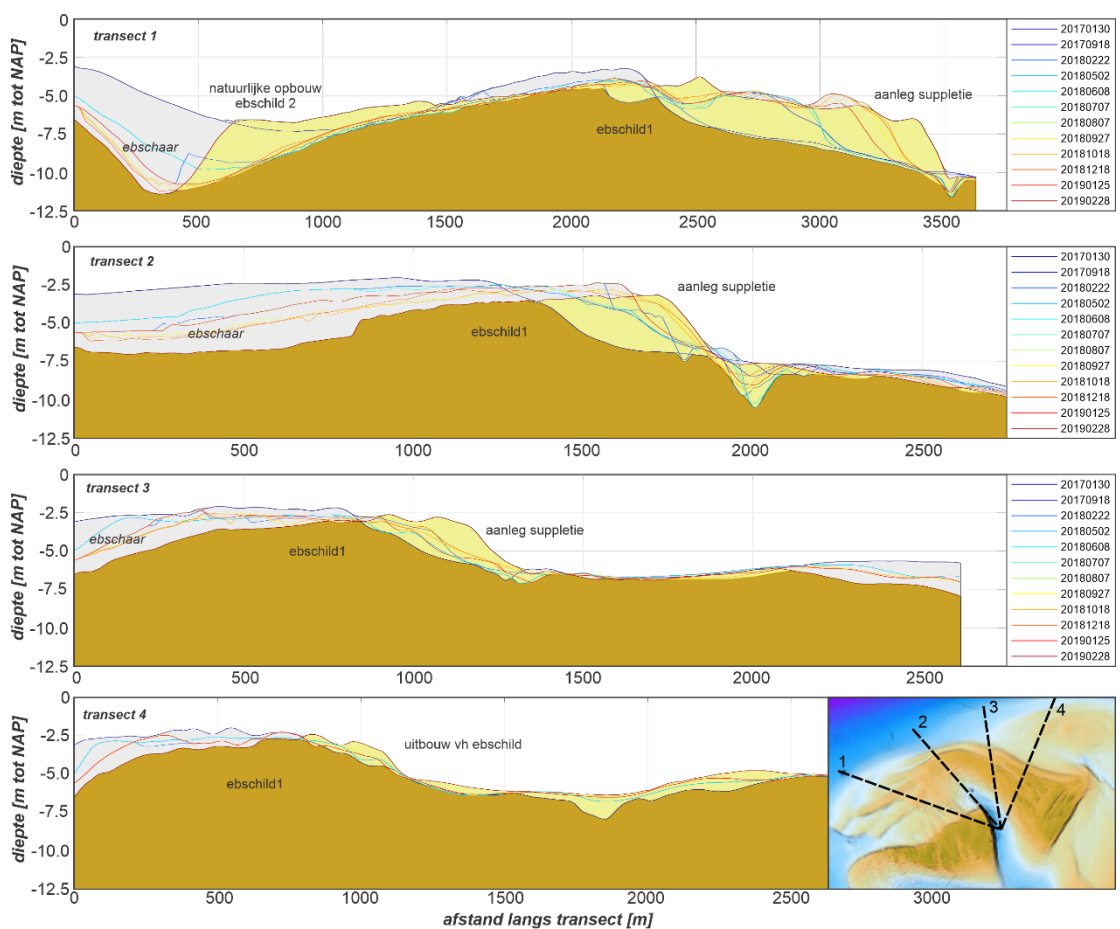
B Bodemmetingen

B.1 Overzicht van de Vaklodingen

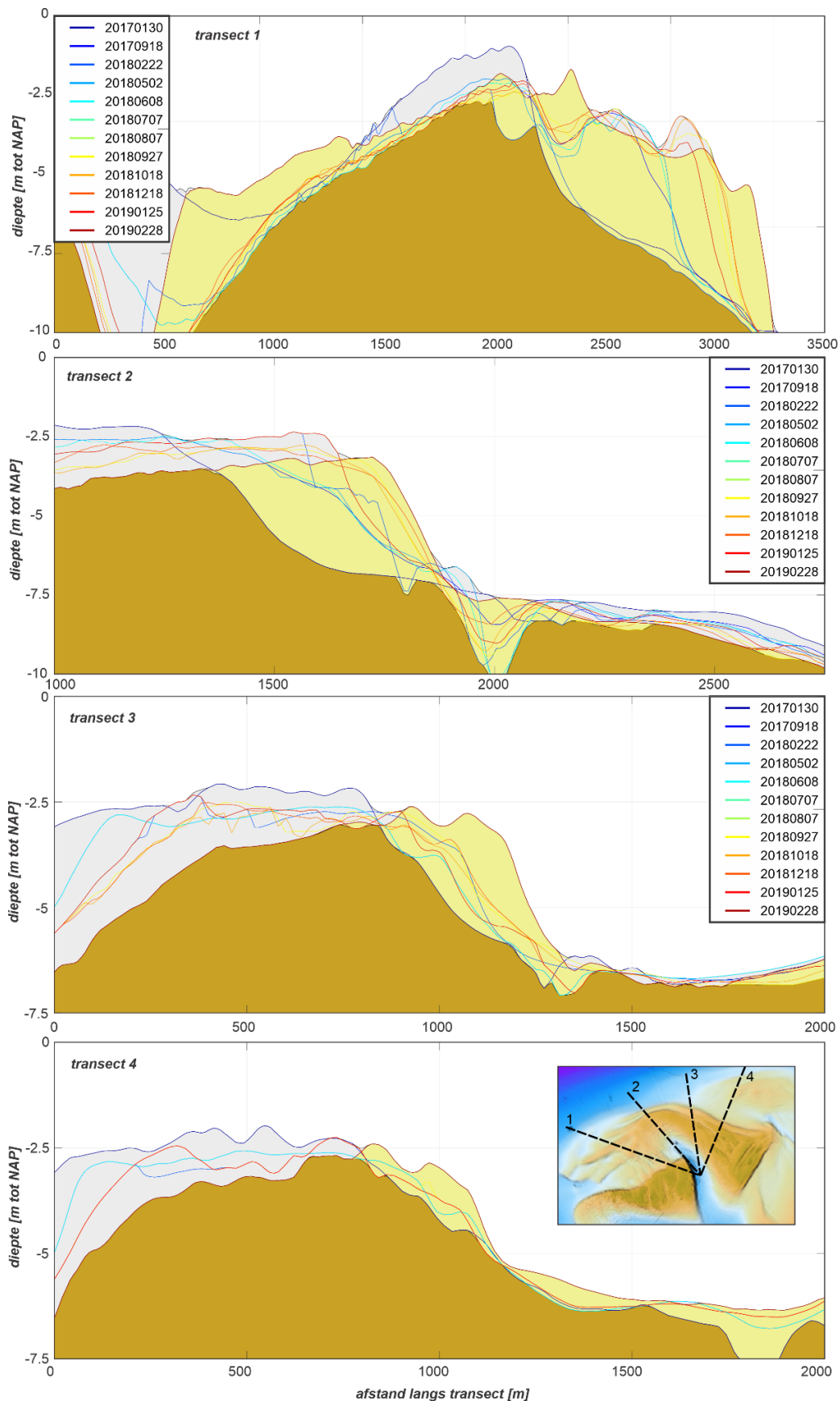
Tabel B-1: Een overzicht van de beschikbare bodemdata voor het bekken en de buitendelta van het zeegat van Ameland onderverdeeld in reguliere Vaklodingen, en bodemdata gemeten in kader van de projecten SBW en Kustgenese 2.0.

Year	Dataset	Coverage		Date	Dataset	Coverage	
		Basin	ETD			Basin	ETD
2005	Vaklodging	X	X	12-09-2016	KG2	-	X
2006	SBW	channels	X	30-01-2017	KG2	X	X
2007	SBW	X	X	18-09-2017	KG2	-	Partial
2008	Vaklodging	X	X	31-05-2018	KG2	-	X
2009	SBW	channels	X	12-10-2018	KG2	-	Partial
2010	SBW	channels	X	12-07-2019	KG2	-	X
2011	Vaklodging	channels	X	2020	Vaklodging	-	X
2014	Vaklodging	X	X	2021	KG2g	-	X

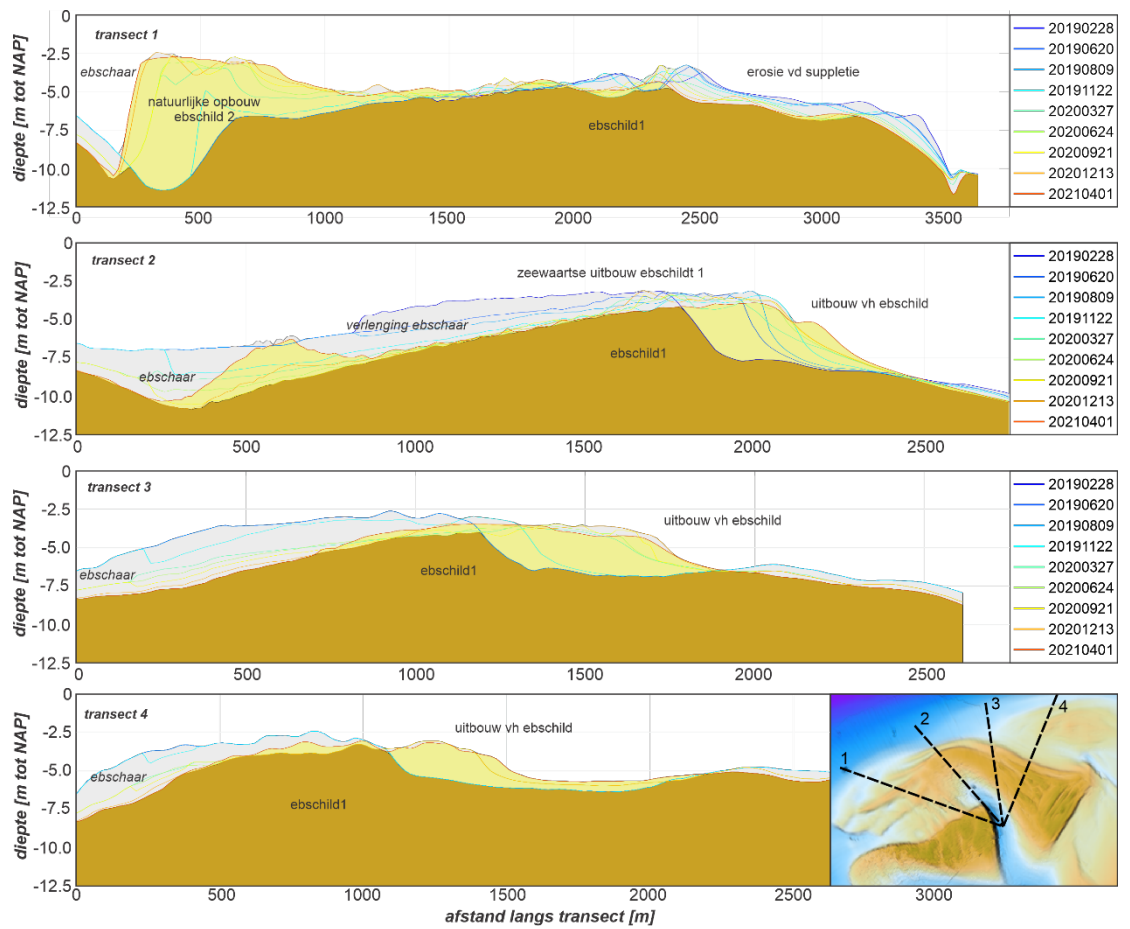
B.2 Bodemdata buitendeltasuppletie



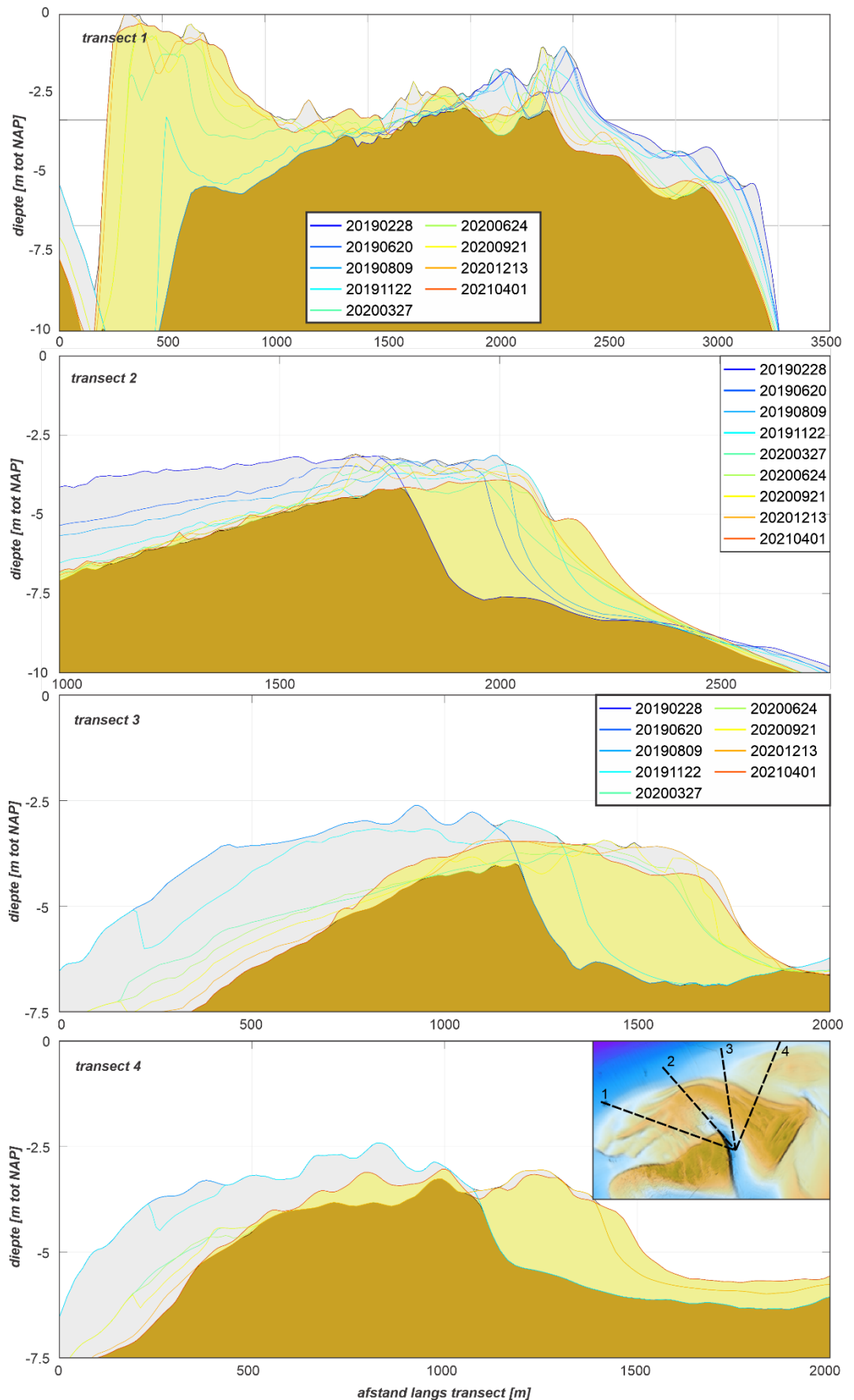
Figuur B- 1: Dwarsdoorsnede van de bodemontwikkeling tijdens aanleg van de suppletie (30-01-2017 - 28-02-2019).



Figuur B- 2: Dwarsdoorsnede (detail) van de bodemontwikkeling tijdens aanleg van de suppletie (30-01-2017 - 28-02-2019).

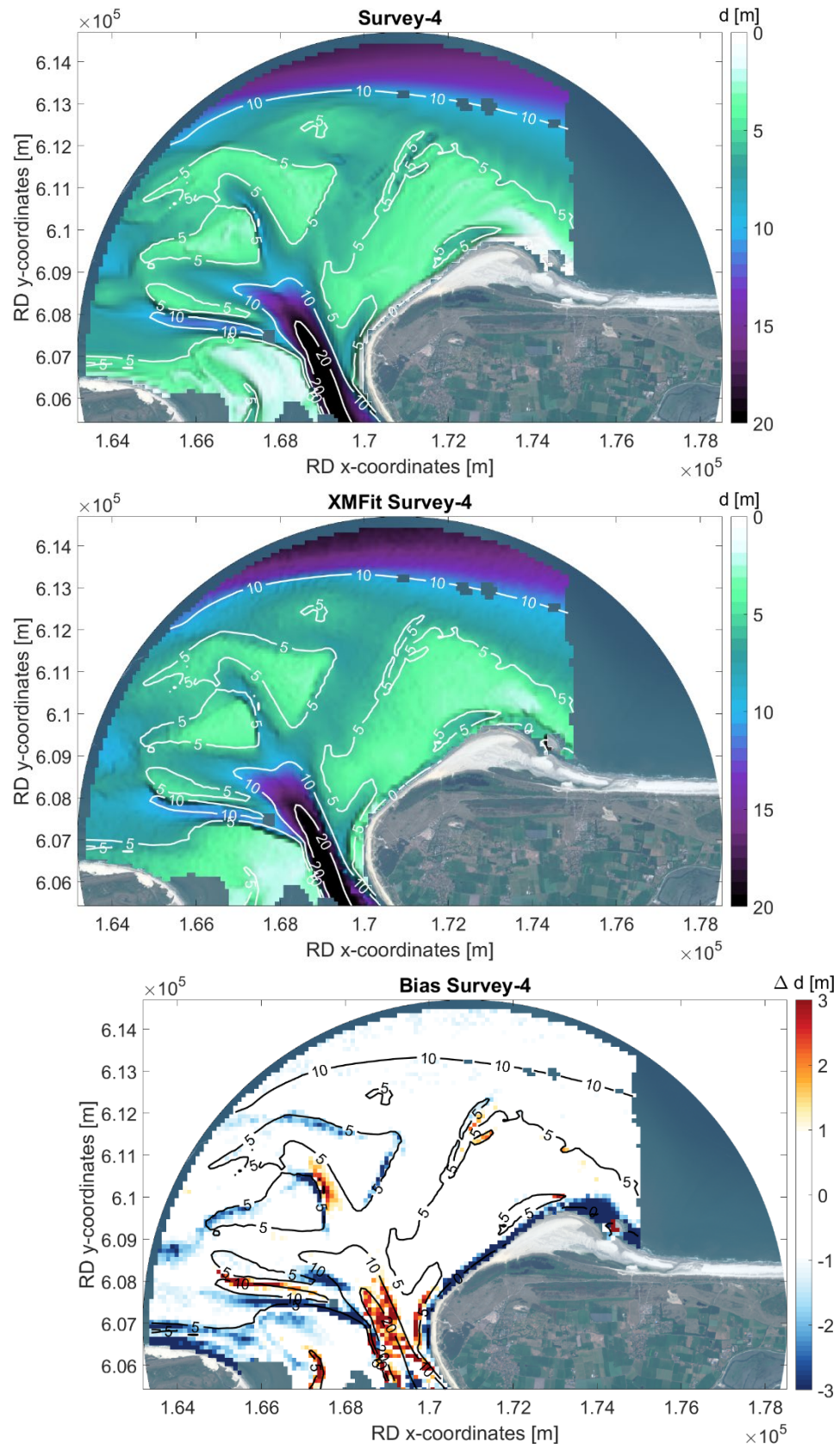


Figuur B-3: Dwarsdoorsnede van de bodemontwikkeling tijdens aanleg van de suppletie (28-02-2019 - 01-04-2021).



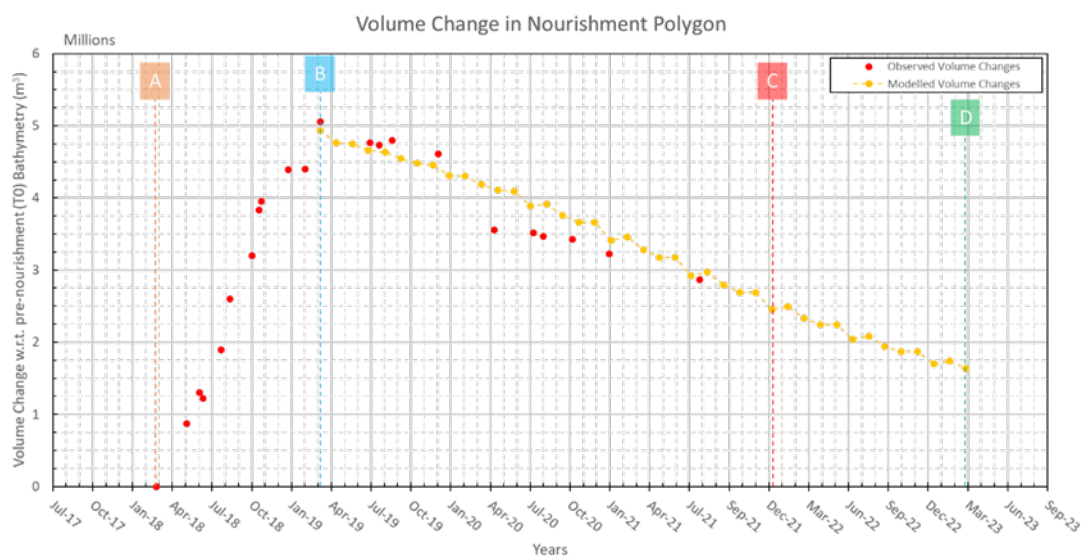
Figuur B-4: Dwarsdoorsnede (detail) van de bodemontwikkeling tijdens aanleg van de suppletie (28-02-2019 - 01-04-2021).

B.3 Bodemdata Radar

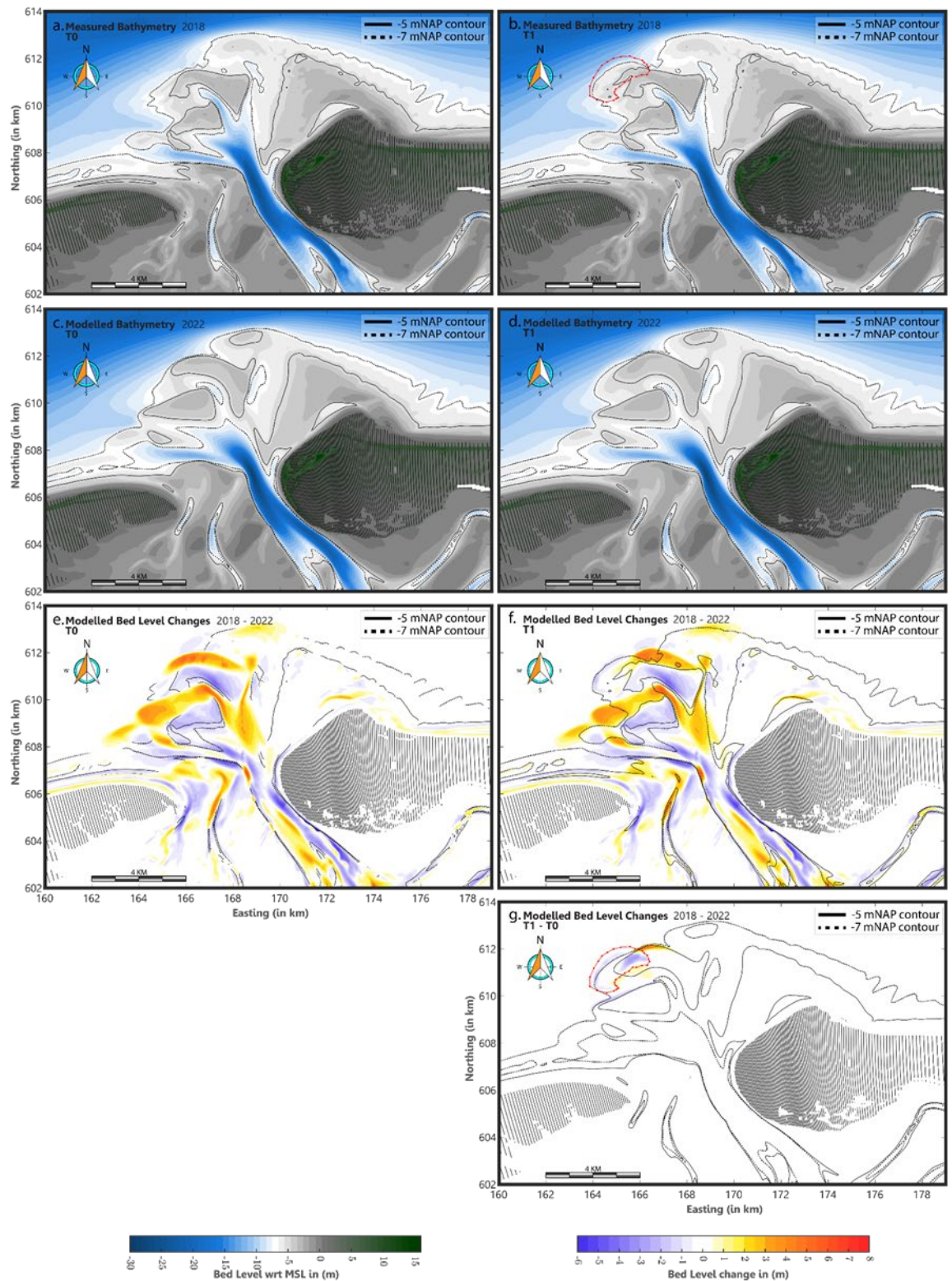


Figuur B- 5: Gemeten bodem in 2020 (boven), geschatte bodem uit X-Band radar (midden) en de verschillen tussen deze 2 bodems (onder).

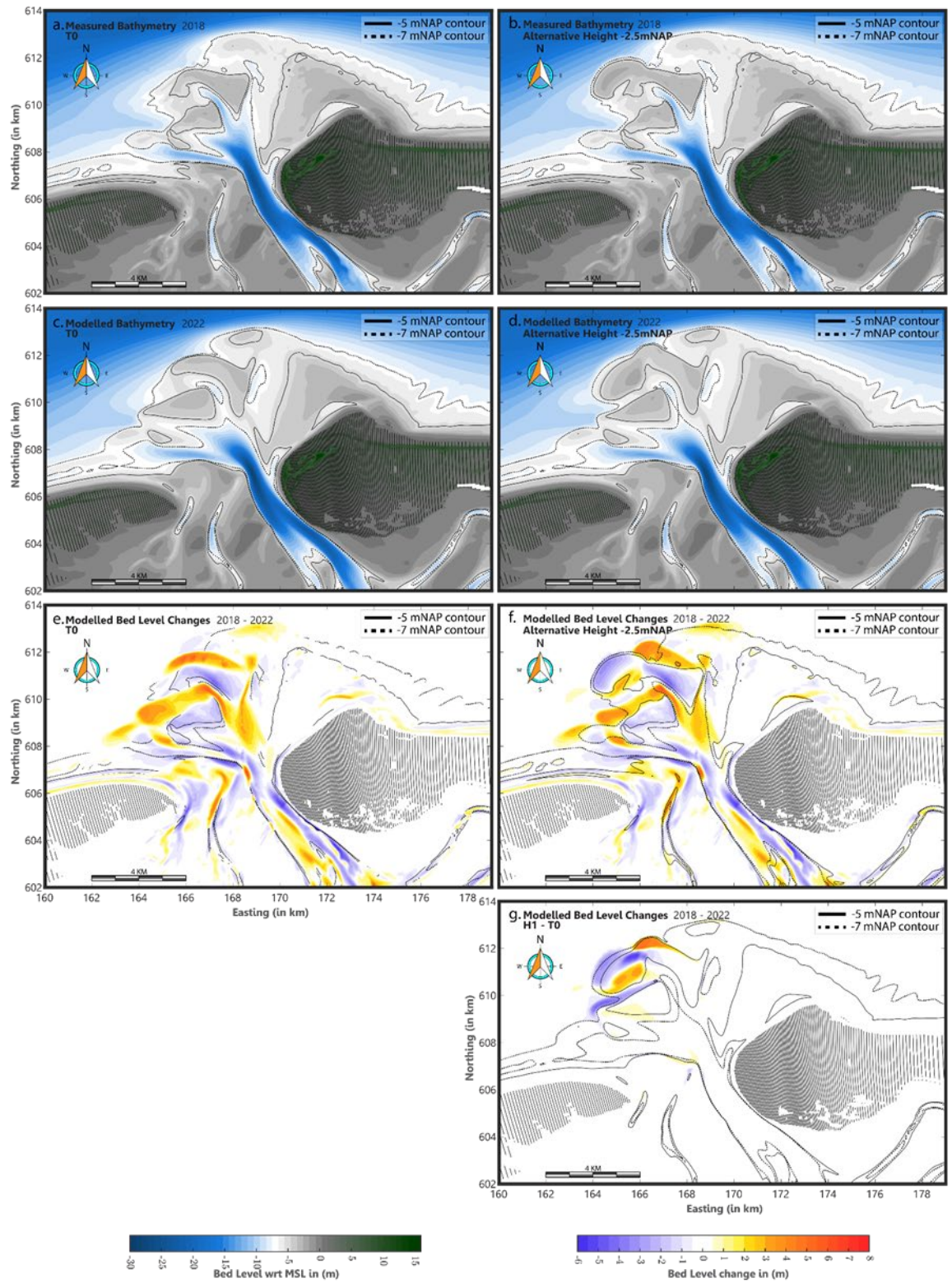
C Morfodynamische modellering.



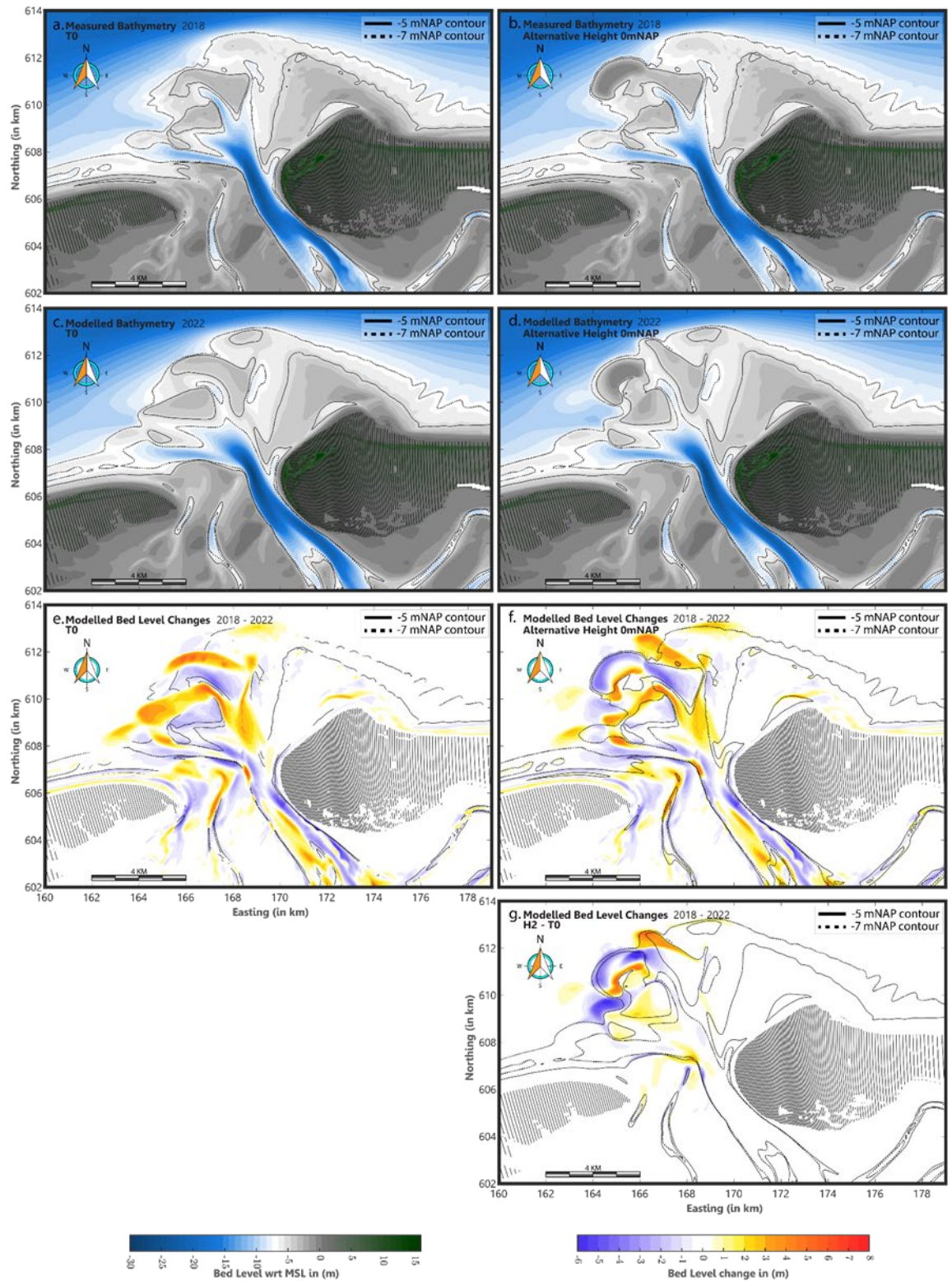
Figuur C- 1: Validatie van de gemodelleerde morfologische respons van de buitendeltasuppletie aan de hand van de volumeverandering van de polygoon om de buitendeltasuppletie. A geeft de start van de aanleg van de suppletie weer. B geeft einde aanleg en begin van de morfologische simulatie. D geeft het einde van de simulatie weer.



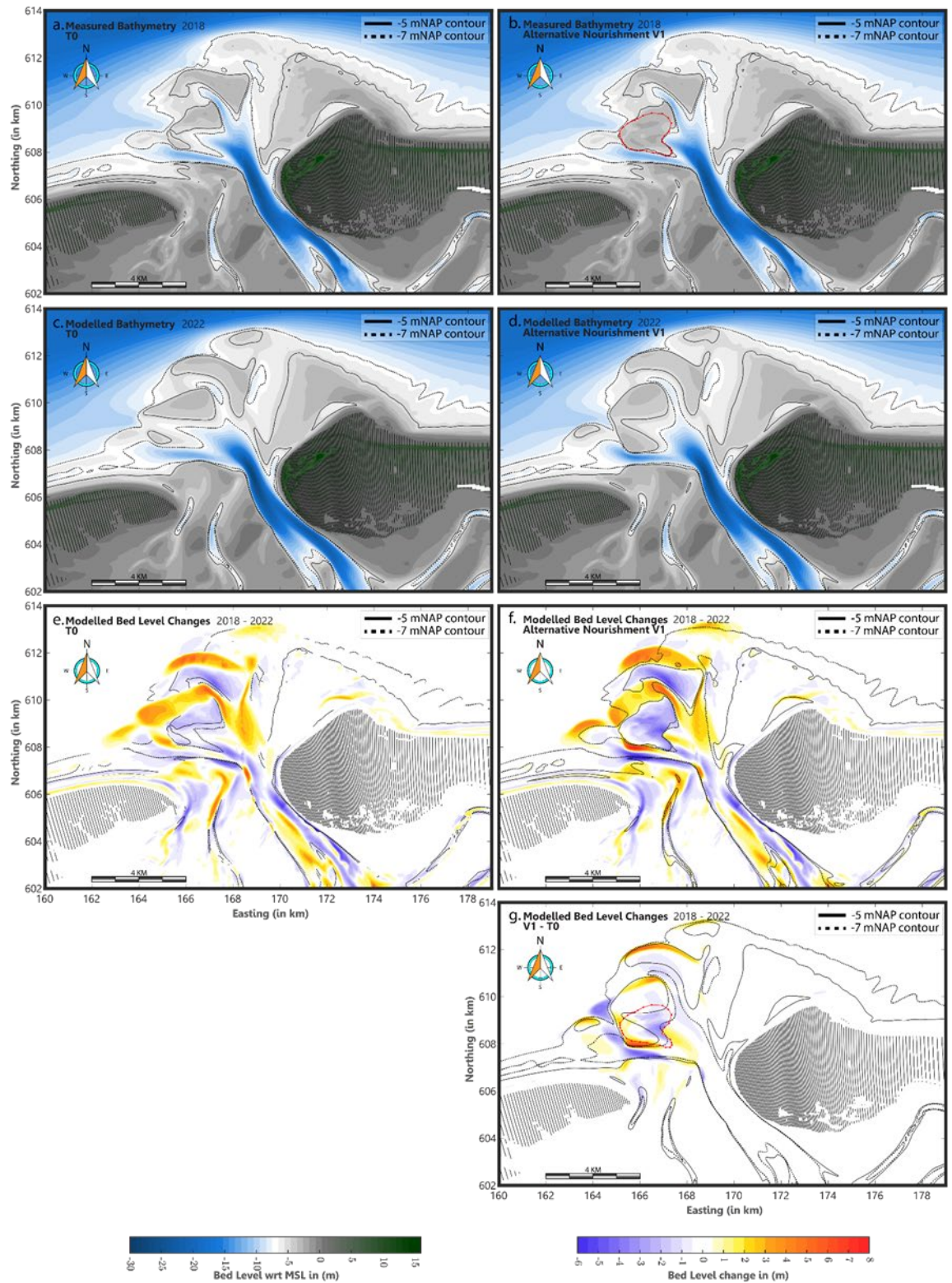
Figuur C- 2: Een overzicht van de morfologische ontwikkeling van (links) de T0 bodem en (rechts) de buitendeltasuppletie (T1). (a) T0 begin bodem, (b) T1 bodem, (c) T0 bodem na 4 jaar, (d) T1 bodem na 4 jaar, (e) T0 bodemverandering na 4 jaar, (f) T1 bodemverandering na 4 jaar, (g) verschil in bodemverandering T1-T0.



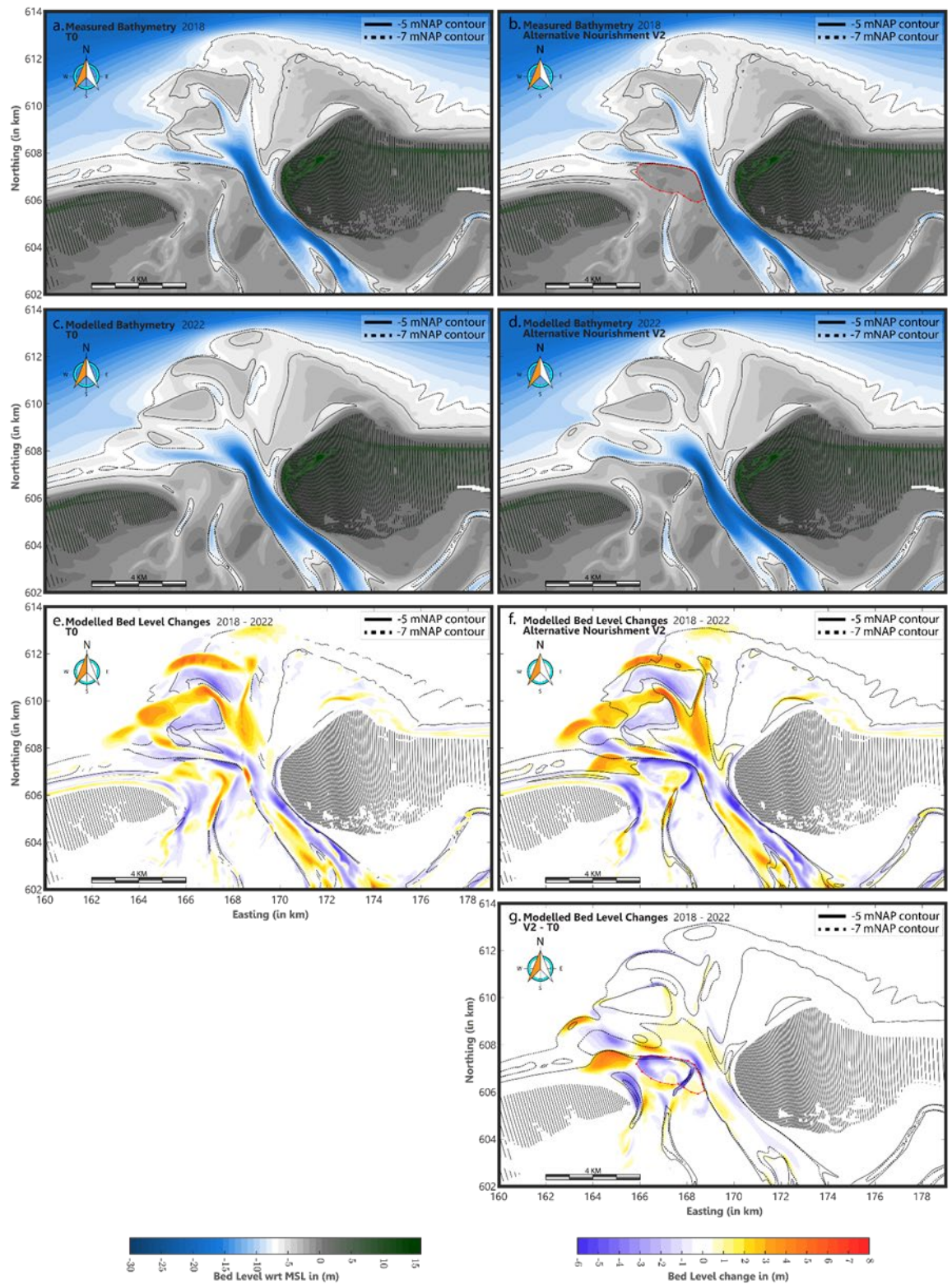
Figuur C- 3: Een overzicht van de morfologische ontwikkeling van (links) de T0 bodem en (rechts) de buitendeltasuppletie (H1). (a) T0 begin bodem, (b) H1 bodem, (c) T0 bodem na 4 jaar, (d) H1 bodem na 4 jaar, (e) T0 bodemverandering na 4 jaar, (f) H1 bodemverandering na 4 jaar, (g) verschil in bodemverandering H1-T0.



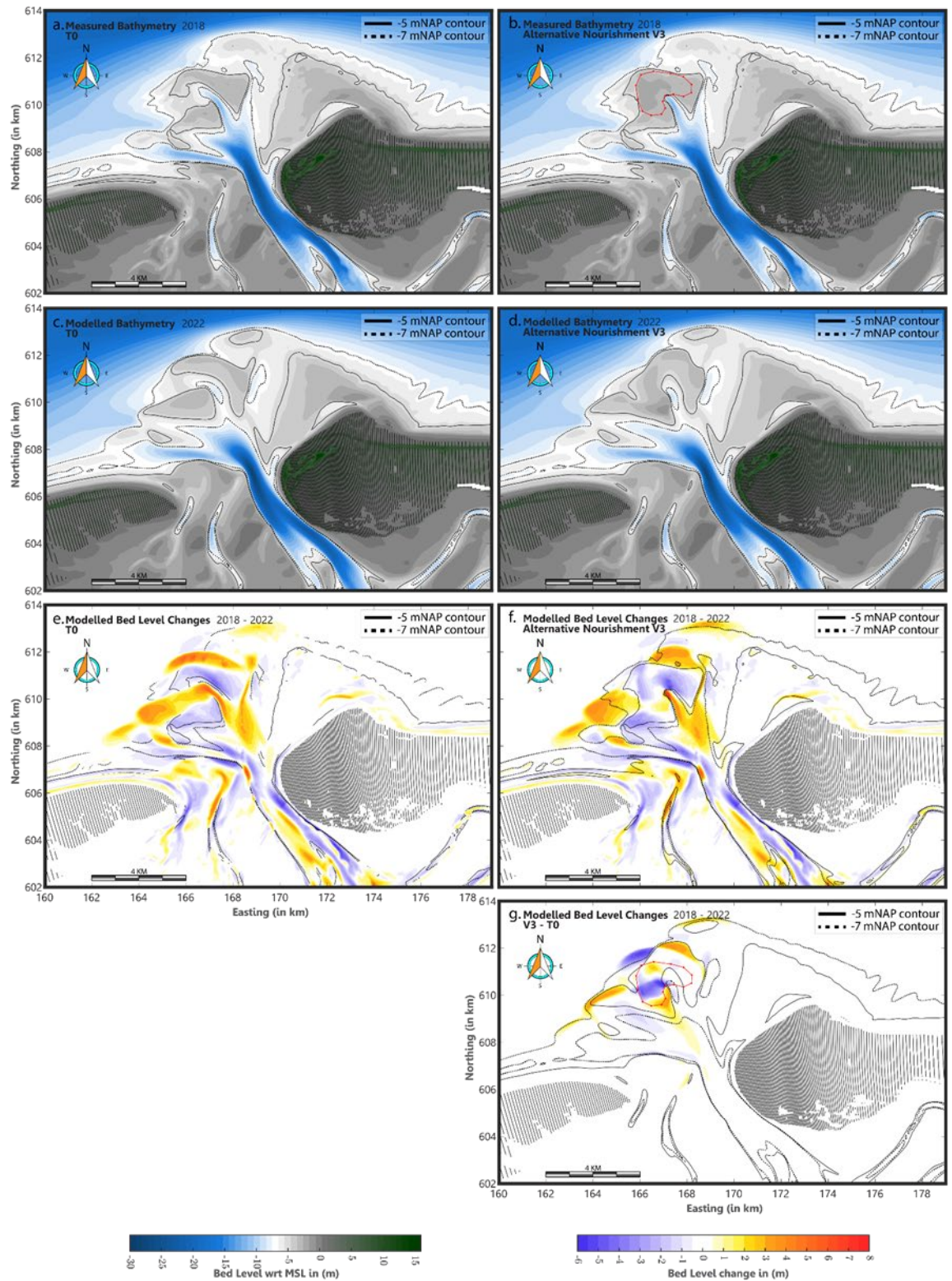
Figuur C- 4: Een overzicht van de morfologische ontwikkeling van (links) de T0 bodem en (rechts) de buitendeltasuppletie (H2). (a) T0 begin bodem, (b) H2 bodem, (c) T0 bodem na 4 jaar, (d) H2 bodem na 4 jaar, (e) T0 bodemverandering na 4 jaar, (f) T1 bodemverandering na 4 jaar, (g) verschil in bodemverandering H2-T0.



Figuur C- 5: Een overzicht van de morfologische ontwikkeling van (links) de T0 bodem en (rechts) de buitendeltasuppletie (V1). (a) T0 begin bodem, (b) T1 bodem, (c) T0 bodem na 4 jaar, (d) V1 bodem na 4 jaar, (e) T0 bodemverandering na 4 jaar, (f) V1 bodemverandering na 4 jaar, (g) verschil in bodemverandering V1-T0.



Figuur C- 6: Een overzicht van de morfologische ontwikkeling van (links) de T0 bodem en (rechts) de buitendeltasuppletie (V2). (a) T0 begin bodem, (b) V2 bodem, (c) T0 bodem na 4 jaar, (d) V2 bodem na 4 jaar, (e) T0 bodemverandering na 4 jaar, (f) V2 bodemverandering na 4 jaar, (g) verschil in bodemverandering V2-T0.



Figuur C- 7: Een overzicht van de morfologische ontwikkeling van (links) de T0 bodem en (rechts) de buitendeltasuppletie (V3). (a) T0 begin bodem, (b) T1 bodem, (c) T0 bodem na 4 jaar, (d) V3 bodem na 4 jaar, (e) T0 bodemverandering na 4 jaar, (f) V3 bodemverandering na 4 jaar, (g) verschil in bodemverandering V3-T0.

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