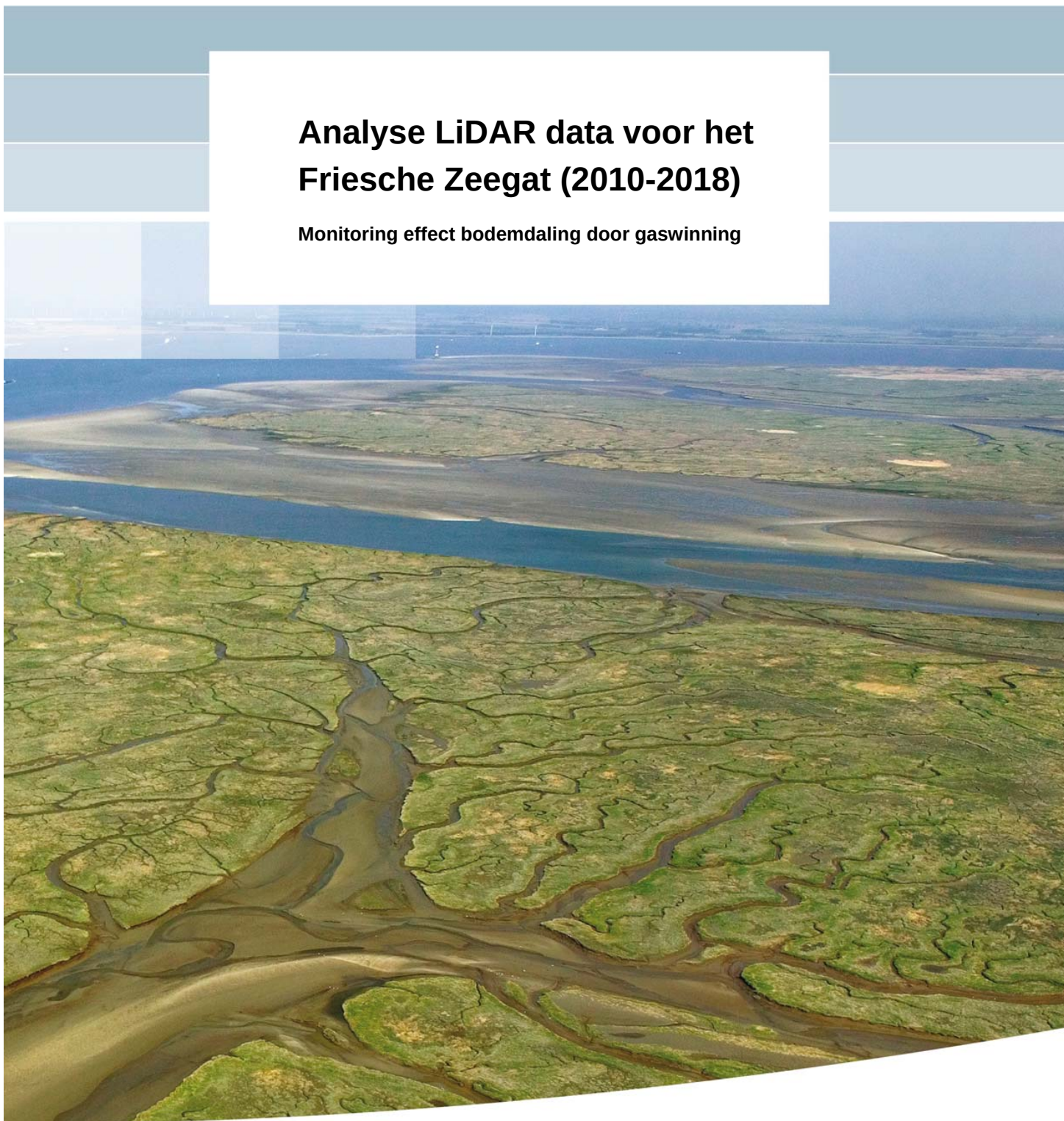


Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2018)

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning



Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2018)

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning

Marlies van der Lugt
Martijn Visser
Henk van den Boogaard

Titel

Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2018)

OpdrachtgeverNederlandse Aardolie Maats 11203620-002
chappij B.V., ASSEN**Project****Kenmerk**

11203620-002-ZKS-0003

Pagina's

58

Trefwoorden

LiDAR, Waddenzee, Friesche Zeegat, bodemdaling, morfologie

Samenvatting

Jaarlijks wordt er een morfologische analyse van de wadplaten in het Friesche Zeegat uitgevoerd aan de hand van LiDAR data welke verzameld wordt in het kader van de monitoring van de effecten van bodemdaling in het Friesche Zeegat (kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag). Het doel van de morfologische analyse is onderzoeken of het areaal droogvallend wad sinds de start van de meetcampagne (2010) is veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning. Daarnaast is onderzocht hoe de meetserie van de NAM in de context van lange-termijn fluctuaties op basis van de vaklodingen dataset te plaatsen valt.

De gemeten plaatarealen binnen de NAM dataset verhouden zich goed tot de gerapporteerde arealen in de vaklodingen dataset. De vaklodingen dataset toont vanaf 1994 een afname van het wadareaal op NAP-0.5m binnen het Pinkegat, en deze trend zet voort in de NAM-dataset. De twee 2018 opnamen verbreken deze trend.

De meest verklarende factor voor de fluctuaties in gemeten plaatvolume blijken systematische verschillen in de gemiddelde hoogte van hard oppervlak op de eilanden en op de snelweg op het vasteland te zijn. Daarnaast correleren de gemiddelde laagwaterstand en de ebduur met het gemeten plaatareaal.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1.1	april. 2019	Marlies van der Lugt		Zheng Bing Wang		Dirk-Jan Walstra	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Introductie	1
1.2 Waargenomen ontwikkeling	2
1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen	2
1.4 Aanpak	2
2 Verwerking LiDAR data	5
2.1 Beschrijving nieuwe data	5
2.2 Opwerking	5
3 Analyse bodemhoogteveranderingen	11
3.1 Inleiding	11
3.2 Bodemveranderingen	11
3.3 Tijdsgemiddelde erosie-sedimentatie	19
3.4 Samenvatting	20
4 Analyse Hypsometrie	21
4.1 Inleiding	21
4.2 Kombergingsgebieden	21
4.3 Deelgebieden	22
4.4 Samenvatting	23
5 Onderzoek verklarende factoren	31
5.1 Inleiding	31
5.2 Onverklaarde systematische verschillen op hard oppervlakte	32
5.3 Meteorologische condities tijdens meetcampagnes	35
5.4 Meteorologische condities tussen twee meetcampagnes in	38
5.5 Samenvatting	40
6 Analyse lange-termijn trends	41
6.1 Inleiding	41
6.2 Aanpak	41
6.3 Reproduceren reeds gepubliceerde trend op schaal Friesche Zeegat	42
6.4 Analyse hypsometrie	43
6.5 Aansluiting vaklodingen dataset aan LiDAR meetreeks	49
6.6 Samenvatting	51
7 Evaluatie LiDAR als monitoringsmethode Friesche Zeegat	53
8 Conclusies en aanbevelingen	55
8.1 Conclusies	55
8.2 Aanbevelingen	56
9 Referenties	57

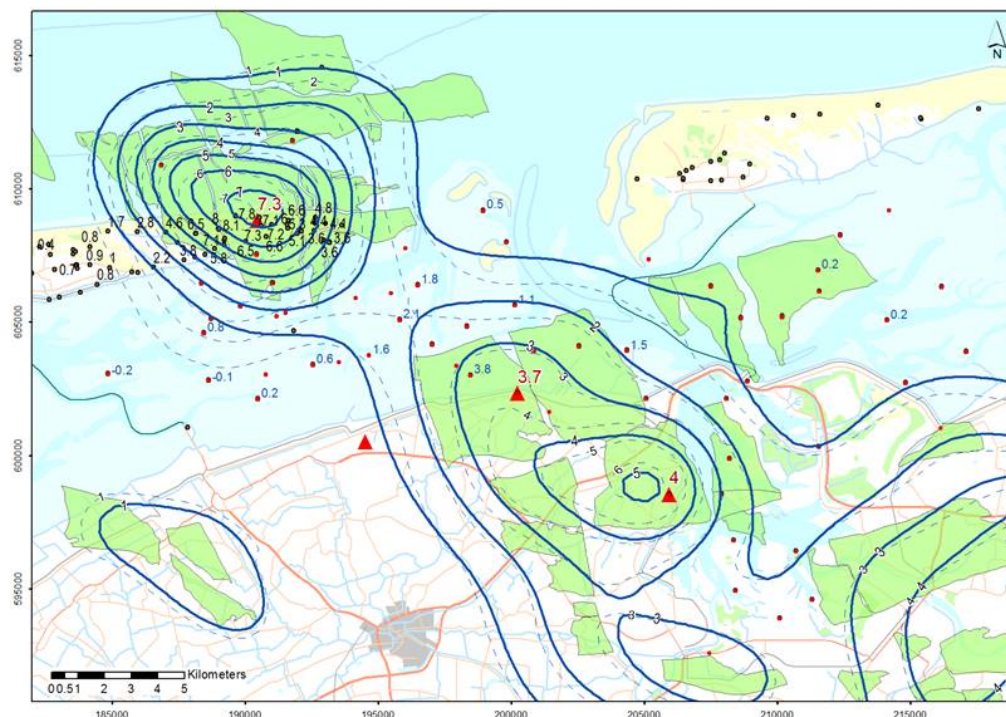
Bijlage(n)

A	Overzicht vluchtgegevens	A-1
B	Analyse invloed land/water classificatie op analyse LiDAR meetreeks	B-1
B.1	Differentiatie op laspuntniveau	B-1
B.2	Differentiatie op roostercelniveau	B-2
B.3	Conclusies	B-3
C	Naslagwerk correlatieanalyse omgevingsfactoren	C-1

1 Inleiding

1.1 Introductie

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het waddengebied en de aangrenzende Noordzee. Gaswinning vindt plaats bij Ameland sinds 1986 en de drie gaswinningsvelden in de Waddenzee (Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen) worden sinds 2007 geëxploiteerd. De bodemdaling is enkele millimeters per jaar, dit is aangegeven in Figuur 1.1.



Figuur 1.1 Ruimtelijke verdeling van de bodemdaling [in cm] op 1 januari 2017, sinds de start van de Ameland en Anjum productie (1986). Uit: Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (2018).

Deze bodemdaling leidt tot relatieve zeespiegelstijging (stijging van de zeespiegel ten opzichte van de lokale bodemhoogte) en creëert zodoende extra bergingscapaciteit in de kombergingsgebieden. Of de morfologie van de wadplaten gevolgen ondervindt van de vergrootte bergingscapaciteit is afhankelijk van het aanbod van sediment en de sedimentatiesnelheid binnen deze kombergingsgebieden.

Gas wordt gewonnen middels het hand-aan-de-kraanprincipe. Hiervoor wordt een jaarlijkse toetsing van bodemdalingseffecten in het Friesche Zeegat uitgevoerd om de gevolgen voor morfologie en ecologie in het waddengebied te onderzoeken. Sinds 2010 wordt tweemaal per jaar een LiDAR opname gemaakt van de wadplaten die samen een hoogfrequente dataset van hoogtekaarten van het droogvallend wad in het Friesche Zeegat vormen. Deze dataset vormt de basis van de morfologische analyse die Deltares jaarlijks uitvoert.

1.2 Waargenomen ontwikkeling

Er is in Schrijvershof (2018) een afname geconstateerd van areaal op NAP-0.5m en NAP+0 in zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag over de periode 2010-2017. De geconstateerde korte-termijn fluctuaties binnen de meetserie bleken van dezelfde ordegrootte als de totale afname over de gehele meetreeks. Dit spreekt een direct verband tussen de monotone bodemdaling, zoals gerapporteerd door de NAM, en plaatareaalafname tegen. Daarnaast is geconcludeerd dat de gemeten areaalveranderingen correleren met de heersende laagwaterstanden tijdens de meetcampagnes, een indicatie dat achterblijvend water op de wadplaten de metingen significant beïnvloedt.

1.3 Doelstelling en onderzoeksvragen

De doelstelling van het onderzoek luidt: "Is het Areaal droogvallend wad in het Friesche Zeegat (kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag) sinds de start van de LiDAR metingen veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning?".

Binnen deze rapportage wordt deze onderzoeksvraag verder uitgesplitst in drie delen: verbetering van de data-analyse, een analyse van de nieuwe datapunten binnen de meetreeks van de NAM en daarnaast een analyse van de lange-termijn trends binnen het Friesche Zeegat en hoe de LiDAR meetreeks daarin past:

Data-analyse:

1. Hoe werkt de meegeleverde land-water-vegetatie classificatie van de las-data door in de resultaten?

Analyse NAM meetreeks:

1. Welke morfologische veranderingen zijn te detecteren in de opnames in de zomer en najaar van 2018 en hoe verhouden deze veranderingen zich tot de rest van de meetreeks, gerapporteerd in Schrijvershof (2017)?
1. Zijn er factoren die de grilligheid van het gemeten signaal binnen de LiDAR dataset kunnen verklaren?

Inpassing datareeks in lange-termijn trends:

2. Hoe verhouden opnames in opdracht van de NAM zich tot de opnamen gemaakt door RWS in de jaren waar RWS-data beschikbaar is; namelijk 2012 en 2018?
3. Hoe verhouden trends gedetecteerd aan de hand van de NAM-dataset zich tot de lange-termijn trend vanuit de vaklodingen dataset?

1.4 Aanpak

Om de twee nieuwe opnames in de dataset te plaatsen wordt het opwerkingsprotocol toegepast dat is opgesteld voor de vergridding van de opnames 2010-2017 in Schrijvershof (2018). Extra aandacht wordt daarbij besteed aan de rol van crosslijnen (zie Hoofdstuk 0). De verkregen hoogtekaarten worden opgeslagen voor analyse van morfologische ontwikkelingen middels reeksen van verschilkaarten. Voor de analyse van hypsometrie wordt eventuele missende data vervolgens opgevulde met lineaire driehoeksinterpolatie. Voor beide kombergingsgebieden en een aantal deelgebieden wordt op basis van de hypsometrische curven tijdreeksen van areaal op referentiehoogten bepaald.

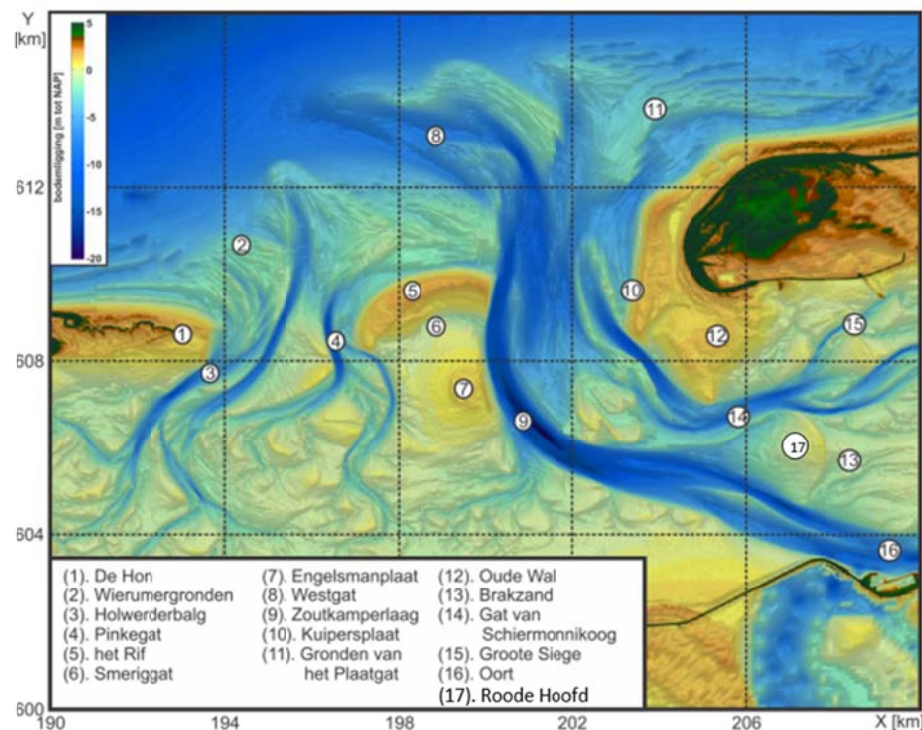
De dataset wordt gebruikt om het verband tussen fluctuaties in gemeten plaatareaal en heersende condities uit te voeren. Hierin worden de suggesties vanuit de MER-commissie meegenomen; de set indicatoren waartegen wordt getoetst is uitgebreid met indicatoren voor windstatistiek uit een hoger kwantiel (Donker 2015), alsook met een indicator voor de fase in

de springtij-doodtijcyclus tijdens de metingen. Correlaties tussen indicatoren vormen de basis van een regressieanalyse om (delen van) de variantie in het signaal te verklaren.

Het derde onderdeel betreft het plaatsen van de LiDAR meetreeks in de context van lange-termijn metingen van Rijkswaterstaat. De vaklodingen dataset bevat metingen van de bodem van het Friesche Zeegat. vanaf 1927. Met een cyclus van ongeveer 6 jaar worden alle kustgebieden ingemeten, in de recente metingen middels single-beam en lidar. Op het geaggregeerde niveau van het Friesche Zeegat is deze dataset ook vaker geanalyseerd om sedimentatie of erosie van de gehele entiteit vast te stellen. Een dergelijke analyse is onder andere gerapporteerd in Wang et al. (2018), Nederhoff et al. (2017) en Elias et al. (2012). Om op het niveau van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag morfologische fluctuaties en veranderingen te kunnen vergelijken met de LiDAR datareeks wordt deze analyse opnieuw uitgevoerd, nu op de deelgebieden apart. Bovendien wordt de analyse uitgevoerd boven NAP-0.5m: de ondergrens van de LiDAR dataset van de NAM.

Als laatste is er dit jaar een land-water-vegetatieclassificatie als attribuut aan de LAS datapunten meegegeven. Er wordt onderzocht wat de beste manier is om deze classificatie mee te nemen in de opwerking naar hoogtekarten. Daarnaast wordt geanalyseerd wat het meenemen van de classificatie voor gevolgen heeft voor de verdere analyse. Omdat deze classificatiedata enkel beschikbaar is voor de twee opnames uit 2018 en dus niet direct bijdraagt aan de conclusie, is dit laatste onderdeel beschreven in de appendix (zie Appendix **Error! Reference source not found.**).

Ter verduidelijking van verwijzingen naar specifieke morfologische eenheden is een overzichtskaart van de belangrijkste geulen en platen weergegeven in Figuur 1.2.



Figuur 1.2 Benaming van de belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat (uit: Elias en Bruens, 2013).

2 Verwerking LiDAR data

2.1 Beschrijving nieuwe data

In juli en november 2018 zijn er LiDAR opnames gemaakt van het projectgebied. De metingen zijn uitgevoerd door Terratec AS. Beschrijvingen van het inwinnen en verwerken van deze datasets staan beschreven in Terratec (2018a, 2018b). Bij de zomermeting is op de vereiste vlieghoogte < 500m gevlogen, wat een zeer grote puntendichtheid opleverde. Het gevolg van de lage vlieghoogte is een beperkt bereik per vliegbaan, waardoor de opname over drie dagen verspreid is. Deze grote puntendichtheid bleek niet nodig om gebiedsdekking te verkrijgen. Daarom is in de herfstmeting de vlieghoogte bijgesteld zodat alle metingen binnen een getijvenster van 3 uur konden worden gemeten. Hierdoor is de bereikte minimale puntendichtheid een factor 3 verkleind (van minimaal 29 naar 9 pts/m²), wat nog altijd voldoende is. De controlelijnen konden echter niet binnen ditzelfde venster worden gemeten, waardoor nog een extra dag moest worden gevlogen. Door heersende mist heeft deze controlevlucht 3 dagen later plaats gevonden. Aangezien het merendeel van de opnamen over meerdere dagen hebben plaatsgevonden, heeft dat geen gevolgen gehad voor de interpretatie van deze opname binnen de meetreeks.

Bij de zomermeting is er toch een vliegbaan buiten het vereiste getijdevenster van < NAP-0.7m gevlogen; dit betreft vliegbaan 11. Er is voor gekozen om alle laspunten van deze vliegbaan uit de dataset te verwijderen om de betrouwbaarheid van de gerapporteerde data te behouden. Voor de analyse van hypsometrie is deze baan opgevuld met data uit de voorgaande opname; najaar 2017.

Een samenvatting van gegevens bij elke opname is getabuleerd in Appendix A, ter snelle referentie van welke meetdienst heeft gevlogen, welke instrumenten zijn gebruikt en duur van elke opname.

2.2 Opwerking

De opwerking van de LAS datasets naar kaartbladen is uitgevoerd volgens het opwerkingsprotocol zoals beschreven in Schrijvershof et al. (2018), met één aanpassing daarop, te weten het verwijderen van LASpunten uit controlelijnen uit de puntenwolken. In meerdere datasets zijn de controle-crosslijnen soms buiten het getijvenster van NAP-0.7m gevlogen. Omdat de extra puntendichtheid die wordt verkregen door de crosslijnen wél mee te nemen niet vlakdekkend is en daardoor de betrouwbaarheid van de kaartbeelden niet vergroot, zijn alle crosslijnen uit alle opnamen verwijderd voordat er naar een standaard rooster is vergrid. Het effect op de vlakdekking van deze filtering is weergegeven in Tabel 2.1.

Een korte samenvatting van het gemodificeerde protocol:

- 1 Wegfilteren van laspunten uit crosslijnen
- 2 Wegfilteren van laspunten boven NAP+2m
- 3 Wegfilteren van vlieglijnen waar uit de rapportage blijkt dat buiten het getijvenster is gevlogen
- 4 Mediaan van laspunten binnen rooster cel bepalen op standaard 10x10m en 20x20m rooster

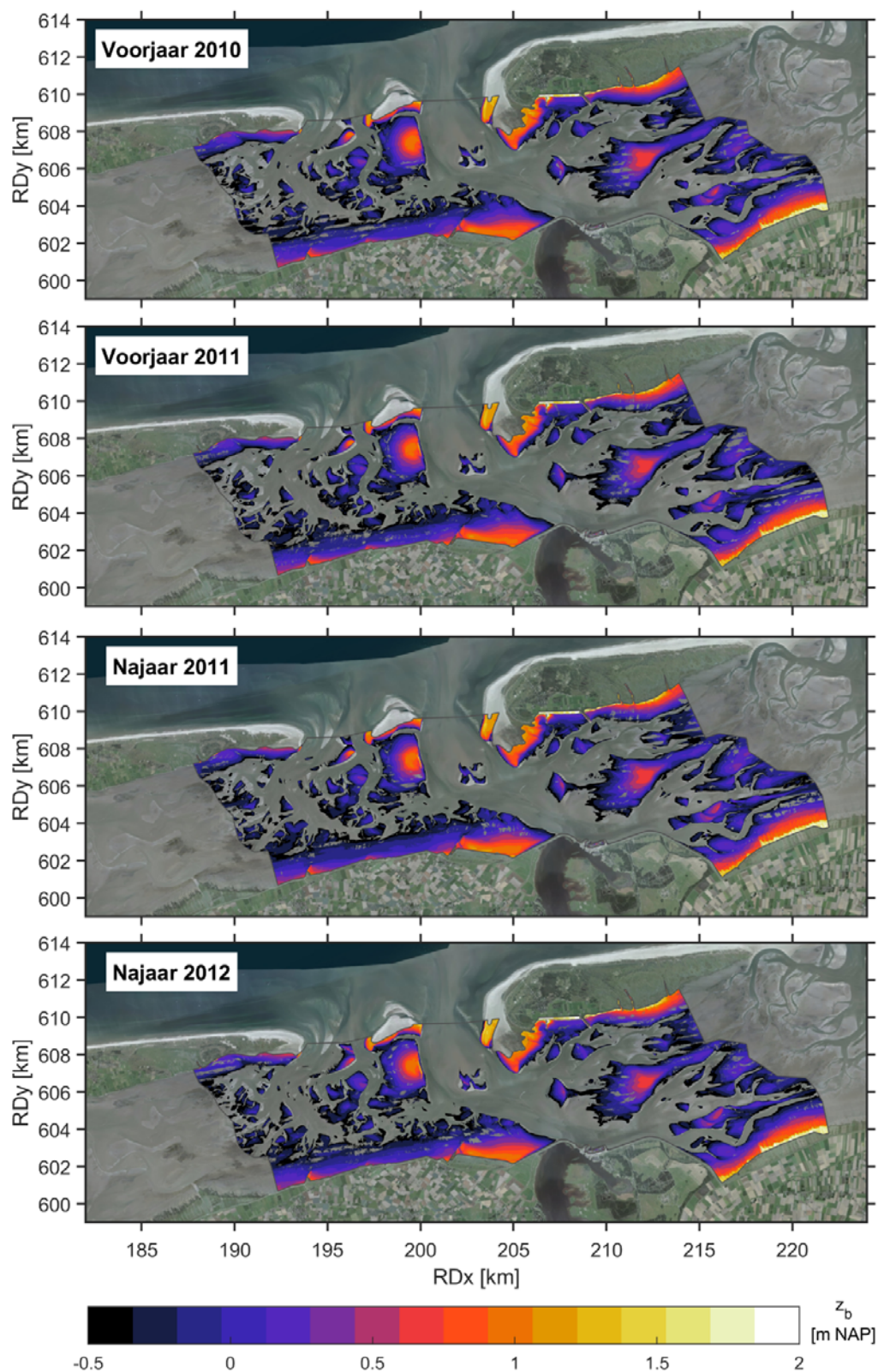
Zie Figuur 2.1 voor kaartbeelden die niet zijn opgevuld met interpolatie, en welke voor de analyse van verschilkaarten zijn gebruikt. Voor de analyse van de hypsometrie zijn de kaarten vlakdekkend gemaakt boven NAP-0.5m met lineaire driehoeksinterpolatie.

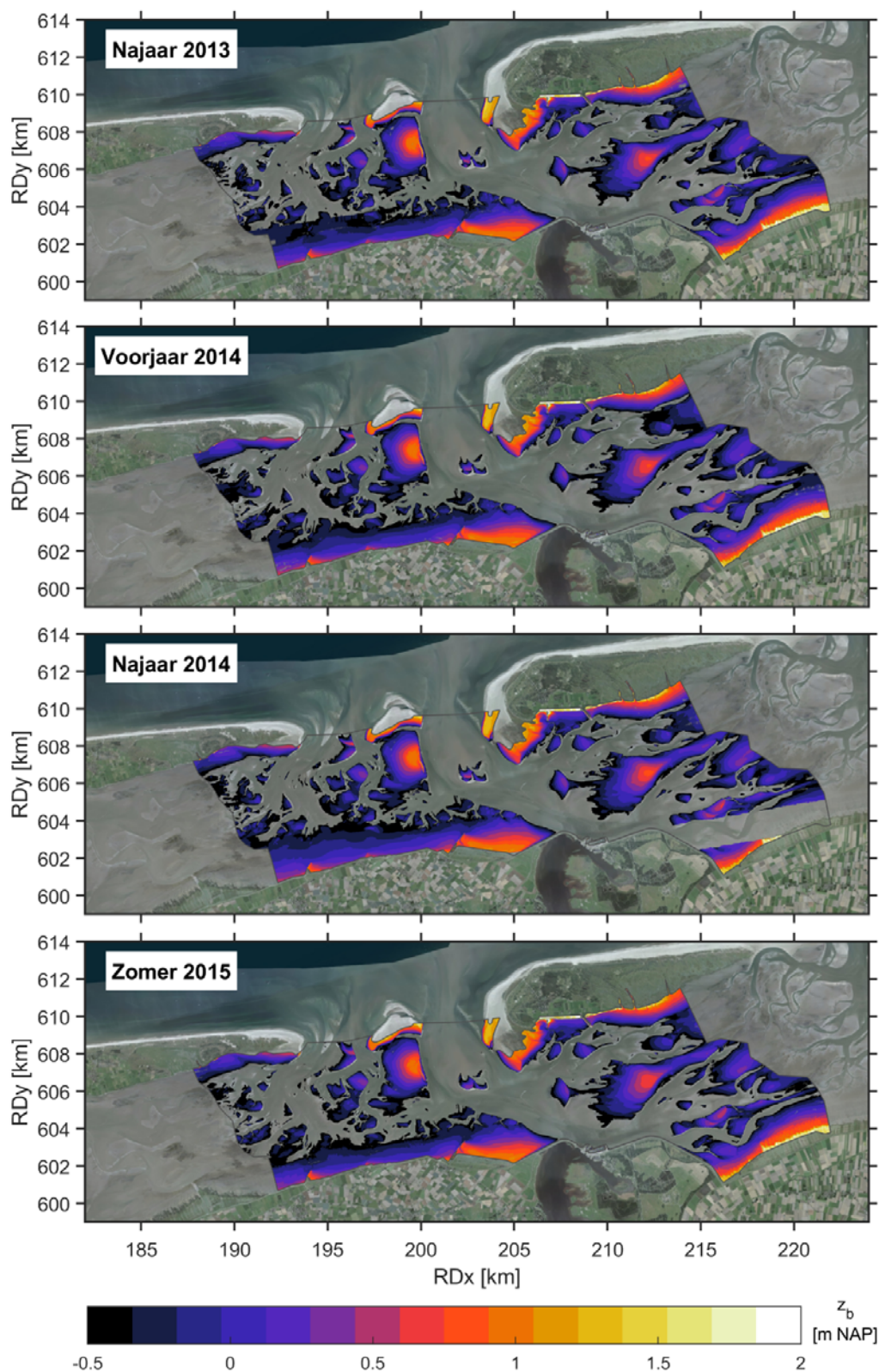
Er is vorig jaar al geconstateerd dat er voor de meetseries najaar 2014 en najaar 2015 ook vlieglijnen buiten het getijvenster zijn ingevlogen. Waar het probleem bij de zomer 2018 dataset slechts 1 vlieglijn besloeg, was dit voor najaar 2014 en najaar 2015 tot wel 35% van het projectgebied, zie Tabel 2.1. Opvullen van het beeld met de voorgaande meetreeks bleek dan wel mogelijk, maar niet zinvol, en deze twee metingen zijn dan ook dit jaar niet meegenomen in de analyse van hypsometrie.

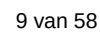
Tabel 2.1 Ratio cellen met waarden binnen de gecombineerde polygoon van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag, zowel voor als na filtering van bodemhoogtepunten < NAP -0,5 m, en vergeleken met de dekking zoals gerapporteerd in Schrijvershof (2018).

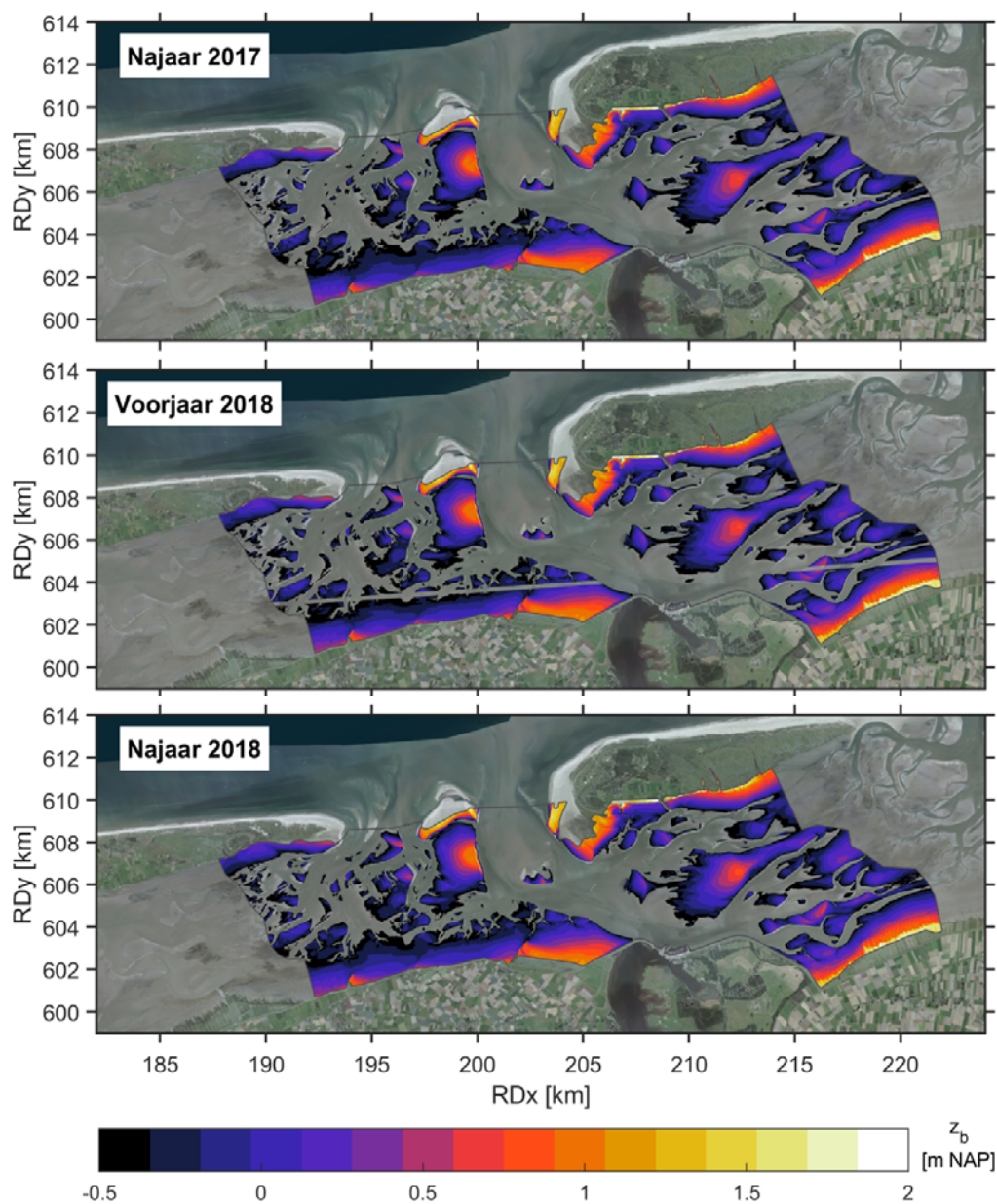
Opname		Ratio Dekking [-]				Ratio Opgevulde cellen [-]
		In polygoon (Schrijvershof et al., 2018)	In polygoon	In polygoon ($z_b > \text{NAP} -0,5$ m)	In polygoon ($z_b > \text{NAP} -0,5$ m) Geïnterpoleerd	
Voorjaar 2010	2010a	0.9228	0.928	0.504	0.534	0.030
Voorjaar 2011	2011a	0.804	0.804	0.500	0.532	0.032
Najaar 2011	2011b	0.904	0.904	0.507	0.532	0.025
Najaar 2012	2012a	0.919	0.917	0.498	0.529	0.031
Najaar 2013	2013a	0.984	0.983	0.53	0.534	0.004
Voorjaar 2014	2014a	0.998	0.998	0.537	0.539	0.002
Najaar 2014*	2014b	0.998	0.838	0.507	0.551	0.044
Zomer 2015	2015a	0.998	0.998	0.514	0.516	0.002
Najaar 2015*	2015b	0.999	0.653	0.363	0.533	0.170
Voorjaar 2016	2016a	0.983	0.983	0.519	0.522	0.003
Najaar 2016	2016b	0.997	0.977	0.501	0.51	0.009
Voorjaar 2017	2017a	0.999	0.999	0.514	0.515	0.001
Najaar 2017	2017b	0.999	0.999	0.511	0.512	0.001
Zomer 2018	2018a		0.96	0.503	0.522	0.018
Najaar 2018	2018b		0.999	0.532	0.534	0.002

* Deze opnamen zijn afgekeurd op basis van de dekkingsgraad van goedgekeurde vliegbanen binnen de projectgebiedpolygoon.









Figuur 2.1 Hoogtekaarten van de vergridde laspunten van alle LiDAR opnamen. Alleen data boven NAP-0.5m weergegeven.

3 Analyse bodemhoogteveranderingen

3.1 Inleiding

De digitale hoogtebeelden (Figuur 2.1) kunnen van elkaar afgetrokken worden waardoor datasets van verschilpunten ontstaan. Deze verschillen kunnen positief (bodemverlaging) of negatief (bodemverhoging) zijn. De verschillen die op deze manier worden berekend kunnen veroorzaakt worden door:

1. Een daadwerkelijk verschil in bodemniveau tussen twee metingen als gevolg van:
 - a. Erosie of sedimentatie
 - b. Bodemdaling
2. Een gemeten verschil in bodemniveau doordat niet de werkelijke hoogte van de wadplaat wordt ingemeten. Dit kan komen door:
 - a. De metingen uitvoeren buiten het getijvenster
 - b. Water dat ook met laag water op de wadplaten aanwezig blijft
3. Een gemeten verschil in bodemniveau veroorzaakt door de meettechniek. Dit wordt veroorzaakt door:
 - a. Stochastische en systematische meetfouten door onnauwkeurigheid van de meetapparatuur
 - b. Weersomstandigheden tijdens het uitvoeren van de metingen.

3.2 Bodemveranderingen

Om structurele veranderingen in morfologie te identificeren uit de meetreeks zijn verschilkaarten gemaakt van iedere opname met een referentieopname. Zo wordt niet gefocust op hoe individuele metingen zich verhouden tot opvolgende metingen, maar op het erosie/sedimentatiepatroon dat zich ontwikkelt door de jaren heen. De latere opnamen hebben een hogere gebiedsdekking dan de eerste paar opnamen, daarom is de referentieopname de laatste opname: najaar 2018. Voor de verschilkaarten worden de niet-opgevulde hoogtebeelden gebruikt.

Om onderscheid te kunnen maken tussen daadwerkelijke bodemniveaoverschillen en stochastische meetfouten, worden de verschilkaarten met een aangepaste kleurenschaal geplot waarin een significantiegrens is opgenomen. In Schrijvershof (2017) is de discussie over de onzekerheid van verschilkaarten en individuele kaartbladen tussen Deltares, de MER-commissie, de NAM en de meetdienst (indertijd Fugro) gedocumenteerd, met als conclusie om een onzekerheid van verschilkaarten van ongeveer 7 centimeter aan te houden, gebaseerd op de gemiddelde standaardafwijking van verschilkaarten, en de daarbij behorende onzekerheid in een individueel kaartblad van ongeveer 5 cm. Op basis daarvan is de significantiegrens op 7 centimeter gezet.

De zichtbare verschillen in de verschilkaarten kunnen dan nog voortkomen uit daadwerkelijk opgetreden verschillen in bodemniveau, door metingen van wateroppervlakte in plaats van plaatoppervlakte en door systematische meetfouten van de meetapparatuur of door weersomstandigheden tijdens het uitvoeren van de metingen. Wanneer deze serie van verschilkaarten (Figuur 3.1) echter globaal wordt bekeken, blijken grootschalige migratie- en erosiepatronen van platen in deze aanpak in alle verschilkaarten goed herkenbaar te zijn. Het zijn precies deze grootschalige migratiepatronen die leiden tot bodemveranderingen groter dan 20 centimeter.

Daarnaast zijn in Figuur 3.2 voor drie referentiehoogten de hoogtecontourlijnen van de geïnterpoleerde meetreeksen over elkaar heen geplot. Hieruit kan de algemene migratierichting worden afgeleid en een algemeen idee worden verkregen van de ruimtelijke verdeling van hoger gelegen platen over de kombergingsgebieden.

Met name de eerste twee opnamen, 2010 en 2011, laten een spikkelig patroon van hoogtecontouren zien, waarin ook de vliegbanen lichtelijk zijn terug te herkennen. Deze spikkelige contouren zijn waarschijnlijk veroorzaakt door de opvulling van deze datasets met lineaire interpolatie. In het gehanteerde opwerkingsprotocol is er namelijk voor gekozen om binnen de vergridding alle las-punten mee te nemen in de bepaling van de mediaan, ook als dat erin resulteerde dat deze mediaan gebaseerd werd op slechts één punt. Deze dataschaarse roosterzellen zijn dus erg gevoelig voor uitschieters in de hoogtemetingen en zitten met name in de eerste twee metingen. Het verdwijnen van de spikkelige contouren van 2011 naar latere metingen heeft waarschijnlijk dus fysisch geen betekenis maar is een artefact van het opwerkingsprotocol.

De verhouding plaatareaal versus geulareaal verschilt tussen het kombergingsgebied Pinkegat en Zoutkamperlaag. Met name door aanwezigheid van Brakzand binnen de Zoutkamperlaag is het aandeel plaatareaal daar groter dan in het Pinkegat. Door de contourlijnen op NAP-0.25m, NAP+0m en NAP+0.5m te vergelijken, wordt het duidelijk dat bijna al het plaatareaal zich op of onder NAP bevindt. Enkel het hoogstgelegen deel van het Brakzand en de Engelsmanplaat komen daarbovenuit. Het eigenlijke interessegebied van de LiDAR metingen bevindt zich dus op of tot een halve meter boven de momenteel gehanteerde afkaphoogte van NAP-0.5m.

De algemene migratierichting van deze contouren is oostwaarts. Dit patroon is het meest prominent in de oostwaartse verplaatsing van het Roode Hoofd richting Brakzand, die over de gehele meetperiode plaats heeft gevonden. Ook de uitbouw van de zandplaat bij Paesens richting de Zoutkamperlaag is groter dan 30 centimeter en oostwaarts. Het Brakzand migreert oostwaarts en de platen in het zuidoosten van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag zijn in beweging.

De verzanding van het Smeriggat door migratie van het Rif is ook zichtbaar in de verschilkaarten. Oostwaartse migratie van de Engelsmanplaat wordt verhinderd door de Zoutkamperlaag. Hierdoor is het erosiefront aan de westkant wel zichtbaar, maar er vindt geen sedimentatie plaats aan de oostkant boven de NAP-0.5m contour. Er ontstaat wel een zandrichel die zuidoostwaarts beweegt en dan uitdooft. Deze blijkt met name uit de hoogtecontouren op NAP+0.5m.

Binnen het Pinkegat zijn de platen ook oostwaarts aan het migreren, en het valt uit de contourplots op dat de vorm en oriëntatie van deze contourlijnen door de jaren heen meer fluctueren dan binnen de Zoutkamperlaag. Deze vorm zou kunnen zijn beïnvloed door weersomstandigheden tijdens en voorafgaand aan de metingen. Gemiddeld genomen vallen de patronen van erosie en sedimentatie op basis van de verschilplots wel in een trend. Gebieden van erosie en sedimentatie wisselen elkaar ruimtelijk af, waardoor uit deze plots geen netto erosie of sedimentatie valt waar te nemen. Hiervoor moet naar geaggregeerde statistieken worden gekeken binnen deelgebieden.

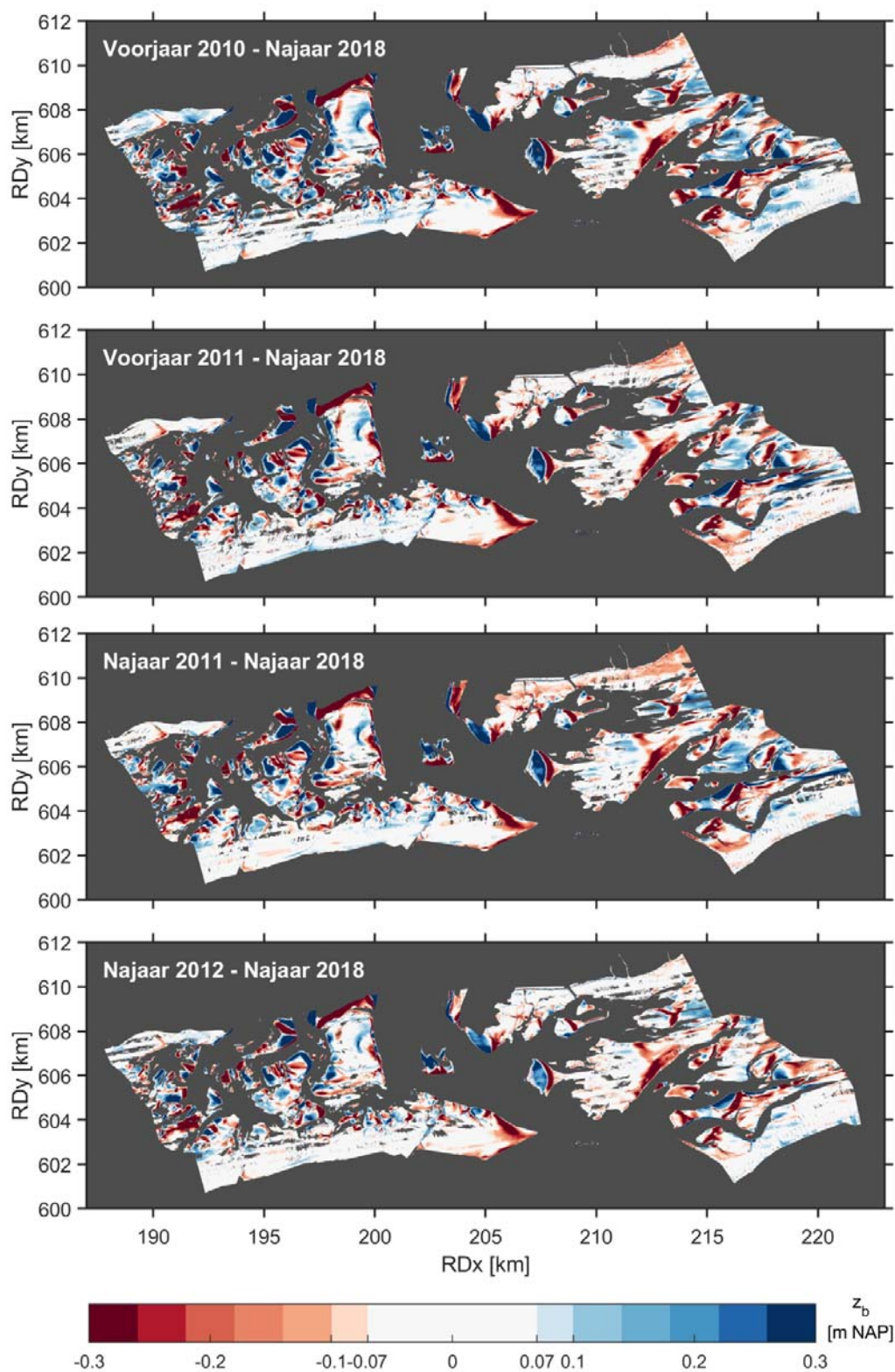
Aan de hand van de verschilkaarten in Figuur 3.1 kunnen subgebieden en vlieglijnen worden aangewezen die buiten het temporale patroon vallen, of waarvan de vlieglijnen terug zijn te

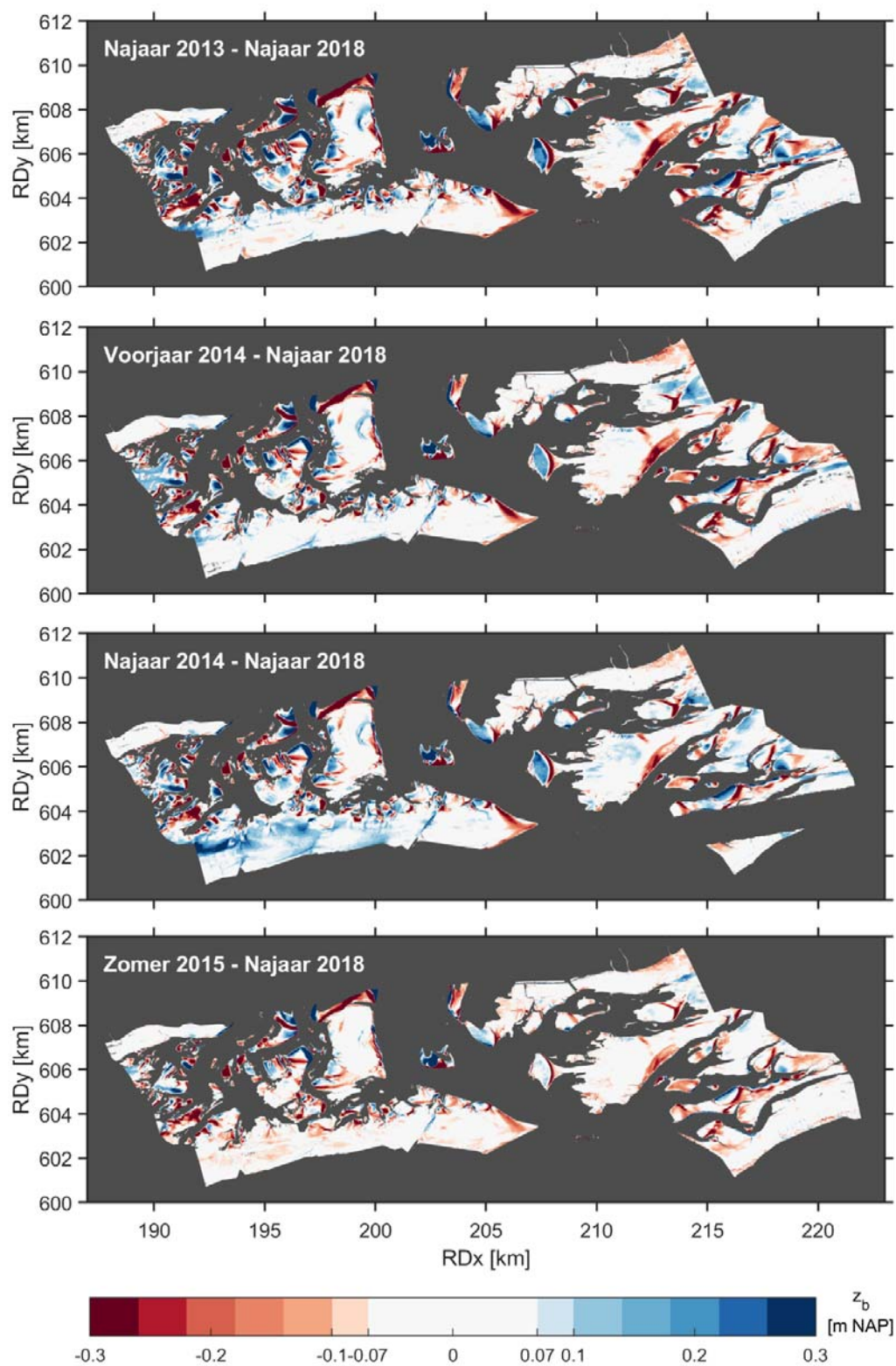
herkennen in de afkapping van de data op NAP -0.5m en er dus waarschijnlijk wateroppervlak in plaats van wadplaat is gemeten.

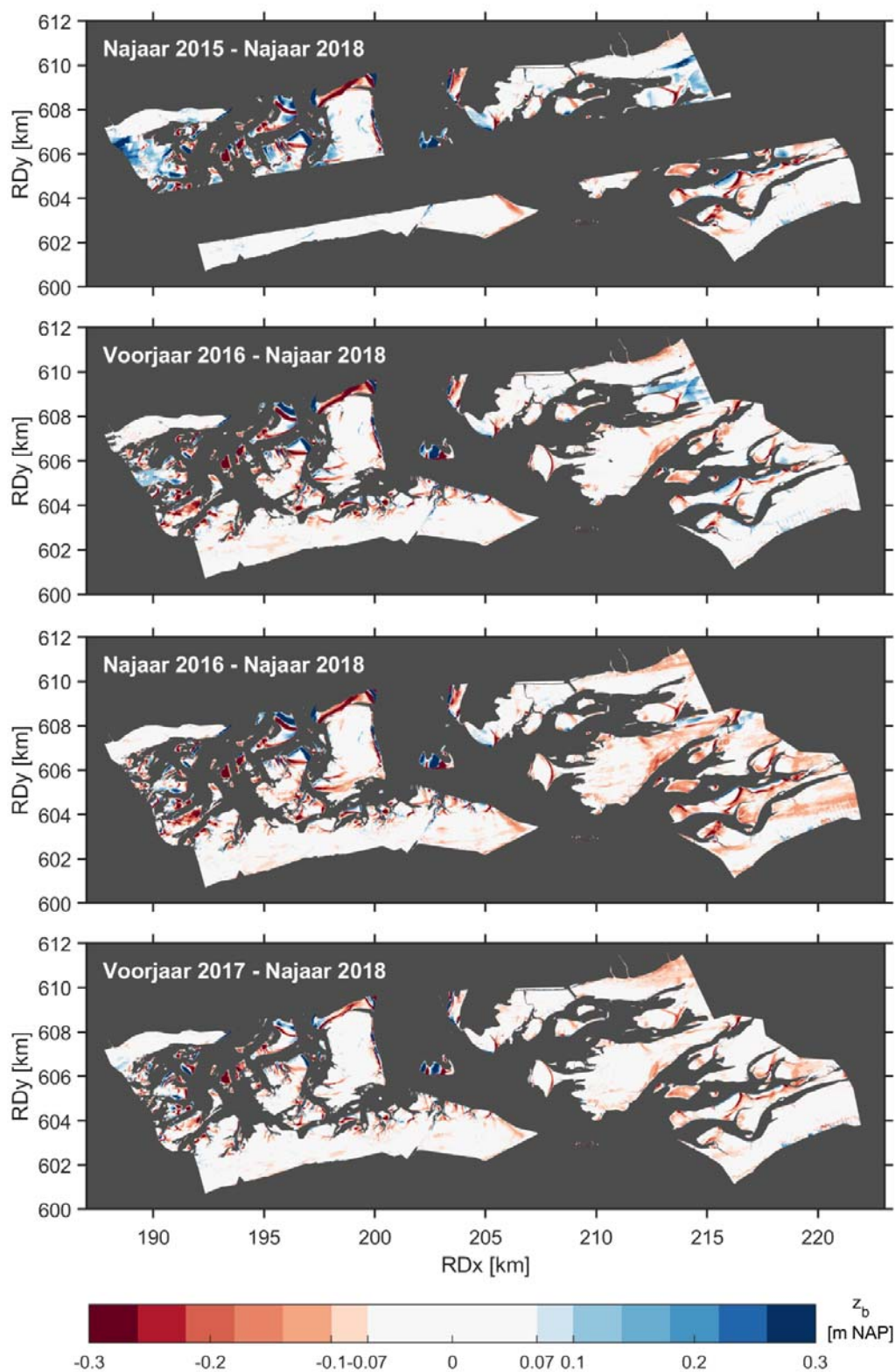
- In Najaar 2013 en Najaar 2014 vallen binnen het gehele zuidelijke deel van het Pinkegat hoger gelegen wadplaten aan te wijzen die geheel buiten het temporale patroon vallen en waarin vluchtlijnen terug zijn te herkennen. Voor Najaar 2014 zijn enkele vluchtlijnen al geschrapt omdat deze bij te hoge waterstanden zijn gevlogen, Samen met de reeds afgekeurde vlieglijnen gaat het bij deze opname om ~25% van het kaartbeeld.
- Voorjaar 2014, Najaar 2015 en Voorjaar 2016 geeft twee banden van veel hoger gelegen wad met de vorm van de vlieglijnen weer aan de randen van zowel het Pinkegat als de Zoutkamperlaag (noordelijke kant van de oost- en west- wantijranden). De waterstanden aan de wantijranden van de kombergingsgebieden waren hier dus toch te hoog. In voorjaar 2014 en voorjaar 2016 gaat dit om <5% van het kaartbeeld. In Najaar 2015 zijn meerdere vluchtlijnen al geschrapt omdat deze bij te hoge waterstanden zijn gevlogen. Samen met de afgekeurde vluchtlijnen gaat dit om ~40% van het kaartbeeld.

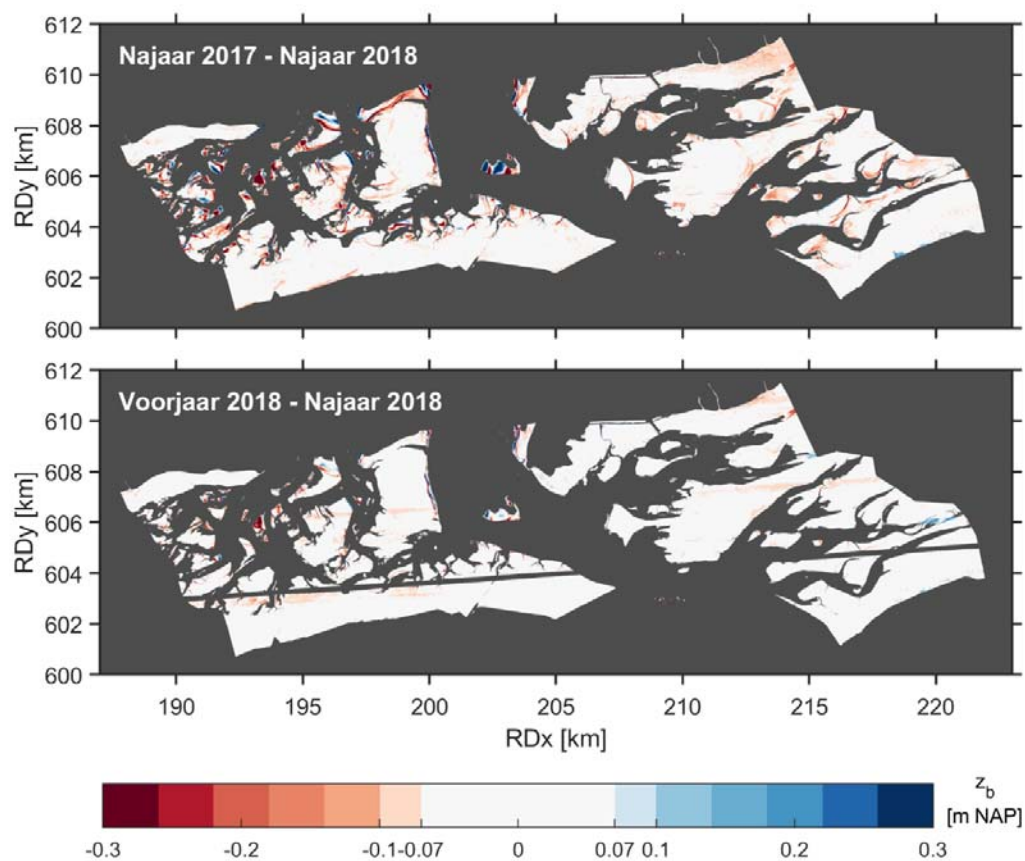
Najaar 2016 geeft als enige in de meetreeks een algehele verlaging van de oostelijk gelegen wadplaten in de Zoutkamperlaag aan. Aan de voorbereiding door de meetdienst van de opnames in 2016 is in voorgaande analyses ook al getwijfeld. Door deze weergave met significantieband wordt duidelijk dat met name de najaar 2016 opname een afwijkende meting bevat.

De eerste drie opnamen (voorjaar 2010, voorjaar 2011 en najaar 2011) bevatten dan wel gaten in de dataset, er zijn geen visueel zichtbare wateroppvlaktemetingen in de dataset terecht gekomen. Samen met de latere opnamen (2015a en alle metingen vanaf 2017) vormen deze een set van 9 opnamen waar geen visuele systematische afwijkingen in zitten.

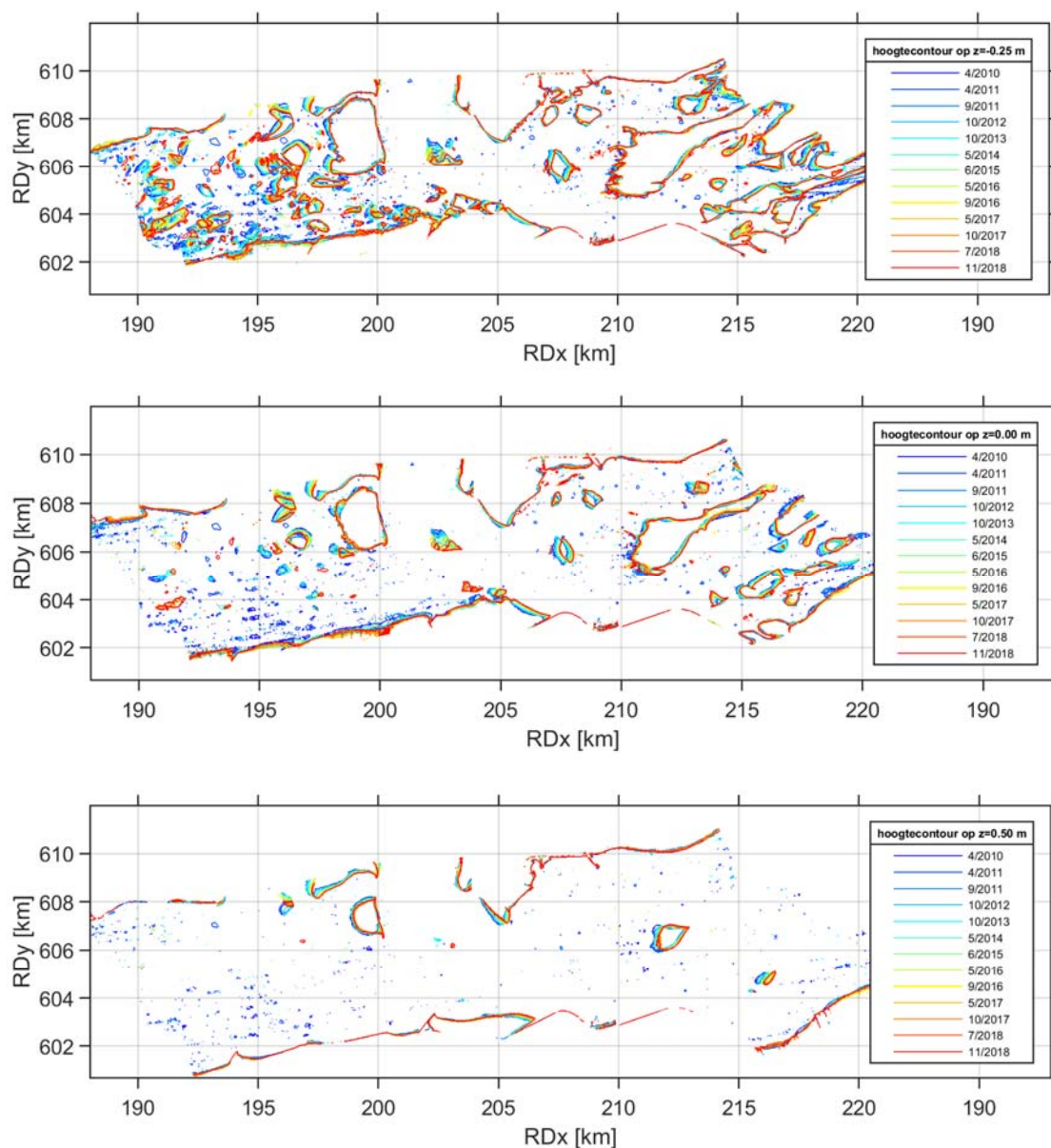








Figuur 3.1 Bodemhoogteverschilkaarten van alle opnamen uit de meetserie met de referentieopname, najaar 2018. Erosie leidt tot blauwe kleuren en sedimentatie leidt tot rode kleuren.

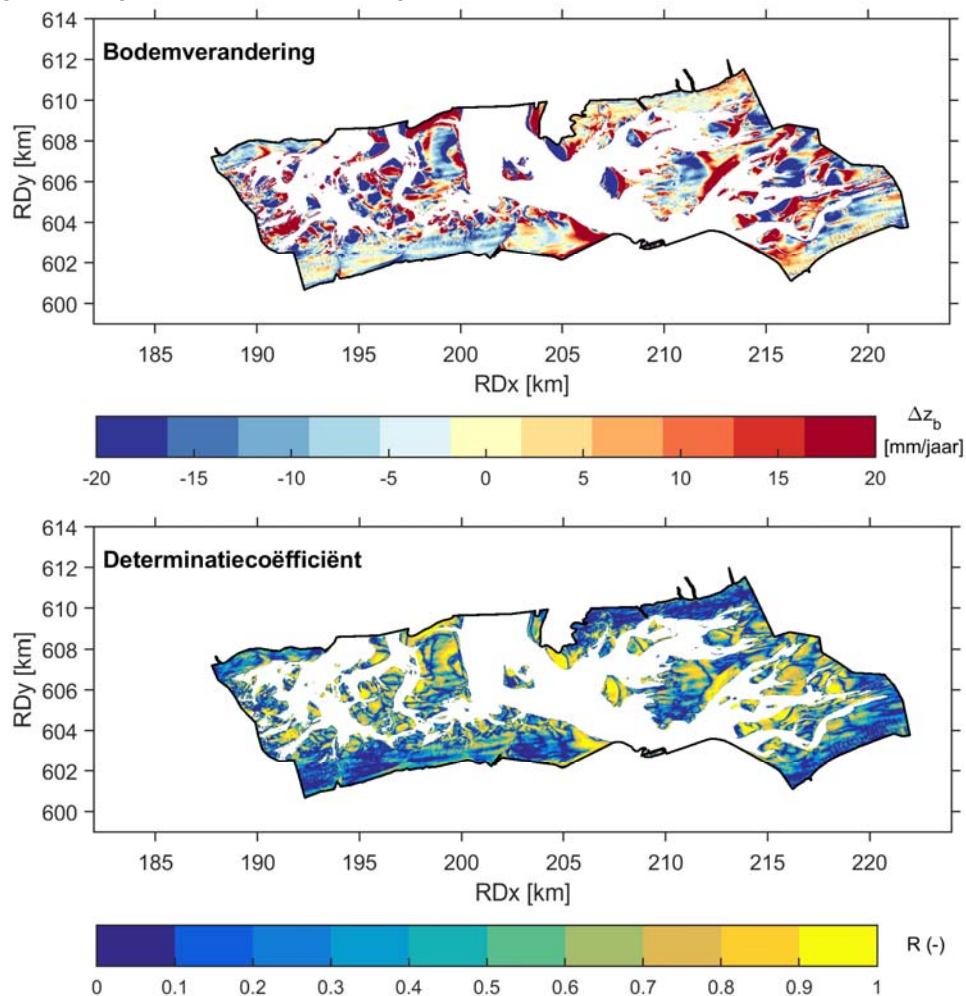


Figuur 3.2 Ruimtelijke verdeling van platen op basis van hoogtecontouren voor het hele projectgebied van 2010 (blauw) naar 2018 (rood). Boven: contourlijnen op NAP-0.25m, midden: contourlijnen op NAP+0m en onder: contourlijnen op NAP+0.50m.

3.3 Tijdsgemiddelde erosie-sedimentatie

Om de migratiepatronen tussen opvolgende opnamen samen te vatten in één enkele figuur zijn in Figuur 3.3 de trendcoëfficiënt van bodemhoogteverandering en de determinatiecoëfficiënt van deze trendbepaling per roosterpunt geplot. Met name rond de geulen zijn sterke gebieden van erosie en sedimentatie zichtbaar, waarbij deze trend ook zeker is (de determinatiecoëfficiënt is hoog). In het bijzonder is de migratie van het Roode Hoofd erg duidelijk. Een leuk detail is dat de overgang van sedimentatie naar erosie in de bodemveranderingkaart zeer duidelijk naar voren komt als een lokaal sterk blauwe streep in de determinatiecoëfficiëntkaart. Deze aanpak is dus erg inzichtelijk om grootschalige migratiepatronen te herkennen en af te bakenen.

Daarentegen, in de gebieden waar veel platen liggen, in het zuiden van het Pinkegat, in het gebied onder Ameland en onder Schiermonnikoog, laat de trendcoëfficiënt een onduidelijk patroon zien waar vlieglijnen in te herkennen zijn. De determinatiecoëfficiënt is in deze gebieden ook zeer laag. Dit duidt erop dat de onnauwkeurigheden in de opnamen in deze gebieden groter is dan de morfologische activiteit.



Figuur 3.3 Boven: trendcoëfficiënt van bodemhoogteverandering in mm/jaar gebaseerd op een lineaire trendbepaling. Onder: de determinatiecoëfficiënt behorende bij de trendcoëfficiënt. 1=helemaal zeker 0=slechte fit.

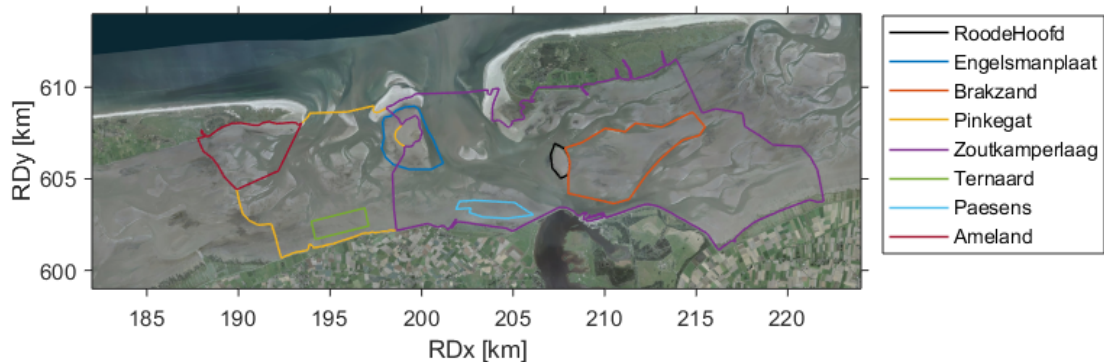
3.4 Samenvatting

Door alleen naar bodemveranderingen boven een significantiegrens te kijken, zijn door de tijdreeks heen migratie van platen binnen het projectgebied te herkennen. Mogelijke effecten van bodemdaling zijn niet waarneembaar. De diepebodemdaling is 8.5 mm voor het Pinketgat en 5 mm voor de Zoutkamperlaag, en het valt dus binnen de lijn der verwachtingen dat eventuele effecten inderdaad binnen de onzekerheidsband van 7cm blijken te vallen. Het migratiepatroon is voornamelijk oostwaarts georiënteerd. Door te beschouwen of individuele verschilkaarten in de tijdreeks van verschilkaarten passen, is visueel herkenbaar in welke deelgebieden er grote gebieden (vaak in de vorm van vliegbanen) van oppervlaktewater is gemeten in plaats van plaathoogte. Dit is het geval in de metingen 2013b, 2014a, 2014b, 2015b, 2016a en 2017b. De hypothese is dat ook in de andere opnamen wateroppervlak aanwezig is. Dit leidt tot een positieve bias van gemeten plaatareaal en vergroot daarmee de te hanteren onzekerheid in verdere analyse.

4 Analyse Hypsometrie

4.1 Inleiding

De hypsometrie van de kombergingsgebieden wordt onderzocht aan de hand van hypsometrische curven en tijdseries van het areaal boven een referentievlak. Hypsometrische curven geven de cumulatieve areaalverdeling in relatie tot de hoogte (dat wil zeggen, het verdeelt de totale oppervlakte van een doorsnede in een water- en een grondoppervlakte). Tijdseries voor een viertal referentiehoogten worden weergegeven omdat deze een duidelijker beeld geven van de ontwikkeling van het areaal. De hypsometrische berekeningen worden uitgevoerd over deelgebieden die wordt aangegeven door middel van polygonen. De polygonen van de kombergingsgebieden en de vijf kleinere deelgebieden zijn gevisualiseerd in Figuur 4.1.



Figuur 4.1 Ligging van de polygonen van het projectgebied, kombergingsgebied Pinkegat (west) en Zoutkamperlaag (oost) en de vijf kleinere deelgebieden (zie legenda).

Om de hypsometrische curven van verschillende datasets goed met elkaar te kunnen vergelijken is het van belang dat de datasets het interessegebied volledig weergeven (bedekken). Voor dit onderdeel van de morfologische analyse worden daarom de datasets gebruikt waarbij eventuele gaten in de dataset zijn ingevuld met ruimtelijke interpolatie.

In de figuren Figuur 4.2 tot Figuur 4.8 zijn de hypsometrische curven en tijdseries van gemeten areaal op 4 referentiehoogten (NAP-0.5m, NAP+0m, NAP+0.5m en NAP+1m) weergegeven.

4.2 Kombergingsgebieden

De hypsometrische curven van het Pinkegat laten zien dat het grootste deel van de platen onder NAP+0m liggen. De gemeten plaatarealen variëren 10-40% door de meetreeks heen. Er is niet zozeer een dalende trend waar te nemen, als wel een sprong in het gemeten areaal tussen de 2014- en de 2015 meting. Door het toevoegen van de twee meetpunten in 2018 lijkt er een stijgende lijn in areaal gemeten op NAP+0m en NAP-0.5m te ontstaan. Deze lijkt te beginnen na 2015.

In het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag zijn de variaties in gemeten plaatarealen kleiner, namelijk rond de 10% door de tijd. Daarbij is het belangrijk op te merken dat we naar een orde grotere oppervlakten kijken dan in het Pinkegat. De absolute oppervlakteveranderingen zijn dus niet perse kleiner. Ook in de Zoutkamperlaag zijn er grotere plaatarealen gemeten in 2018 dan in de direct voorgaande jaren. Wederom lijkt er in

de eerste jaren niet zozeer een dalende trend aanwezig te zijn als wel een sprong; deze keer tussen 2016 en 2017.

Een verklaring voor het verschil in variatie in plaatareaal tussen de twee kombergingsgebieden is mogelijk de actievere morfologische veranderingen als gevolg van geulmigratie. Dit is dynamischer binnen het Pinkegat dan in de Zoutkamperlaag. Migratie van geulen zorgt voor voortdurende erosie en aanzanding van aanliggende platen. Schommelingen in plaatareaal ten gevolge van deze actieve geulmigratie binnen het Pinkegat worden geschat op ongeveer 10% (Oost et al. 2017).

Intra-jaar fluctuaties in plaatoppervlak zijn te verwachten op basis van seizoensfluctuaties in stormfrequentie. De herfst en de winter zijn gemiddeld genomen stormachtiger dan het voorjaar en de zomer. In het begin van het voorjaar zou het plaatareaal daarom gemiddeld genomen wat lager kunnen zijn dan aan het eind van de zomer. Schommelingen op basis van dergelijke seizoensfluctuaties zijn in de areaalreeksen op kombergingsniveau niet terug te vinden. De najaarsmeting ligt in een aantal jaren zelfs onder de voorjaarsmeting. Het enige jaar waarin de tweede areaalmeting duidelijk boven de eerste meting ligt, is in 2018. In 2018 heeft de eerste meting echter in de zomer en de tweede meting aan het einde van de herfst plaatsgevonden, dus dit spreekt het mechanisme juist tegen.

4.3 Deelgebieden

Omdat in hypsometrische curven op de schaal van de kombergingsgebieden van het Pinkegat en Zoutkamperlaag lokale systeemresponsen allemaal samen worden gebundeld, worden ook enkele deelgebieden nader beschouwd om te proberen de opgemerkte trends beter te begrijpen. Zie Figuur 4.1 voor de polygonen die deze deelgebieden definiëren.

Zo is de sprong in gemeten areaal tussen 2014 en 2015 in het Pinkegat bijvoorbeeld ook duidelijk terug te zien in de hypsometrie van het deelgebied Ternaard, en dan met name voor het lager gelegen plaatareaal. Dit is visueel ook bevestigd in de tijdreeks van hoogtekarten: een terugtrekking van het plaatgebied in het zuiden van het kombergingsgebied tussen deze twee metingen. In het deelgebied Ameland (welke gebaseerd is op de diepebodemdalingen schotel ten zuiden van Ameland) is deze sprong niet echt aanwezig. Dit gebied ligt in de luwte van het wantij van Ameland en Ameland zelf, waardoor het beschut ligt voor erosie door golven. Dit kan erop duiden dat de terugtrekking van de platen, zoals wel aanwezig is in de rest van het gebied, te maken heeft met erosie tijdens hoogenergetische condities.

Als enige deelgebied tonen de areaaltijdreeksen van het deelgebied Ternaard wel een intra-jaar fluctuatie die in lijn ligt met seizoensfluctuaties op basis van stormfrequentie. In alle jaren dat er twee metingen in de tijdreeks zitten, dit gaat om 2011, 2016, 2017 en 2018, valt de najaar areaalmeting hoger uit dan de voorjaarsmeting. Een verklaring hiervoor is mogelijk de open ligging van het deelpolygoon ten opzichte van het zeegat; waarbij ook belangrijk is dat er geen geulen langs het deelgebied stromen die het erosiepatroon zouden kunnen overheersen.

Wanneer wordt ingezoomd op het deelgebied van de Engelsmanplaat, blijkt de dalende trend van het hoger gelegen wad rond NAP+0.5m, zoals beschreven door Wang (2007), nog altijd plaats te vinden. De nieuwe 2 metingen passen echter niet in de structurele trend die de rest van de meetserie toont (een afname van ~20% plaatareaal over 10 jaar). De dieper gelegen platen hebben echter een veel constanter gemeten plaatareaal, die 5% fluctueert maar geen consistente trend laat zien. Het sediment dat erodeert van de hoger gelegen platen is dus in

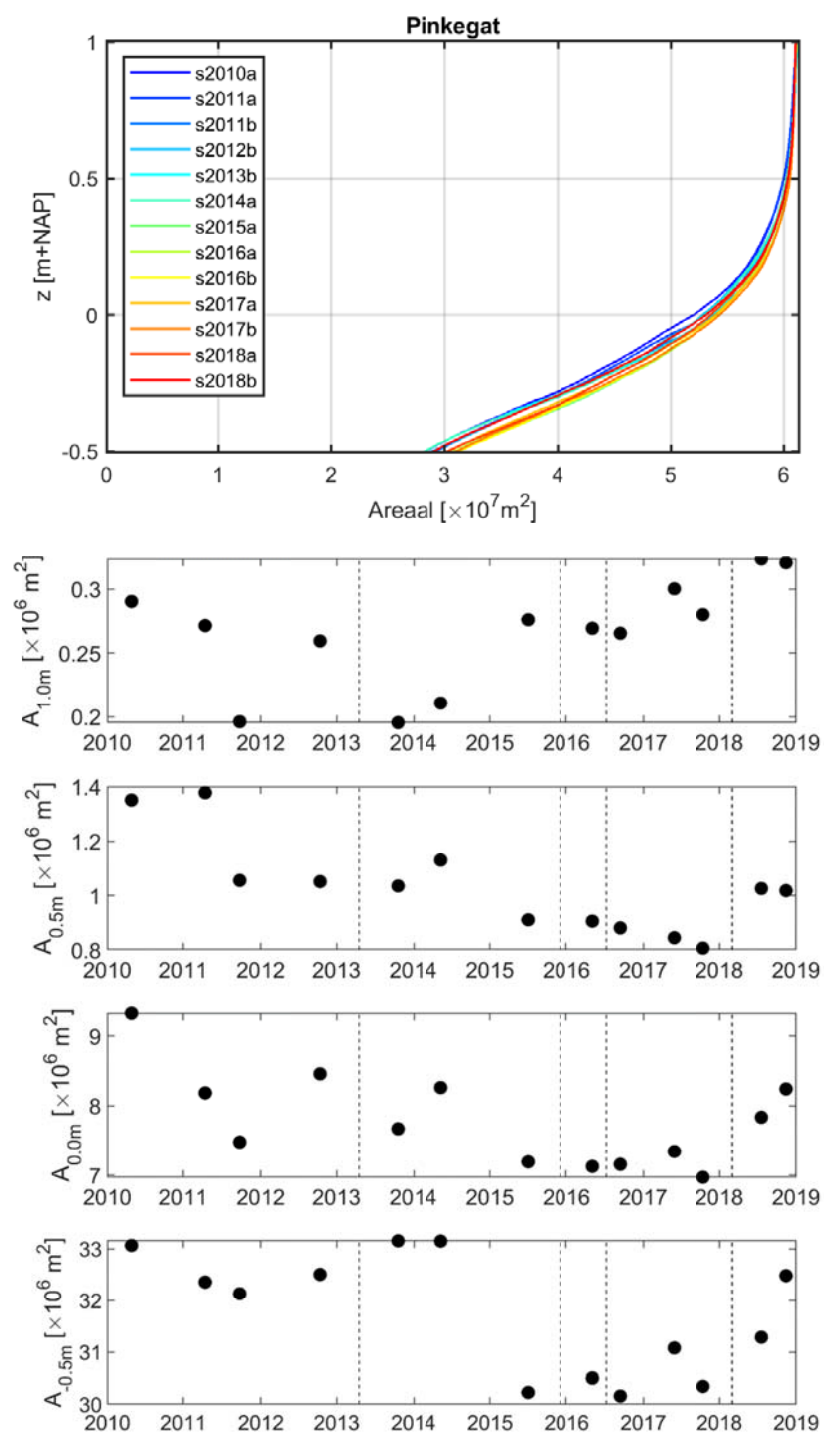
de lager gelegen contouren terecht gekomen. Dit is dus duidelijk een erosieverschijnsel en geen bodemdaling.

Als laatste worden de deelgebieden van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag beschouwd. In het deelgebied Paesens, westelijk van de getijdegeul, is versteiling van het intergetijdegebied waar te nemen. Het areaal op NAP+0m en daarboven bouwt langzaam uit, maar onder NAP+0m neemt het areaal juist af. Dit gebied ligt ook in de luwte van een wantijgebied, waardoor erosie door golfwerking bij stormen met westelijke windrichtingen hier minder invloed heeft.

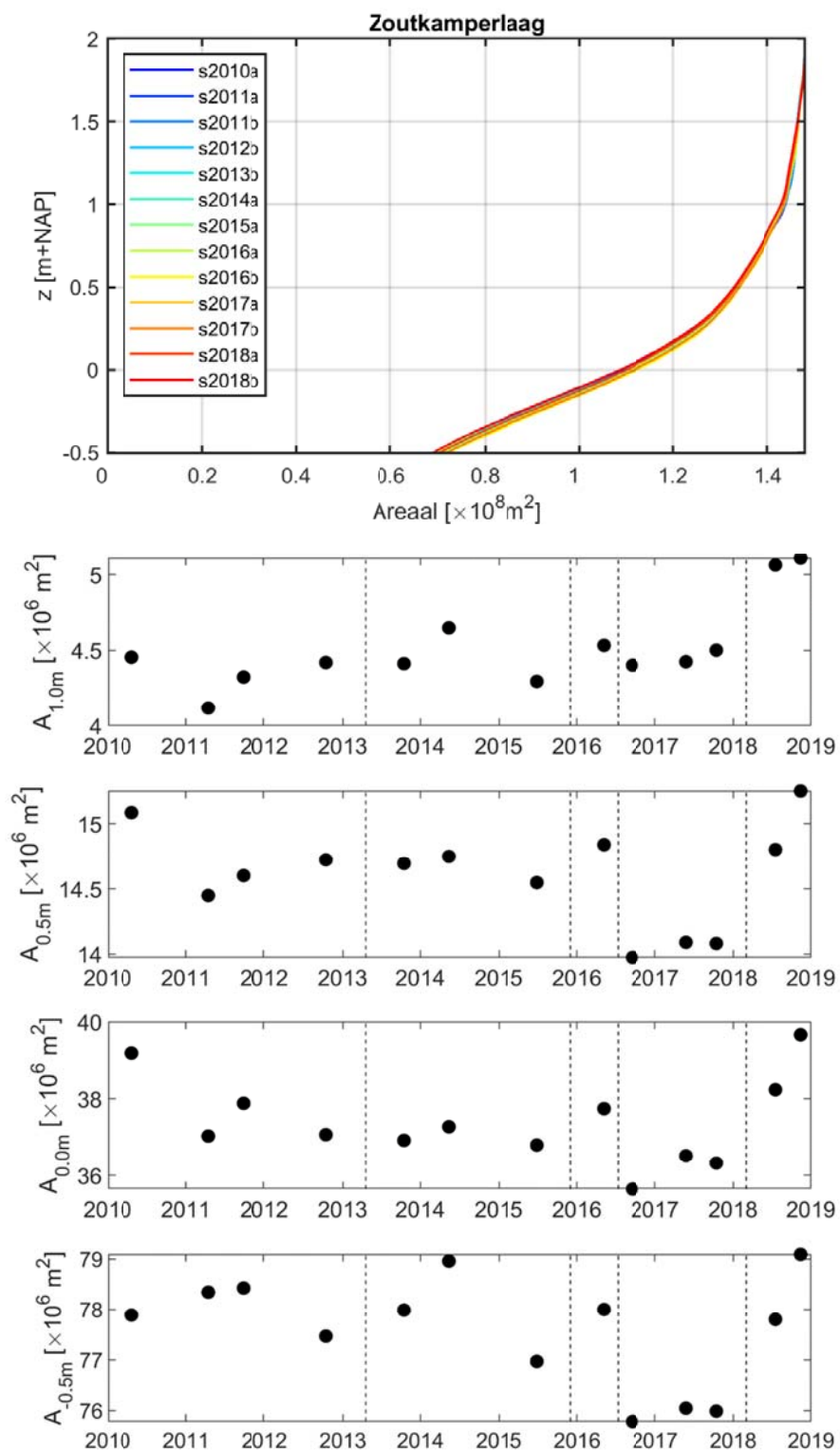
4.4 Samenvatting

Dit hoofdstuk analyseert de hypsometrie en tijdreeksen van areaal op een aantal referentiehoogten.

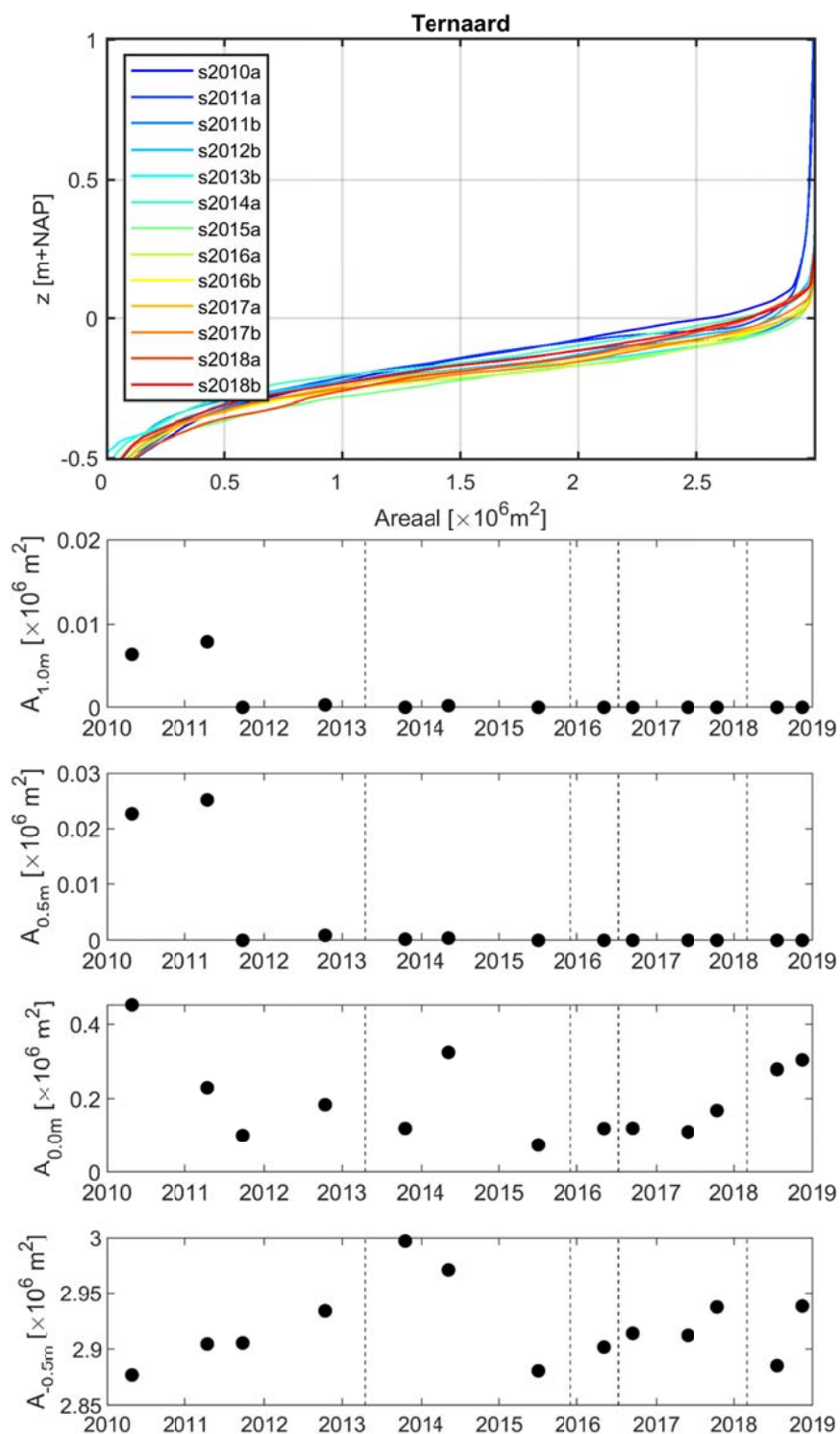
- Op kombergingsniveau verbreken de 2 nieuwe meetpunten alle indicaties van een dalende trend. Evenzo in deelgebieden Engelsmanplaat en Ameland.
- In Paesens is versteiling van de platen te zien vanaf najaar 2015; meer plaatareaal op en boven NAP+0m, minder op NAP-0.5m.
- Binnen deelgebied Brakzand vindt opbouw plaats van platen in het lage intergetijdengebied (onder NAP+0m) plaats.
- Seizoensfluctuaties in gemeten areaal lijken alleen voor het deelgebied Ternaard zichtbaar.



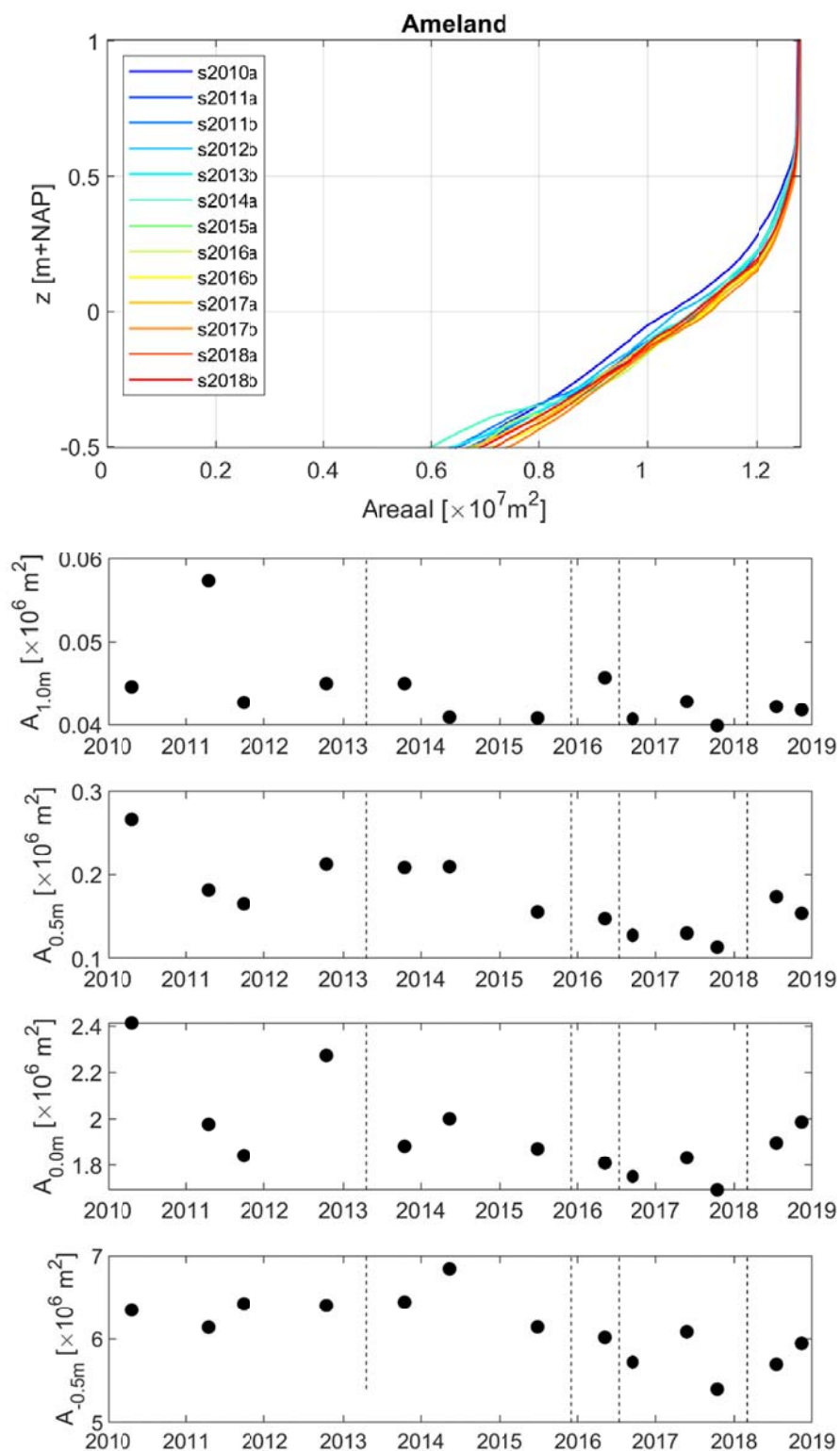
Figuur 4.2 Hypsometrische curven van het kombergingsgebied Pinkegat (boven) met tijdseries van gemeten areaal op 4 referentiehoogten (NAP+1.0m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP+0.5m respectievelijk). Verticale stippellijnen geven de wisseling van meetdienst weer.



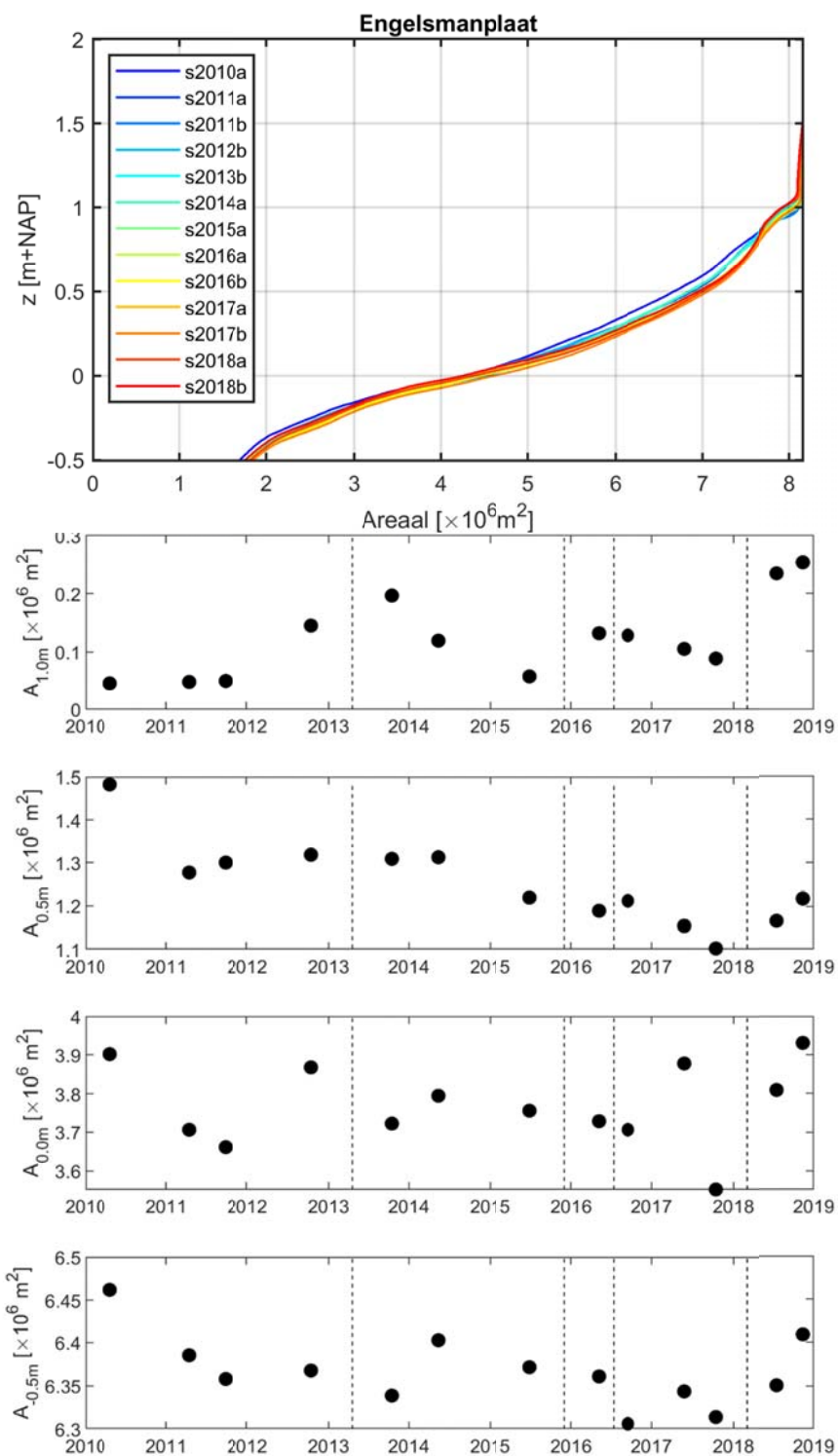
Figuur 4.3 Hypsometrische curven van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag (boven) met tijdseries van gemeten areaal op 4 referentiehoogten (NAP+1.0m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP+-0.5m respectievelijk). Verticale stippellijnen geven de wisseling van meetdienst weer.



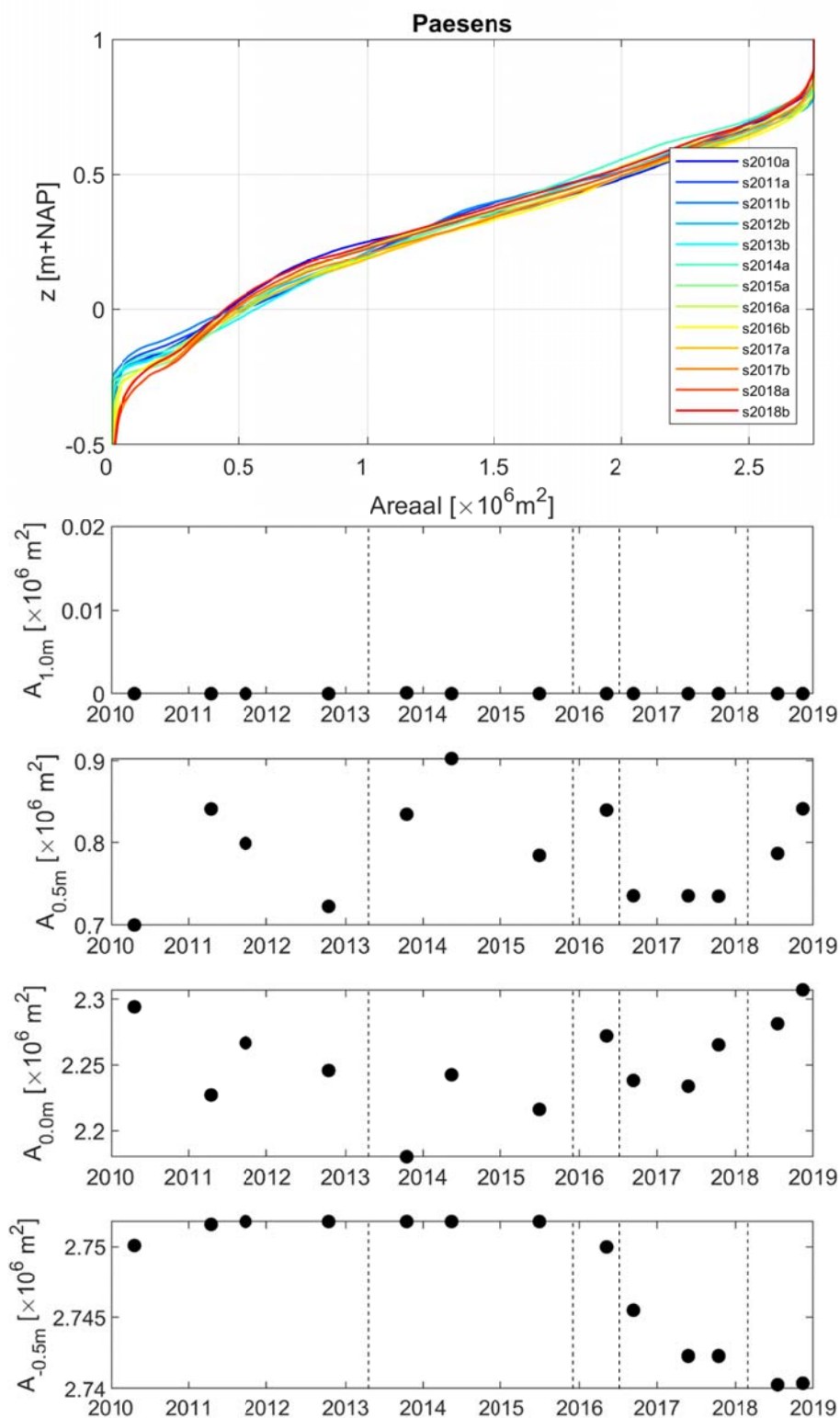
Figuur 4.4 Hypsometrische curven van deelgebied Ternaard binnen het Pinkegat (boven) met tijdseries van gemeten areaal op 4 referentiehoogten (NAP+1.0m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP+0.5m respectievelijk). Verticale stippellijnen geven de wisseling van meetdienst weer.



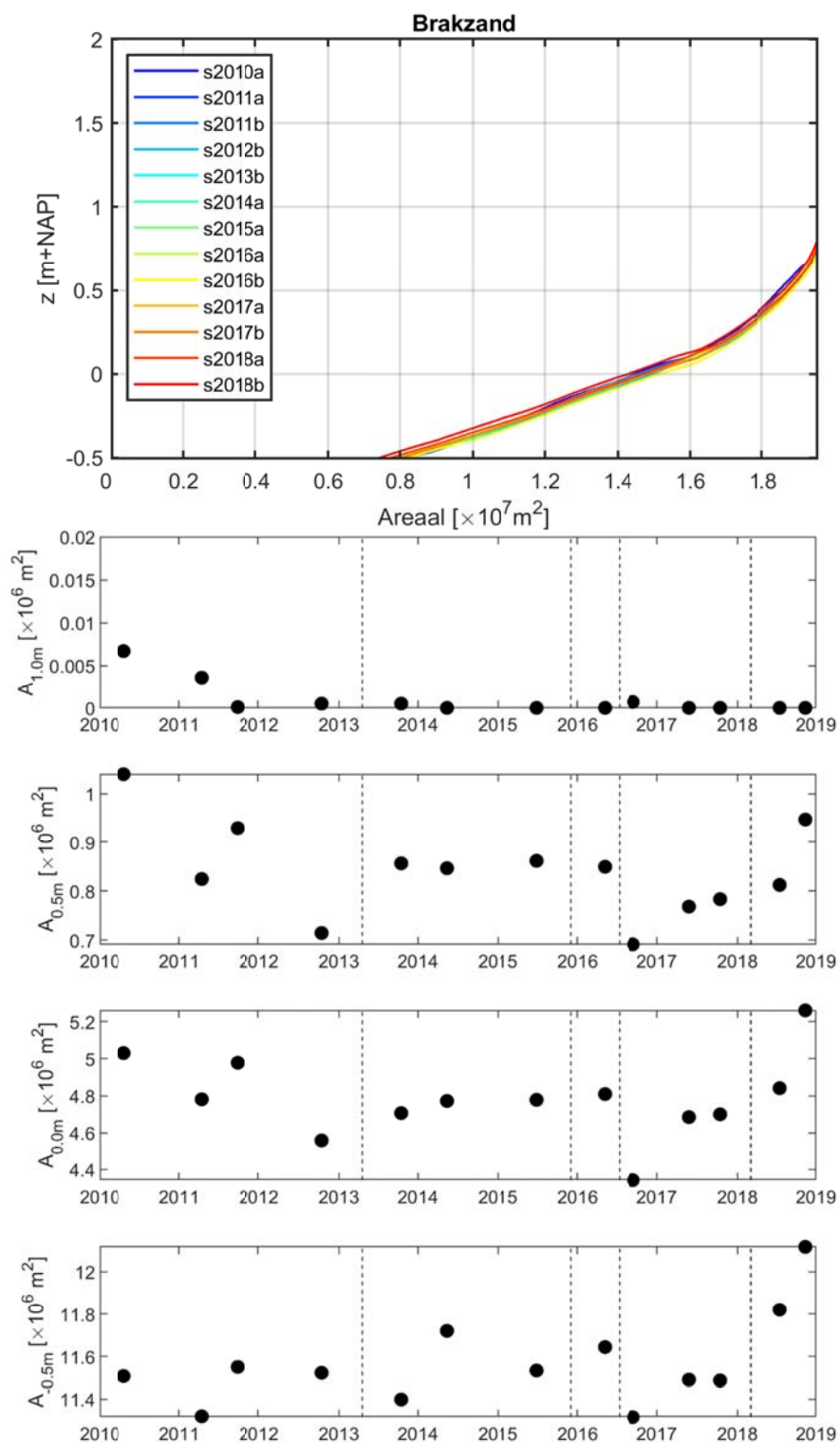
Figuur 4.5 Hypsometrische curves van het deelgebied onder Ameland (boven) met tijdseries van gemeten areaal op 4 referentiehoogten (NAP+1.0m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP+0.5m respectievelijk). Verticale stippellijnen geven de wisseling van meetdienst weer.



Figuur 4.6 Hypsometrische curves van het deelgebied rondom de Engelsmanplaat (boven) met tijdseries van gemeten areaal op 4 referentiehoogten (NAP+1.0m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP+0.5m respectievelijk). Verticale stippellijnen geven de wisseling van meetdienst weer.



Figuur 4.7 Hypsometrische curven van het deelgebied Paesens binnen de Zoutkamperlaag (boven) met tijdseries van gemeten areaal op 4 referentiehoogten (NAP+1.0m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP+/-0.5m respectievelijk). Verticale stippellijnen geven de wisseling van meetdienst weer.



Figuur 4.8 Hypsometrische curven van het deelgebied Brakzand binnen de Zoutkamperlaag (boven) met tijdseries van gemeten areaal op 4 referentiehoogten (NAP+1.0m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP+/-0.5m respectievelijk). Verticale stippellijnen geven de wisseling van meetdienst weer.

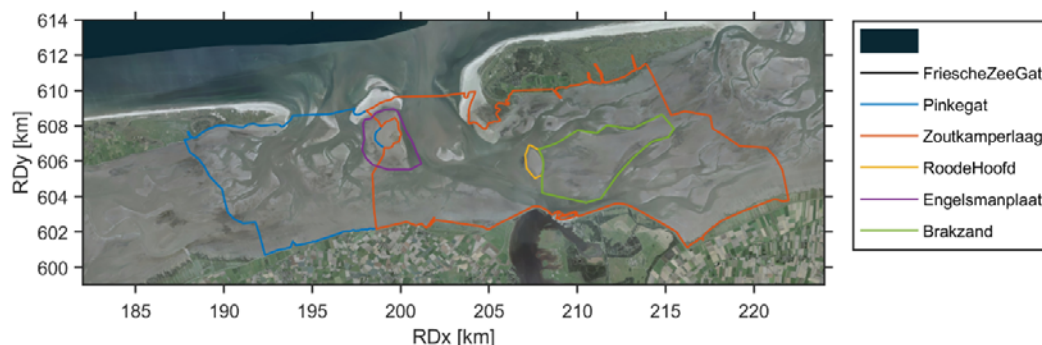
5 Onderzoek verklarende factoren

5.1 Inleiding

De tijdreeksen van gemeten areaal uit Hoofdstuk 4 zijn vaak grillig. Korte-termijn fluctuaties binnen de tijdreeksen zijn soms groter dan de trend over de gehele meetreeks. Dit heeft in voorgaande rapportage (Schrijvershof et al., 2018) geleid tot een analyse van variabelen die mogelijk een gedeelte van de variatie in het signaal kunnen verklaren. Onderzoeksvraag daarin was in hoeverre windcondities als proxy voor golfimpact tussen twee metingen de plaatsgevonden veranderingen kunnen verklaren, en daarnaast te onderzoeken in hoeverre het gemeten areaal verband houdt met de omstandigheden tijdens de meetcampagne. Hier werd gekeken naar windcondities, zonuren, waterstand en regenval.

Schrijvershof et al. (2018) concludeerde op basis van correlatieanalyse dat de meest verklarende indicator tijdens de metingen de laagwaterstand was. Spreiding in de areaalsignalen kon voor een deel worden verklaard uit laagwaterstand tijdens de meetcampagnes. De areaalverschillen tussen twee metingen bleken uit de correlatieanalyse verband te houden met het gemiddeld van het kwadraat van de windsnelheden uit het westelijk kwadrant. Een terugvoorspelling van de areaalveranderingen op basis van deze correlatie leidde echter niet tot meer inzicht in de geconstateerde trend.

Dit jaar is de correlatieanalyse opnieuw uitgevoerd met de twee extra meetpunten voor 2018 erbij. Er wordt gekeken of indicatoren gebaseerd op windstatistiek uit hogere kwantielen een groter verband houdt met de gemeten areaalverschillen (Donker 2015). Daarnaast is het moment in de springtij-doodtijcyclus als indicator tijdens de meetcampagnes meegenomen. Verder zijn niet alleen correlaties tussen veranderingen in kombergingsgebieden en indicatoren bepaald, maar zijn deze correlaties ook uitgerekend voor kleinere deelgebieden; namelijk de Engelsmanplaat, het Brakzand en het Roode Hoofd, zie Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Definitie van controlepolygonen voor de analyse van gemeten areaal en areaalveranderingen binnen het onderzoek naar trendverklarende factoren.

Tegen het einde van de analyseperiode 2019 zijn er door de NAM onverklaarbare systematische verschillen in gemiddelde bodemhoogte op hard oppervlakte geconstateerd binnen de meetreeks. Deze verschillen houden direct verband met gemeten plaatthoogten en daarmee plaatarealen, maar zijn niet doorgevoerd als correcties op de ruwe data zelf.

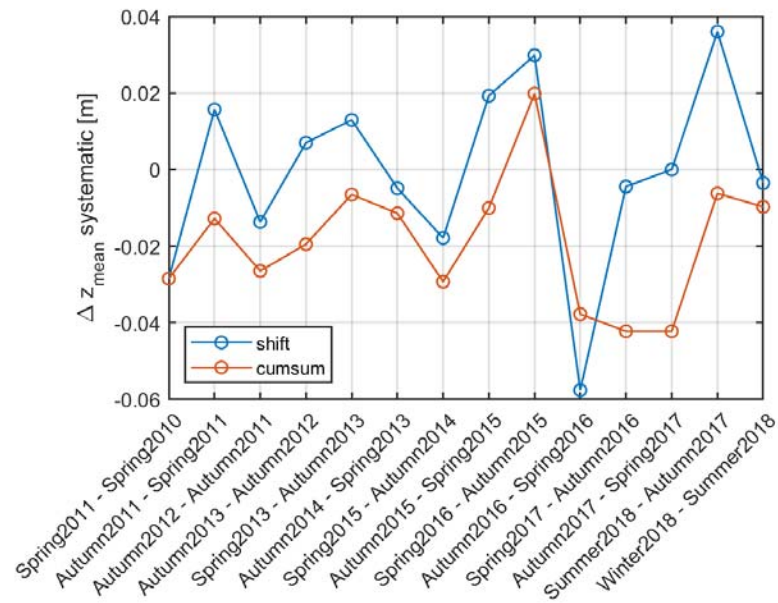
5.2 Onverklaarde systematische verschillen op hard oppervlakte

Elke meetdienst is gevraagd om in de voorbereiding van de LAS-dataset de metingen te corrigeren voor een mogelijke systematische fout die wordt geconstateerd op 8 ground-control-grids. In de 2018 datasets is gerapporteerd dat hiervoor de gehele dataset 1cm is opgetild. Wat deze bewerking precies is geweest bij voorgaande meetdiensten is niet meer te achterhalen.

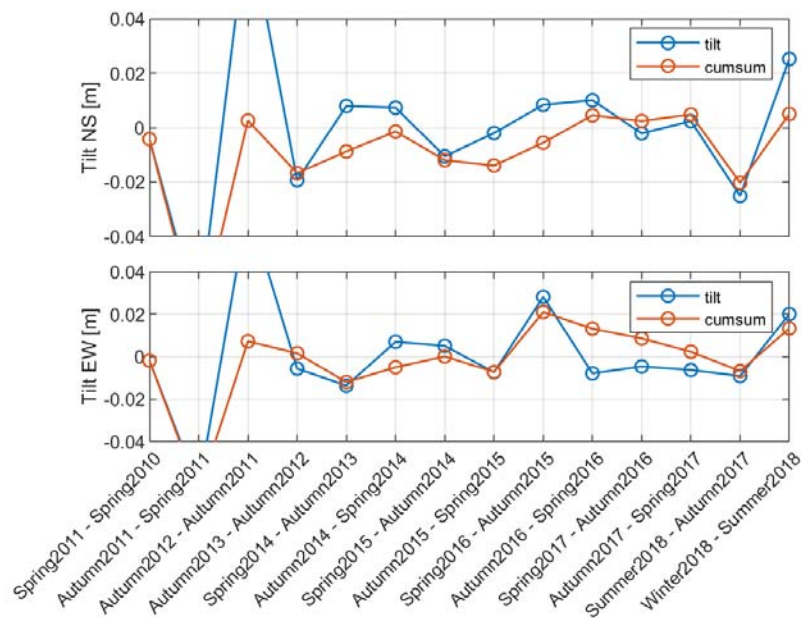
Analyse van de NAM (persoonlijke communicatie Shizhuo Liu) laat nu zien dat er binnen deze gecorrigeerde opnamen, nog steeds systematische verschillen zitten tussen de gemiddeld gemeten hoogte op hard oppervlakte van de eilanden en van de N361 op het vasteland. De 95% zekerheidsbanden rond de gemiddeld gemeten hoogte zijn volledig niet-overlappend. Één component van de verschillen tussen de gemiddeld gemeten hoogte is bodemdaling door gaswinning. Echter zijn deze systematische verschillen bij ongeveer de helft van de opeenvolgende metingen positief, en bij de andere helft negatief, zie Figuur 5.2. Dit betekent dat deze verschillen niet uit bodemdaling alleen kunnen voortkomen.

Naast een algemeen significant hoogteverschil tussen opeenvolgende opnamen is er ook een significant verschil in gemeten tilt in het signaal waar te nemen, zie Figuur 5.3. Tilt is het gemeten gemiddelde hoogteverschil tussen harde oppervlakten Noord minus Zuid (Tilt NS) en tussen harde oppervlakten Oost minus West (Tilt EW). Voornamelijk najaar 2011 vertoont een grote afwijking in tilt met de twee omliggende metingen. In de andere opnamen is de tilt beperkt tot ongeveer 2 cm. De cumulatieve tilt over de gehele meetserie is ongeveer 0 cm (NS) en 2 cm (EW). Dit is met name belangrijk in de discussie of wadplaten binnen het kombergingsgebied Pinkegat (West) ander gedrag vertonen dan wadplaten in kombergingsgebied Zoutkamperlaag (Oost).

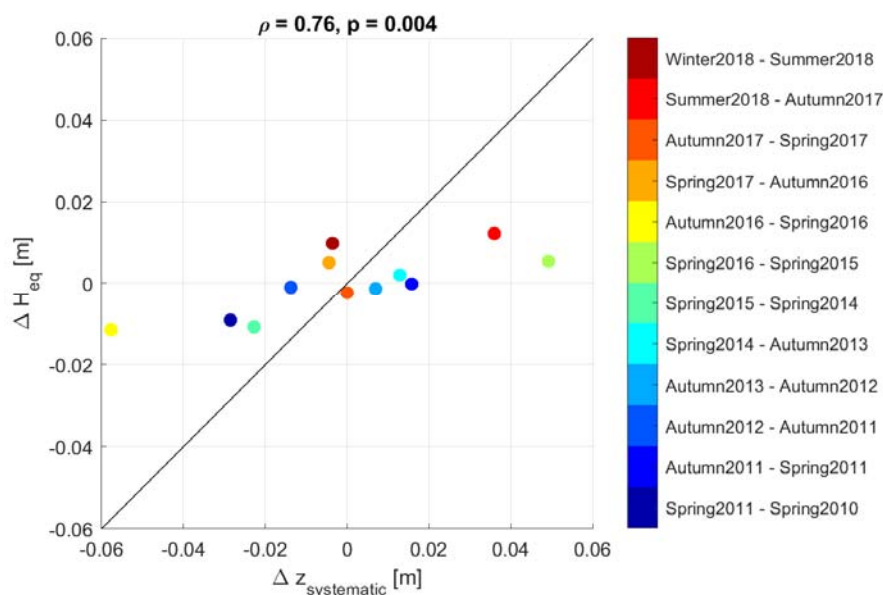
Om de gemiddelde hoogteveranderingen in hard oppervlak te relateren aan de metingen van de platen, is deze uitgezet tegen de equivalente plaathoogte (H_{eq} [m]), zie Figuur 5.4. Deze is gedefinieerd als het totale volume gemeten boven NAP-0.5m te delen door het totale oppervlakte van de controlepolygoon. Dit kan men zich voorstellen door de controlepolygoon als een bak met bodem op NAP-0.5m te zien waarin het totale sedimentvolume gemeten boven NAP-0.5m evenredig over wordt uitgespreid, en waar de hoogte van deze sedimentlaag dan de equivalente hoogte is. Deze grootte wordt bekeken in plaats van plaatareaal op een referentiehoogte omdat deze qua eenheid een-op-een te relateren is aan de systematische gemiddelde hoogteverschillen en niet afhankelijk is van een te kiezen referentievlak (zoals wel het geval is bij uitdrukken in termen van plaatareaal). De (Pearson) correlatiecoëfficiënt tussen de gemiddelde hoogteveranderingen van harde oppervlakten en de veranderingen in equivalente plaathoogte van wadplaten is $\rho = 0.76$ en deze correlatie is significant. Het valt op dat de gesuggereerde relatie uit Figuur 5.4 niet 1:1 is, maar eerder 3:1. Dit kan deels verklaard worden door het feit dat gemiddeld genomen slechts op zo'n 55% van het oppervlak van het controlepolygoon van het Friesche Zeegat wadplaten boven NAP-0.5 liggen, zie Figuur 5.5. Het normalisatieoppervlak is dus groter dan het gemiddelde oppervlak liggende boven NAP-0.5m.



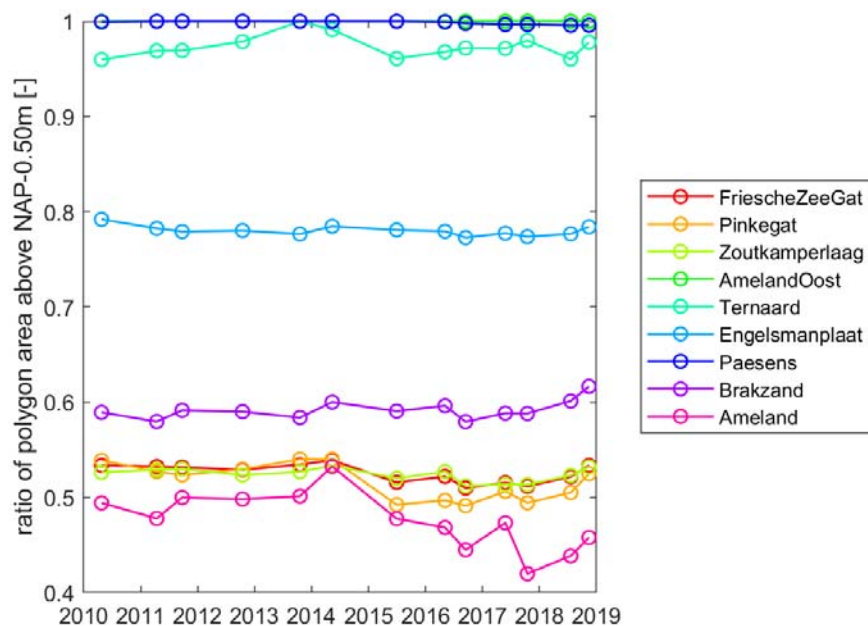
Figuur 5.2 Tijdsree van de geconstateerde systematische verschillen tussen gemiddelde hoogte van hard oppervlakte op de eilanden en de N361 op het vasteland. De gerapporteerde shift in blauw, het cumulatieve signaal in rood.



Figuur 5.3 Tijdsree van de constateerde systematische verschillen in tilt tussen Noord en Zuid (boven) en Oost en West (onder). De gerapporteerde shift in blauw, het cumulatieve signaal in rood.



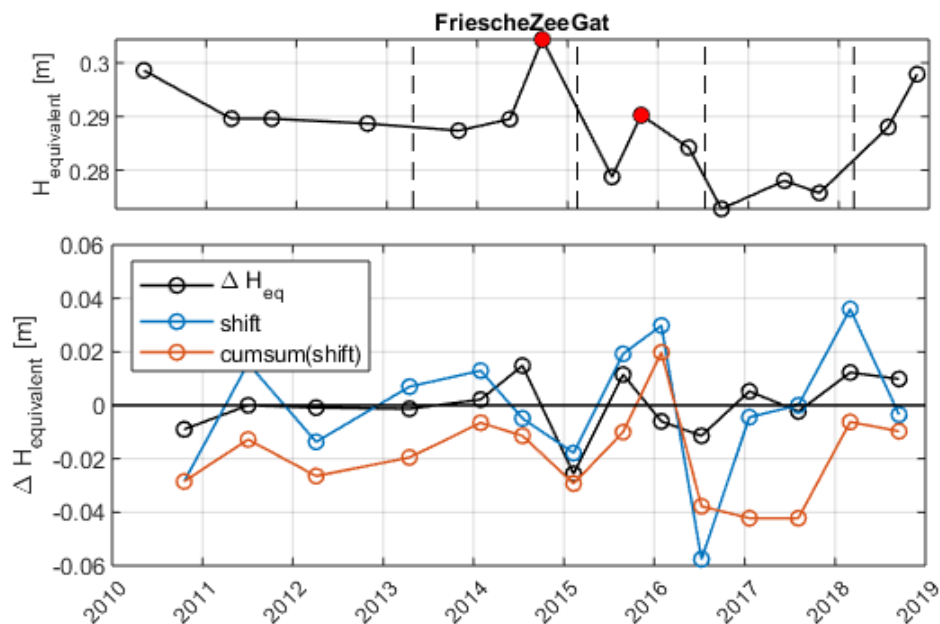
Figuur 5.4 Correlatieplot tussen de door de NAM gerapporteerde systematische verschillen in gemiddelde hoogte van de harde oppervlakten op eilanden en snelweg (x-as) en de gemeten equivalente hoogte van wadplaten (volume van roosterzellen liggend boven NAP-0.5m binnen het projectgebied gedeeld door oppervlakte van controlepolygoon van projectgebied) (y-as). De kleuren tonen plaats in de tijdreeks van opvolgende metingen.



Figuur 5.5 Tijdseries van het aandeel wadplaten (ratio) binnen het totale oppervlakte van een (deel)polygoon. Kleur geeft het betreffende deelpolygoon aan, zie legenda voor interpretatie.

Om een verdere indruk te krijgen van de relevantie van de systematische verschillen geconstateerd door de NAM op hard oppervlak, is de hoogteshift samen met de meetreeks, uitgedrukt in equivalente hoogte, geplot in Figuur 5.6. De systematische afwijkingen in hoogteshift zijn van dezelfde orde grootte als de fluctuaties in het gemeten equivalente hoogte, en zijn daarom van grote invloed op de meetreeks. Verder kan de cumulatieve tijdreeks van de hoogteshift in het tweede paneel een indicatie bieden van de terugvoorspelling van de meetreeks op basis van de hoogteshift. Daarbij valt op dat de wisseling in meetdienst (aangegeven met de gestippelde verticale lijnen) in 2015, 2016 en 2018 samenvallen met extra grote systematische afwijkingen, wat impliceert dat elke meetdienst toch een andere vorm van processing op de las-data toepast die de meetreeks sterk beïnvloedt.

De tilt component van de systematische verschillen is eveneens orde centimeters, waardoor een eventuele correctie op de data zowel de shift als de tilt component van de systematische verschillen moet aanpakken om een goede vergelijking van trends tussen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag mogelijk te maken. De grootte van de cumulatieve tilt over de meetreeks van 2cm tussen Oost en West geeft nu aan dat een vergelijking van trends tussen deze twee deelgebieden sterk wordt beïnvloed door deze systematische verschillen.



Figuur 5.6 Equivalente plaathoogte ($H_{eq} = \frac{V_{>-0.5m}}{A_{pol}}$) van het Friesche Zeegat. Boven: gemeten equivalente plaathoogte, waarbij de rode marker metingen aangeven die op basis van vlakdekking van goedgekeurde vliegbanen zijn afgekeurd (2014b en 2015b). Onder: in zwart gemeten hoogteverschillen, in blauw de door de NAM geconstateerde hoogteshift en in rood de cumulatieve som van de door de NAM geconstateerde hoogteshift.

5.3 Meteorologische condities tijdens meetcampagnes

De indicatoren die worden gebruikt om de omstandigheden tijdens de meetcampagnes te beschrijven zijn binnen deze analyse licht aangepast ten opzichte van de vorige analyse. Waar in Schrijvershof et al. (2018) onderscheid werd gemaakt tussen condities vlak voor aanvang van de metingen (2 dagen voorafgaand) en condities tijdens de metingen zelf, zijn

de condities nu bepaald voor deze omhullende periode: de gehele duur van de meetcampagne plus de twee dagen voorafgaand. Reden hiervoor is dat de meeste meetcampagnes over enkele dagen zijn uitgespreid. De metingen op de laatste dag van de meetcampagne zullen dus in dezelfde mate zijn beïnvloed door condities tijdens de eerste dag van de meetcampagne als metingen op de eerste dag door condities enkele dagen voorafgaand aan de campagne.

Een indicator voor de fase in de springtij-doodtij cyclus is toegevoegd aan de analyse. Deze indicator beschrijft in radialen wat de fase is ten opzichte van springtij. (Positieve waarden dus net na springtij, negatieve waarden voor het springtij. Een waarde van $-\pi$ of π impliceert dus meting op doortij). De definitie van alle geanalyseerde variabelen is samengevat in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van het gemeten areaal

Parameter	Definitie
W	Gemiddelde windsnelheid tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [m/s]
HW	Gemiddeld hoogwater tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [NAP+cm]
LW	Gemiddeld laagwater tijdens de metingen en 2 dagen vooraf [NAP+cm]
TD	Gemiddelde duur van het dalend tij tijdens de metingen en 2 dagen vooraf
Phi	Fase in de springtij/doodtij cyclus [$-\pi, \pi$] (0=springtij)

De indicatoren zijn geheel berekend uit gegevens van meetstation Lauwersoog. De afhankelijke variabele beschouwd in de analyse is het gemeten areaal met bodemhoogte boven NAP+0m. Alle resultaten van de correlatieanalyse zijn opgenomen in Appendix **Error! Reference source not found.** Hierin zijn scatterplots gemaakt van indicator versus gemeten areaal, en is de correlatiecoëfficiënt berekend tussen de signalen.

Belangrijk voor interpretatie van deze correlatiecoëfficiënten is om op te merken dat voor een dataset van slechts 13 meetpunten een verband tussen de indicator en het gemeten signaal een significantiegrens heeft van een correlatie rond 0.5-0.6 ligt. (Met andere woorden: de kans dat de correlatie tussen een indicator en het gemeten areaal voortkomt uit een signaal van volledig willekeurig trekkingen is kleiner dan 5%.) Met meer meetpunten in de tijdreeks gaat deze significantiegrens omlaag: de kans om door een reeks van willekeurige trekkingen de spreiding in het gemeten areaal te kunnen 'verklaren' wordt steeds kleiner naarmate het aantal datapunten groter wordt. Aangezien deze meetreeks niet meer dan 13 datapunten bevat, moet een afhankelijkheid dus behoorlijk sterk zijn om te kunnen onderscheiden van willekeur.

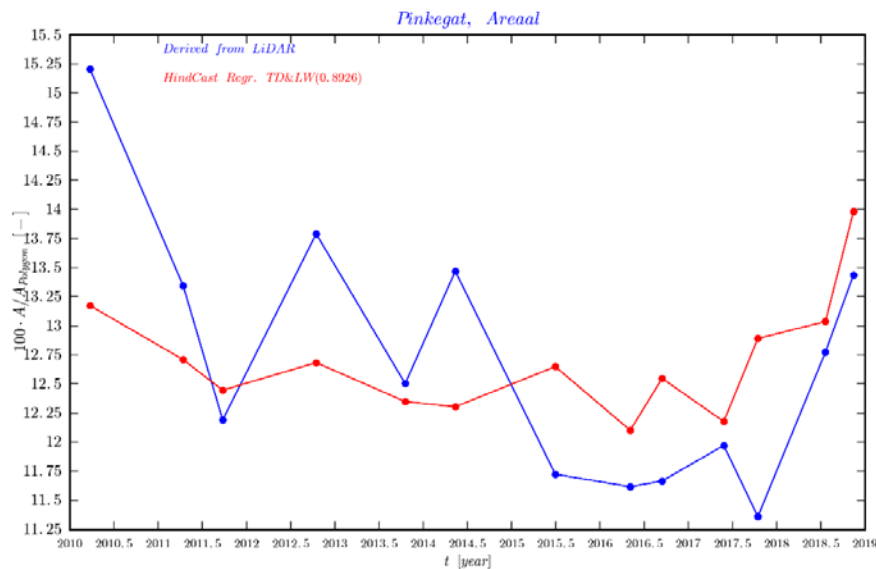
Binnen het rapport wordt volstaan met het bespreken van de resultaten van deze analyse.

- Uit de berekening van de fase in springtij-doodtij cyclus valt op te merken dat bij alle opnamen gepoogd is om zoveel mogelijk tijdens springtij te meten. Door omstandigheden en omdat de opnamen soms over meerdere dagen verspreid plaatsvonden vond er echter toch soms een klein faseverschil plaats. Deze fase in springtij/doodtij correleert niet met het gemeten signaal.
- Evenals vorig jaar geconcludeerd is, correleert de gemiddelde windsnelheid tijdens de meetcampagne niet met het gemeten plaatareaal.
- Voor het deelgebied Pinkegat is LW de meest verklarende indicator (hoogste correlatie $\rho \sim 0.4$). Dit is niet verwaarloosbaar maar ook geen significante correlatie. Voor deelgebieden binnen de Zoutkamperlaag is HW net zo verklarend als LW ($\rho \sim 0.5$).

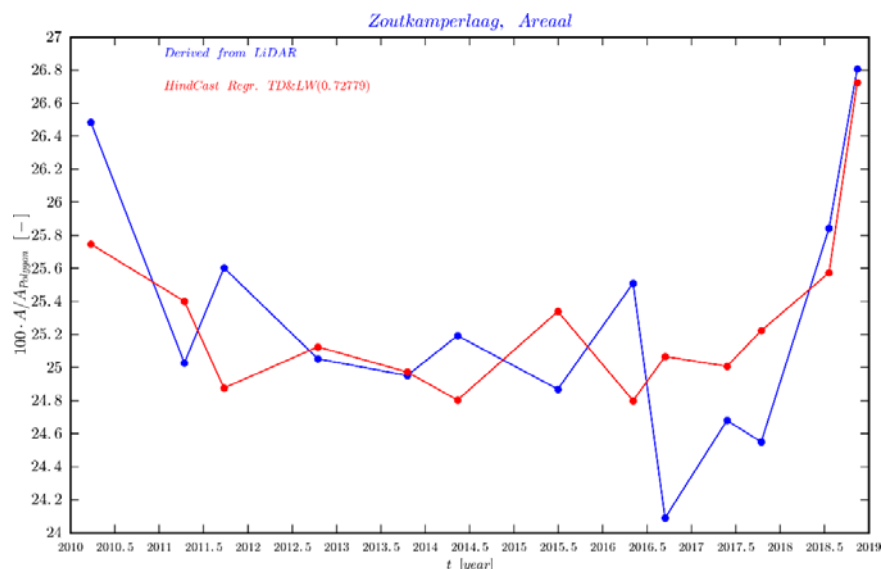
- Binnen de Zoutkamperlaag is de duur van het dalend tij de meest verklarende indicator ($\rho \sim 0.6$). Dit is een nieuwe observatie ten opzichte van de vorige analyse. Het verband is negatief: kortere ebduur leidt tot een hoger gemeten areaal omdat de afstroom van de platen in een kortere tijdspan moet plaatsvinden.

Omdat zowel TD als LW (voor een deel van het projectgebied) een (bijna) significante afhankelijkheid vertonen, is een terugvoorspelling gemaakt met behulp van multivariabele regressie. Hiervoor is op basis van de 13 meetpunten een lineair verband afgeleid naar deze twee indicatoren. Het signaal dat puur is voorspeld op basis van dit lineaire verband is naast het gemeten areaal geplott, zie Figuur 5.7 en Figuur 5.8. Deze terugvoorspelling toont een tijdreeks van areaal in het geval dat alle spreiding in de meetreeks een functie zou zijn van de indicatoren TD en LW.

De spreiding van de meetpunten in het signaal voor de Zoutkamperlaag laat zich beter verklaren door LW en TD (27% verklaard) dan de spreiding van de metingen in het Pinkegat (11% verklaard). Het terug voorspelde signaal toont dat de stijging van gemeten areaal in de twee meetpunten van 2018 uitgelegd kunnen worden aan de hand van hogere laagwaterstanden en een kortere ebduur tijdens de metingen dan gemiddeld. Dit verband is herkenbaar in beide kombergingsgebieden. Voor beide kombergingsgebieden is het grote gemeten areaal in 2010 niet te verklaren door LW en TD.



Figuur 5.7 Gemeten areaal kombergingsgebied Pinkegat (als percentage van oppervlak van de controlepolygoon) in blauw. Terugvoorspelling op basis van LW1 en TD in rood.



Figuur 5.8 Gemeten areaal komborgingsgebied Zoutkamperlaag (als percentage van oppervlak van de controlepolygoon) in blauw. Terugvoorspelling op basis van LW1 en TD in rood.

5.4 Meteorologische condities tussen twee meetcampagnes in

De correlatieanalyse naar areaalveranderingen en indicatoren die meteorologische condities tussen twee meetcampagnes beschrijven, leverde vorig jaar geen overtuigend verband op. De indicator die het meest correleerde met de gemeten areaalveranderingen was de integraal van het kwadraat van de westelijke windsnelheden over de gehele periode tussen de meetcampagnes in. Om te zien of windstatistiek uit hogere kwadranten tot een sterker verband kan leiden, zijn een aantal variaties op de indicator E1 opgesteld (Donker, 2015). Deze zijn samengevat in Tabel 5.1. Omdat niet op voorhand duidelijk is of het beter is te kijken naar de gehele periode tussen twee metingen of juist windstatistiek over een kortere of langere periode voorafgaand aan de tweede meting, is ook gevarieerd in het beschouwde tijdsinterval. Er is gekeken naar tijdsperiodes van 14 dagen terug, 28 dagen terug, 56 dagen terug, 112 dagen terug en de gehele periode tussen de twee meetcampagnes. Verder zijn alle indicatoren in deze analyse gemiddeld over de tijdsperiode waarover ze zijn gedefinieerd. Dat heeft als gevolg dat ze beter zijn te vergelijken binnen de tijdreeks van areaalveranderingen (ze schalen niet mee als de tijdsperiode tussen twee metingen groter is) en de grootte behorende bij de eenheid beter herkenbaar is.

Tabel 5.1 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van de gemeten areaalveranderingen. Het gedefinieerde tijdsinterval is gevarieerd: er is gekeken 14 dagen terug, 28 dagen terug, 56 dagen terug, 112 dagen terug en de gehele periode tussen de twee meetcampagnes.

Parameter	Definitie
E ₁	Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid binnen het gedefinieerde tijdsinterval [m ² /s ²]
E _w	Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid van de west georiënteerde wind binnen het gedefinieerde tijdsinterval [m ² /s ²]
E _o	Gemiddelde van het kwadraat van de snelheid van de oost georiënteerde wind binnen het gedefinieerde tijdsinterval [m ² /s ²]
R ₁	Gemiddelde regenval [mm/hr] binnen het gedefinieerde tijdsinterval
Eclim13	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 1/3 kwantiel is overschreden binnen het gedefinieerde tijdsinterval [-]

Eclim13w	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 1/3 kwantiel is overgeschreden binnen het gedefinieerde tijdsinterval EN de windrichting uit het westen was [-]
Eclim13o	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 1/3 kwantiel is overgeschreden binnen het gedefinieerde tijdsinterval EN de windrichting uit het oosten was [-]
Eclim005	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 1/3 kwantiel is overgeschreden binnen het gedefinieerde tijdsinterval [-]
Eclim005w	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overgeschreden binnen het gedefinieerde tijdsinterval EN de windrichting uit het westen was [-]
Eclim005o	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overgeschreden binnen het gedefinieerde tijdsinterval EN de windrichting uit het oosten was [-]

De indicatoren zijn wederom geheel berekend uit gegevens van meetstation Lauwersoog. De afhankelijke variabele beschouwd in de analyse is de genormaliseerde areaalverandering (percentage oppervlakteverandering per jaar) op NAP+0m. Deze areaalveranderingen variëren op kombergingsniveau tussen de 0 en $\pm 3\%$ per jaar. Voor de kleinere referentiegebieden zijn de gemiddelde areaalveranderingen groter: tussen de 0 en $\pm 10\%$ per jaar. Alle resultaten van de correlatieanalyse zijn opgenomen in Appendix **Error! Reference source not found.** Hierin zijn scatterplots gemaakt van indicator versus gemeten gemiddelde areaalverandering per jaar, en is de correlatiecoëfficiënt berekend tussen de signalen.

Binnen het rapport wordt wederom volstaan met het bespreken van de resultaten van deze analyse.

- Windcondities over een kortere periode (2 weken tot 2 maanden) correleren sterker met de gemeten areaalveranderingen dan wanneer het hele interval wordt meegenomen. Er is niet één specifiek tijdsinterval aan te wijzen voorafgaand aan de tweede meting die voor alle deelgebieden en indicatoren een sterkere correlatie laat zien.
- De indicatoren gebaseerd op windstatistiek uit de hogere kwantielen correleert niet significant beter dan gemiddelde windsnelheden. Dit geldt zowel voor het gehele tijdsignaal als voor de opdeling in Oost en West componenten. De correlaties zijn overigens ook niet slechter.
- De indicatoren gebaseerd op twee weken voorafgaand aan de tweede meting correleren het meest voor het kombergingsgebied Pinkegat (tot $\rho \sim 0.5$). Voor kombergingsgebied Zoutkamperlaag zijn indicatoren gebaseerd op twee maanden voorgaand aan de tweede meting het sterkst gecorreleerd (tot $\rho = 0.6$).
- Inzoomen op deelgebieden binnen het projectgebied heeft niet tot meer inzicht van mogelijke verbanden tussen indicatoren en gemeten areaalveranderingen geleid.

Het is daarnaast opvallend dat het teken van de afhankelijkheid tussen Eclim en areaalveranderingen geregeld van teken wisselt wanneer de periode waarover deze wordt bepaald varieert. De hypothese is dat een hogere waarde voor Eclim zou moeten leiden tot een negatieve areaalverandering (een stormachtiger klimaat leidt tot meer golfenergie wat weer voor plaaterosie zou moeten leiden). Wanneer een grote correlatie wordt gevonden tussen Eclim en gemeten areaalverandering, maar het verband echter positief is in plaats van negatief, ontkracht deze correlatie dus de hypothese dat de indicator volgens het te begrijpen mechanisme een verklaring biedt voor een deel van de spreiding.

Omdat de areaalveranderingen tussen twee metingen waarschijnlijk sterk zijn beïnvloed door de systematische verschillen in gemiddelde hoogte van de harde oppervlakten (zie paragraaf 5.2) en wel in een sterkere mate dan het windklimaat doet, is er geen terugvoorspelling van areaalveranderingen gemaakt op basis van het windklimaat.

5.5 Samenvatting

In dit hoofdstuk zijn verschillende oorzaken onderzocht voor de spreiding van de metingen binnen de meetserie van plaatareaal. Hieruit vallen de volgende conclusies te trekken:

- De gemiddelde gemeten equivalente plaathoogte en het daarbij behorende plaatareaal worden sterk beïnvloed door systematische afwijkingen in de gemiddeld gemeten hoogte van harde oppervlakten die zijn geconstateerd door de NAM.
- Correlatieanalyse naar verklaring van gemeten plaatareaal op basis van heersende condities tijdens de meetcampagnes levert op dat de gemiddelde ebduur en de gemiddelde laagwaterstand tijdens de metingen een deel van de spreiding kunnen verklaren.
- Een verband tussen areaalveranderingen en windcondities tussen twee opeenvolgende metingen kan niet worden getrokken uit de huidige meetreeks. Dit is mogelijk zo omdat de areaalveranderingen te sterk samenhangen met de systematische meetverschillen.
- Voor verdere analyse wordt aanbevolen om de geconstateerde hoogteverschillen in meer detail te onderzoeken om tot een aanpak te komen waar voor zowel de hoogteshift als de tiltcomponent kan worden gecorrigeerd.

6 Analyse lange-termijn trends

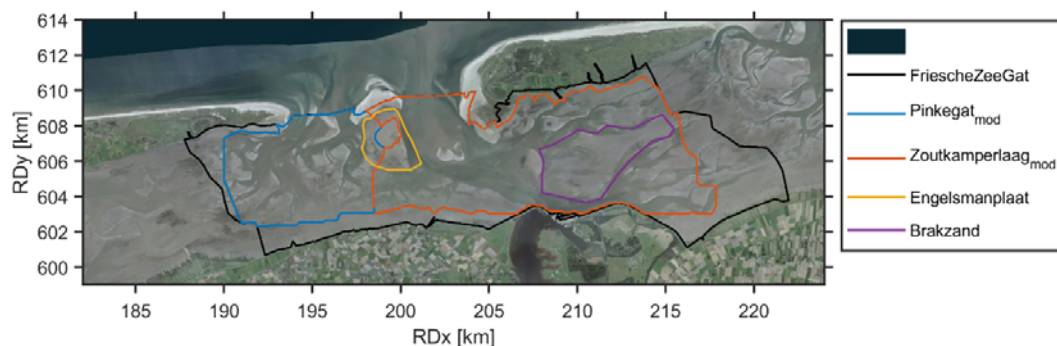
6.1 Inleiding

Sinds 1927 zijn er bodemopnamen van het Friesche Zeegat gemaakt, welke gezamenlijk de vaklodingen dataset van Rijkswaterstaat vormen. De oudere datasets zijn gedigitaliseerd vanuit papieren contourkaarten. Sinds 1980 zijn de vaklodingen op een hogere resolutie en digitaal beschikbaar. Deze data heeft de basis gevormd voor een analyse naar plaatareaalverdelingen op het geaggregeerde niveau van het Friesche Zeegat (dus Pinkegat en Zoutkamperlaag gezamenlijk), zie bijvoorbeeld Elias et al. (2012), Nederhoff et al. (2017), Wang et al. (2018). In deze analyses wordt voor het gehele zeegat geconcludeerd dat het totale sedimentvolume binnen het kombergingsgebied tot 1990 is toegenomen met ongeveer $80 \times 10^6 \text{ m}^3$. Na 1990 lijkt het sedimentvolume te stabiliseren. Het doel van dit hoofdstuk is om trends uit de meetreeks zoals verzameld door de NAM te plaatsen binnen de lange-termijn trends die kunnen worden geconstateerd uit de vaklodingen dataset.

6.2 Aanpak

Om de meetreeks die nu is ontstaan uit de NAM LiDARopnamen te koppelen aan de vaklodingen dataset zal deze vaklodingen dataset opnieuw moeten worden geanalyseerd, waarbij de splitsing van de dataset naar kombergingsgebied moet worden gemaakt. Daarnaast kunnen voor de LiDAR dataset enkel analyse naar plaatareaal boven NAP-0.5m gedaan worden. Daarom wordt ook de analyse van de vaklodingen dataset boven dit referentieniveau uitgevoerd.

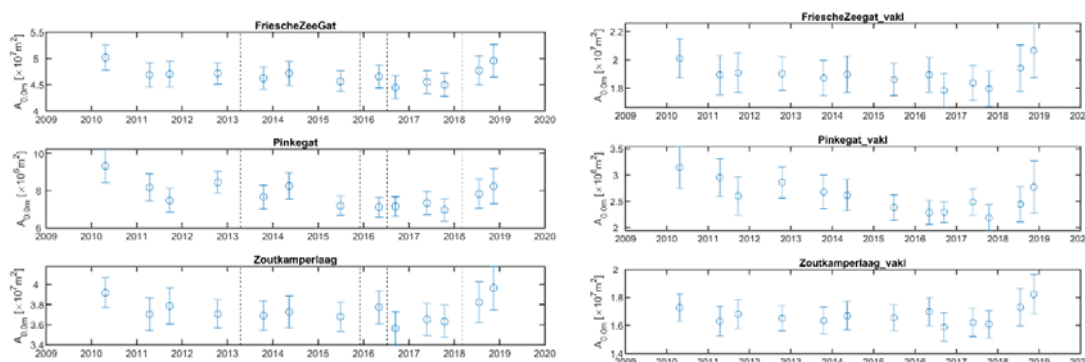
Voor de vaklodingen dataset zijn de vaklodingen in 'pure' vorm gebruikt zoals aangeleverd door Rijkswaterstaat. In de meeste jaren waren de vaklodingen niet vlakdekkend richting de eiland- en vastelandranden toe. Er is een omhullende polygoon gedefinieerd waarin in alle jaren vaklodingen data beschikbaar is, en deze omhullende is gebruikt om de deelgebieddefinities van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag bij te snijden, zie Figuur 6.1. Dit voorkomt dat er bathymetrie moet worden ge-extrapoleerd naar de domeinranden toe. De data binnen deze gecropte polygoonen is dan wel in alle jaren vlak dekkend. Een alternatieve aanpak zou wezen om kusthoogte/lidar/jarkus data uit nabij liggende jaren te gebruiken om randen van de domeinen op te vullen. Dit is bijvoorbeeld in de analyse in Wang (2018) gebeurd. Deze complementaire datasets zijn echter vaak niet in hetzelfde jaar beschikbaar als de vaklodingen zijn ingemeten. Dit heeft als nadeel dat een discussie over de rol van onzekerheden door individuele meetmethoden en/of opnames niet meer kan worden gevoerd. Er is daarom besloten om alleen naar vaklodingen data te kijken.



Figuur 6.1 Definitie van de deelgebieden waarin de hypsometrie van de vaklodingendataset wordt geanalyseerd.

Op deze aanpak is één uitzondering gemaakt; namelijk voor de vaklodingen 2005/2006. Hier is de helft van het projectgebied ingewonnen in 2005 en de helft in 2006. Deze twee datasets zijn aan elkaar geplakt en aangevuld met “kusthoogte-metingen” op de wadplaten. Hier is toe besloten omdat het bij deze meting duidelijk was dat data uit alle drie de bronnen binnen 1 jaar ingemeten was.

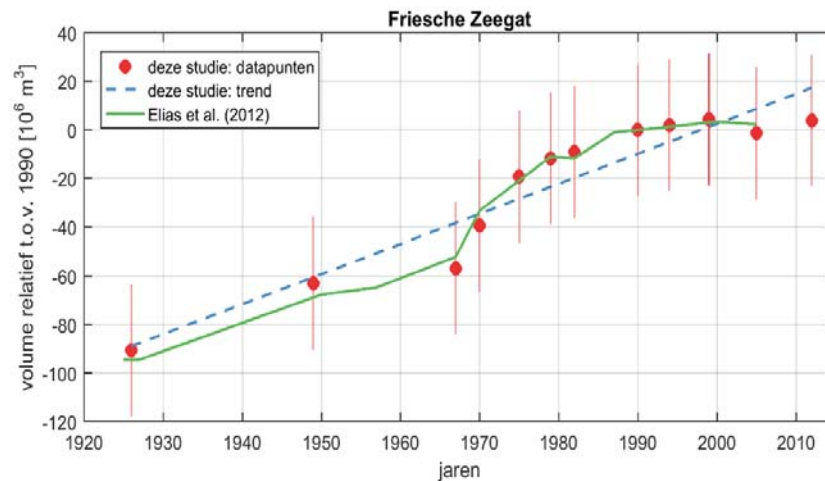
Bij het aanpassen van de polygonen moet één voetnoot geplaatst worden. Waar de wantijgebieden de natuurlijke grens vormen van het ene kombergingsgebied naar het andere, zijn de randen van de gecropte polygonen slechts kunstmatige randen. Hierdoor is de morfologie op deze randen dynamischer dan de wantijranden. Er is voor de LiDAR dataset een vergelijking gemaakt van tijdreeksen gebaseerd op de volledige polygonen en de gecropte, zie Figuur 6.2. Hoewel de grootheden op de y-as tot een factor 3 kunnen verschillen door het weg croppen van de (relatief hooggelegen) randen van de kombergingsgebieden, is het signaal van de tijdreeksen niet wezenlijk veranderd. Dit geeft vertrouwen in de aanpak om de vaklodingendata te analyseren binnen een tijd-vlakdekkend polygoon.



Figuur 6.2 Areaal op NAP+0m voor het gehele projectgebied (boven), het kombergingsgebied Pinkegat (midden) en kombergingsgebied Zoutkamperlaag (onder), voor de originele polygonen zoals gehanteerd in Hoofdstuk 4 (links) en de gecropte polygonen (rechts).

6.3 Reproducieren reeds gepubliceerde trend op schaal Friesche Zeegat

Er is hierboven reeds geconcludeerd dat het croppen van het projectgebied naar een vaklodingen dekkend polygoon geen invloed heeft op het signaal van de LiDAR 2010-2018 dataset. Om te controleren of conclusies gemaakt over de vaklodingen dataset mét en zonder aanvulling van de data op elkaar lijken, is de analyse naar totale sedimentvolumeveranderingen ten opzichte van het referentiejaar 1990 opnieuw gedaan. Hiervoor moet Figuur 6.3 met Figuur 6.4 worden vergeleken. Hoewel de exacte grootheden op de y-as niet precies overeenkomen (dit is ook niet te verwachten wanneer niet dezelfde controlepolygoon wordt aangehouden), blijft de trend behouden. Er kan dus worden geconcludeerd dat het beschouwen van enkel de vaklodingenserie tot dezelfde conclusies zal leiden.



Figuur 6.3 Figuur overgenomen uit Nederhof et al. (2017). Ontwikkeling van het sedimentvolume van het Friesche zeegat. Referentie naar 'deze studie' refereren dus naar de studie Nederhof et al. (2017). In rood zijn de berekende volumeveranderingen geplott. De verticale lijnen geven de onzekerheid in deze punten weer. In blauw is de trendlijn weergegeven. De groene vaste lijn geeft een trendlijn weer die in Elias (2012) is gerapporteerd.



Figuur 6.4 ontwikkeling van het sedimentvolume van het Friesche Zeegat (de huidige analyse o.b.v. enkel vaklodingen in de gecropte gebiedspolygoon).

6.4 Analyse hypsometrie

Op een vergelijkbare manier als de hypsometrische curven in Hoofdstuk 4 zijn weergegeven, laten Figuur 6.5 tot Figuur 6.8 hypsometrische curven en bijbehorende tijdreeksen zien voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.

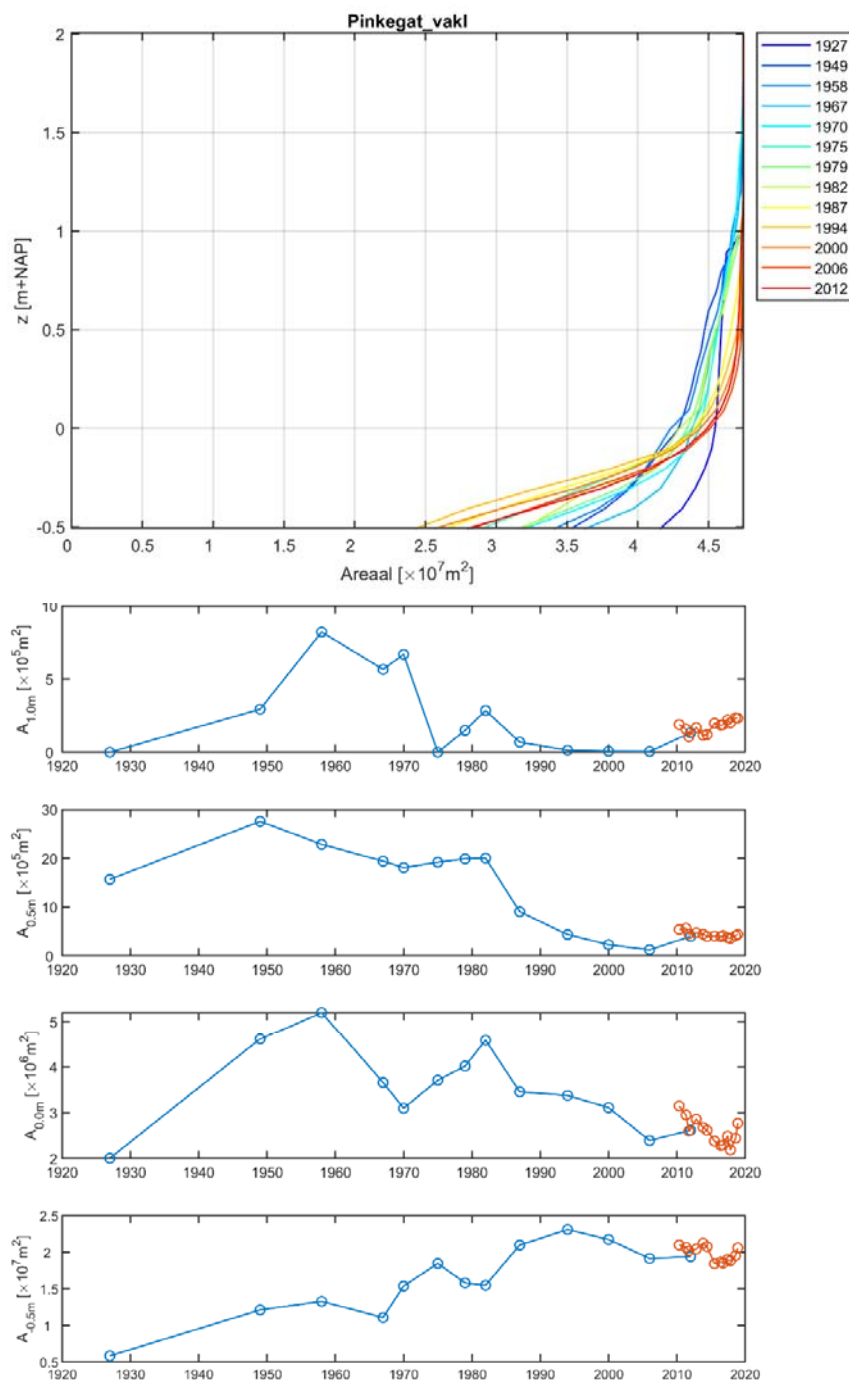
Wanneer de hypsometrische curve voor het kombergingsgebied Pinkegat uit Figuur 6.5 op zichzelf wordt bekeken, lijkt er een sterke sprong te ontstaan in het plaatareaal van de hogergelegen platen rond 1986. Wanneer de tijdreeksen van de vaklodingen echter beter worden bekeken, wordt het duidelijk dat de Engelsmanplaat zich voor dit jaar deels nog binnen het Pinkegat polygoon bevond, en dat de plaat zich na 1986 in steeds mindere mate in deze polygoon bevindt. Daarom is ook de hypsometrie van het gecombineerde gebied van het kombergingsgebied Pinkegat met de Engelsmanplaat weergegeven, zie Figuur 6.6. Hier is de neergang van gemeten areaal op NAP+0m weggevlakt. De oostelijke migratie van de Engelsmanplaat verklaart dus deels de neerwaartse trend van de hoger gelegen platen.

Het lageregelegen plaatareaal, rond NAP-0.5m, is sinds het begin van de metingen toegenomen tot 1994. Daarna is er een afname van areaal op de referentiehoogten onder NAP+0.5m waar te nemen van ongeveer 10% over de gehele periode 1994-2012. De

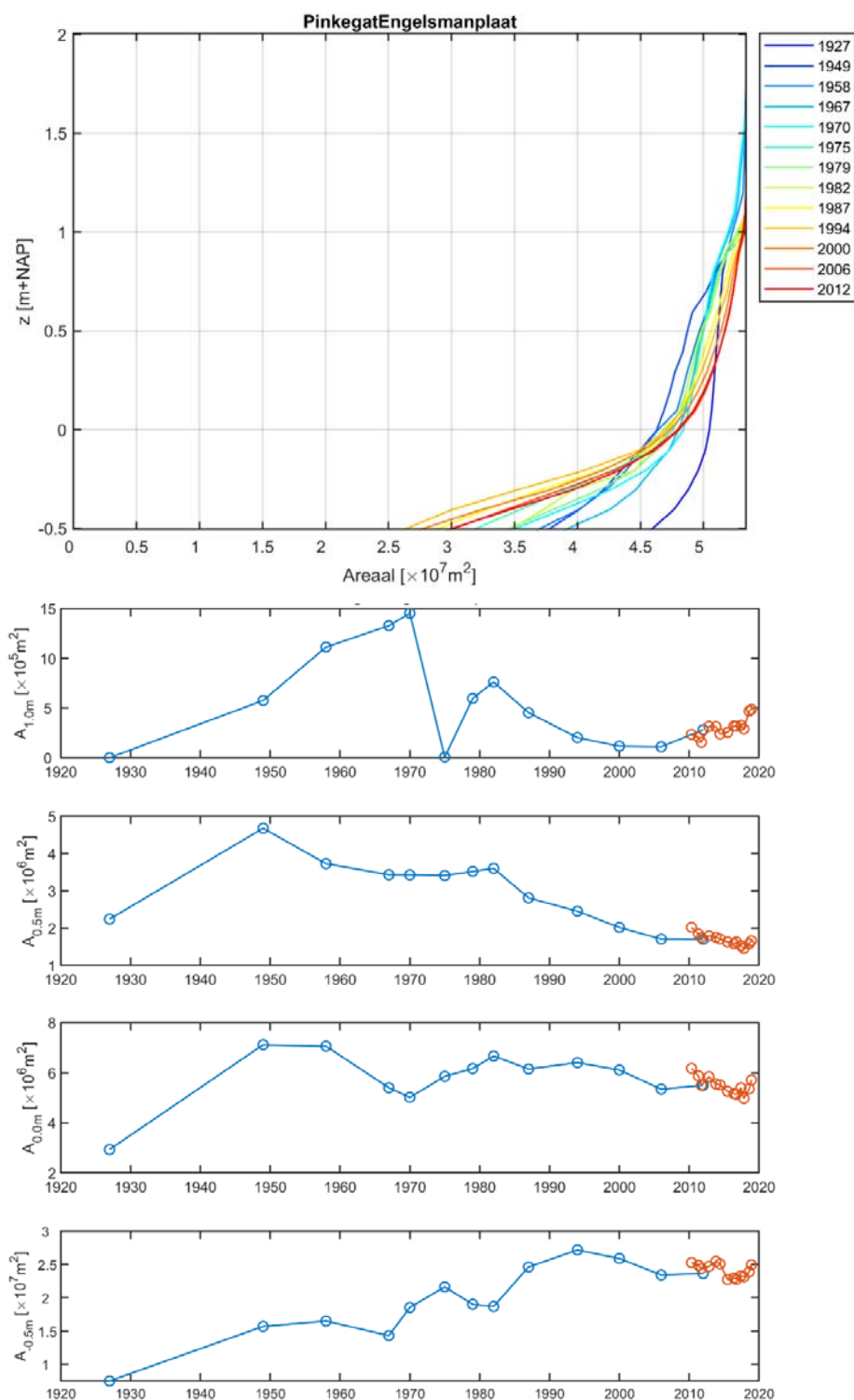
springerigheid van het signaal van de NAM LiDAR dataset geeft echter een indicatie van de onzekerheid van deze trend.

Ter referentie aan de hypsometrie van het Pinkegat is ook de hypsometrie van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag bekeken. De tijdreeksen van gemeten areaal geven een erg springerig signaal. De platen binnen de Zoutkamperlaag zijn onderhevig geweest aan veranderingen door de afsluiting van de Lauwerszee, wat tot zandhonger in de dieper gelegen geulen leidde. Initieel lijkt het erop dat dit sediment zich van hogergelegen platen naar de geulen heeft verplaatst (wat de dip in gemeten areaal rond 1970 zou kunnen verklaren). Daarna vallen de gerapporteerde plaatarealen juist weer hoger uit, maar vanaf 1987 is het areaal min of meer constant.

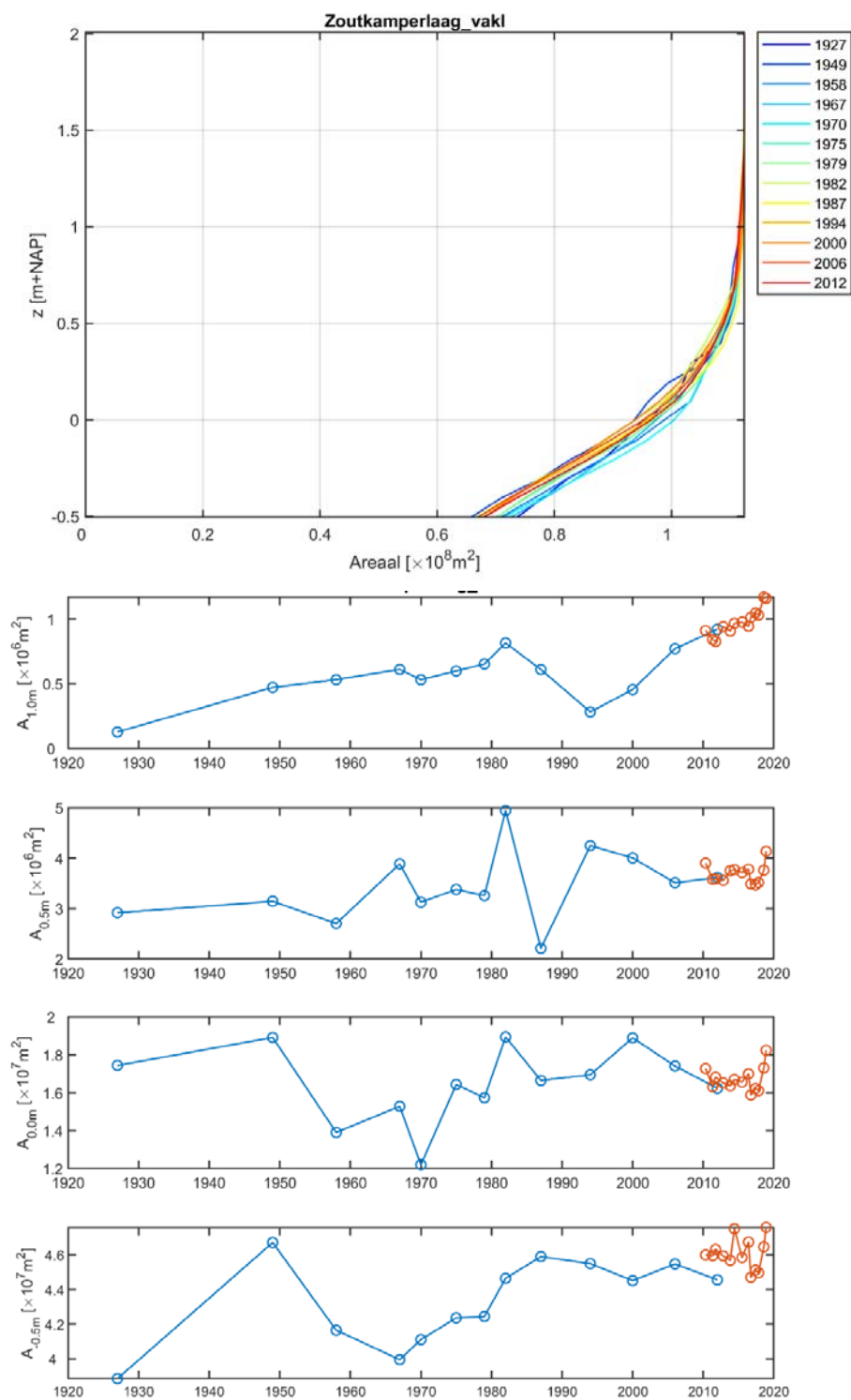
Het deelgebied Brakzand kan het gedrag van de platen binnen het kombergingsgebied Zoutkamperlaag beter verklaren. Wanneer op Figuur 6.8 wordt ingezoomd, is er nog altijd een springerig signaal zichtbaar, maar wordt op alle referentiehoogten een afname zichtbaar vanaf 1982. De totale afname van plaatareaal in deelgebied Brakzand is eveneens ongeveer 10%. Veranderingen van deze orde grootte zijn te verwachten ten gevolge van de aanpassing van het systeem aan de afsluiting van de Lauwerszee. Wat opvalt is dat deze afname sinds 2016 niet meer terug is te herkennen in de NAM LiDAR metingen.



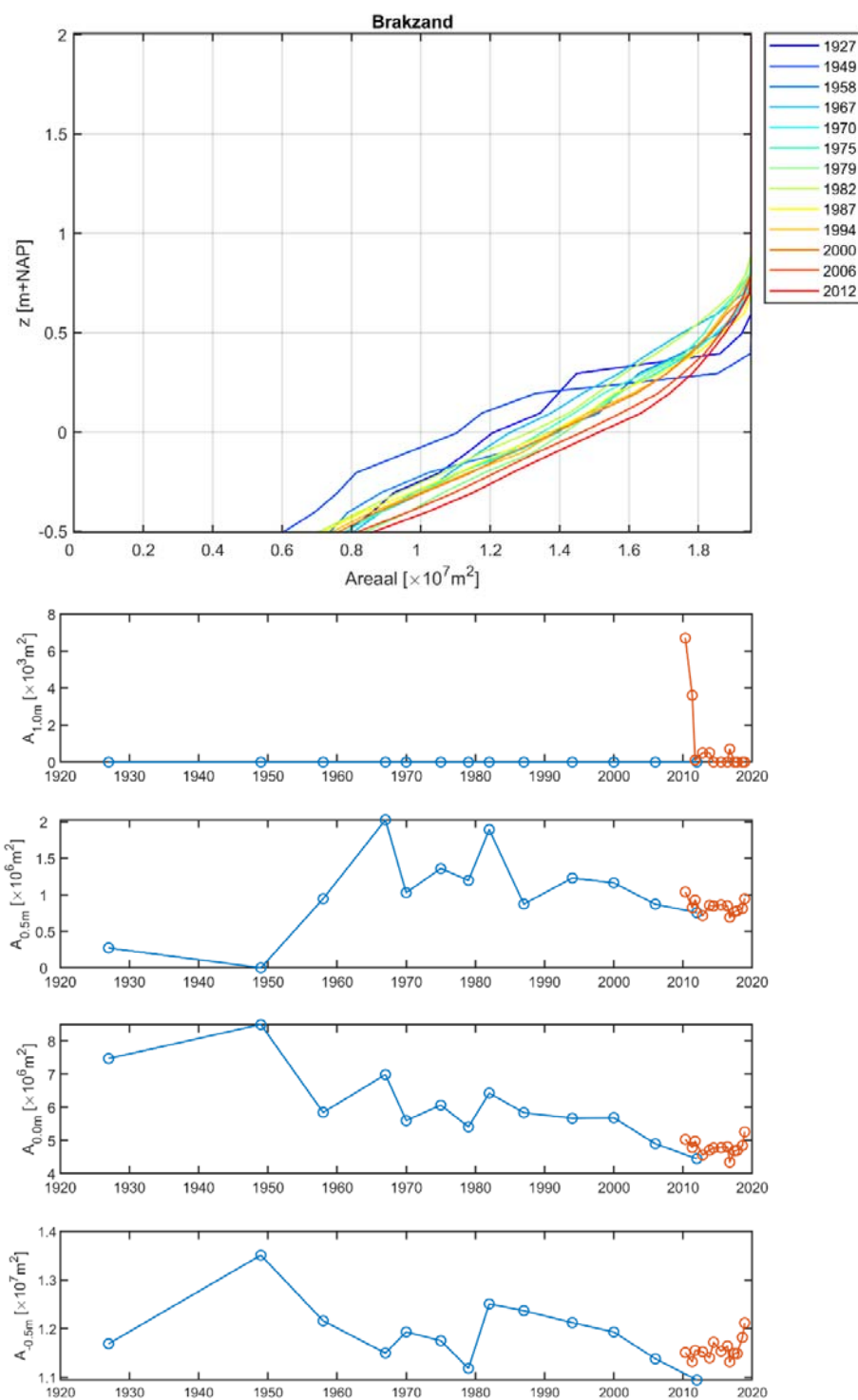
Figuur 6.5 Hypsometrie van vaklodgingen binnen het gecropte polygoon van kombergingsgebied Pinkegat (boven) en bijbehorende tijdreeksen van areaal op 4 referentiehoogten, te weten NAP+1m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP-0.5m (onder, blauw). De NAM-tijdreeksen zijn toegevoegd aan de tijdreeksen in rood.



Figuur 6.6 Hypsometrie van vaklodgingen binnen het gecropte polygoon van kombergingsgebied Pinkegat, uitgebreid met de polygoon van Engelsmanplaat (boven) en bijbehorende tijdreeksen van areaal op 4 referentiehoogten, te weten NAP+1m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP-0.5m (onder, blauw). De NAM-tijdreeksen zijn toegevoegd aan de tijdreeksen in rood.



Figuur 6.7 Hypsometrie van vaklodingen binnen het gecropte polygoon van kombergingsgebied Zoutkamperlaag (boven) en bijbehorende tijdreeksen van areaal op 4 referentiehoogten, te weten NAP+1m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP-0.5m (onder, blauw). De NAM-tijdreeksen zijn toegevoegd aan de tijdreeksen in rood.

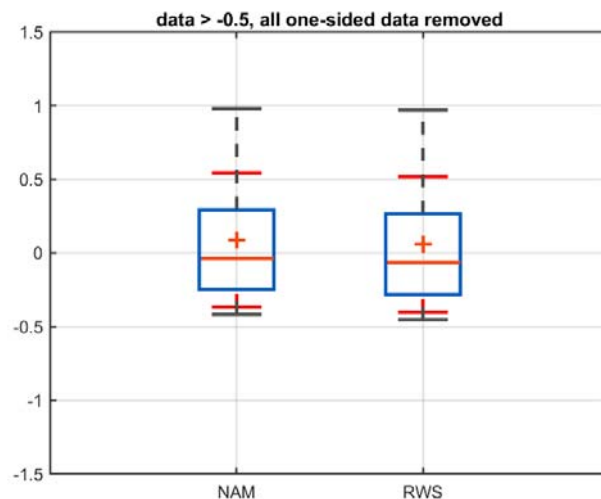


Figuur 6.8 Hypsometrie van vaklodgingen binnen het deelgebied Brakzand binnen kombergingsgebied Zoutkamperlaag (boven) en bijbehorende tijdreeksen van areaal op 4 referentiehoogten, te weten NAP+1m, NAP+0.5m, NAP+0.0m en NAP-0.5m (onder, blauw). De NAM-tijdreeksen zijn toegevoegd aan de tijdreeksen in rood.

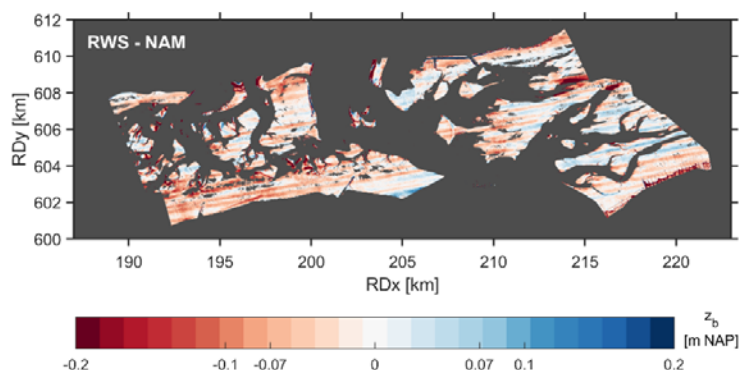
6.5 Aansluiting vaklodingen dataset aan LiDAR meetreeks

In 2012 is er zowel een LiDAR opname in de NAM meetreeks aanwezig alsook een vakloding. Met name op het lager gelegen areaal blijkt dat het gemeten areaal in de LiDAR dataset wat hoger ligt dan in de vaklodingen. De vergelijking van de statistieken van deze twee datasets is geplot in Figuur 6.9. Om deze vergelijking te kunnen maken is in beide datasets alle data boven NAP-0.5m verwijderd, en alleen pixels waarin beide datasets dan data overhouden zijn met elkaar vergeleken.

Het blijkt dat de mediaan en het gemiddelde minder dan 1 cm van elkaar verschillen tussen deze datasets. Wanneer echter het percentage cellen met een hoogte gelegen tussen NAP-0.5m en NAP+0m wordt vergeleken, dan wordt er in de NAM opname 6 procent meer areaal gerapporteerd dan de vaklodingen. Het areaal dat wordt gerapporteerd tussen NAP+0m en NAP+0.5m verschilt weer minder dan 1%. De NAM opname bevat dus een bias naar hoogtemetingen rond NAP-0.5m ten opzichte van de vaklodingen. Het is niet direct duidelijk welk van de datasets hier meer vertrouwd moet worden. De vaklodingen dataset bestaat namelijk uit zowel multibeam data en lidar data. Op de plekken waar LiDAR data beschikbaar is, rapporteert RWS lidar data, en de overige vlakken worden ingevuld met multibeam. Op het grensvlak van de twee datasets wordt een mate van *smoothing* toegepast om de twee datasets aan elkaar te laten aansluiten. Daarnaast is bekend dat de NAM lidarmetingen gecontamineerd zijn met wateroppervlakmetingen. Dichter bij het afkapvlak van NAP-0.5m vindt dit vaker plaats dan hoger in de verticaal. Dit wateroppervlak kan ook een deel van de bias in de NAM-dataset verklaren.

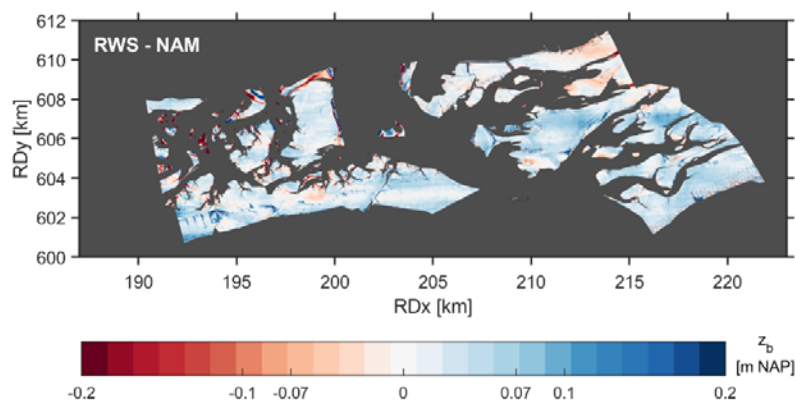


Figuur 6.9 Vergelijking van de statistieken van de 2012 LiDAR meting in opdracht van de NAM (links) en de vaklodingen dataset in opdracht van Rijkswaterstaat (rechts). De mediaan is weergegeven met de vaste rode streep, het gemiddelde met het plusje. De Blauwe box omhult de 50% band van de data; de rode balken geven de 2sigma range aan en de blauwe balken de 90% range.



Figuur 6.10 Verschilplot van de vakloding (RWS) met de LiDAR opname (NAM).

In 2018 zijn door RWS óók LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat gemaakt, verspreid over de maanden februari-maart. Deze zullen door RWS in een later stadium worden samengevoegd met multi-beam data om een nieuwe vakloding samen te stellen. Deze is in voorjaar 2019 echter nog niet beschikbaar. Wanneer de LiDAR opnamen worden vergeleken met de zomer 2018 opname uit de meetreeks (zie Figuur 6.11) laten grote vlakken van het gebied een hoogteverschil van rond de 5cm zien, waarbij de RWS opnamen hoger ligt dan de NAM opname. Omdat de RWS opnamen begin van het voorjaar zijn gevlogen terwijl de NAM opname in de zomer is gevlogen, zou men op basis van seizoensfluctuaties kunnen verwachten dat de RWS opname lager ligt door het voorafgaande stormseizoen (herfst-winter). De hypothese daarbij is dat in het voorjaar, wanneer de meteorologische condities rustiger zijn, het plaatareaal zich weer opbouwt. De geconstateerde verschillen spreken deze hypothese tegen. Een verklaring voor de geconstateerde verschillen zijn eerder te zoeken in de toegepaste processing van de LAS datapunten en het eventuele optillen van de meetreeks aan de hand van ground-control-grids. Verschillen in de processing zijn niet te achterhalen omdat deze bij RWS ook niet bekend zijn. De geconstateerde verschillen zijn dus een indicatie van de onnauwkeurigheid van een LiDAR opname.



Figuur 6.11 Verschilplot van de RWS LiDAR opnamen 2018 (RWS) met de NAM zomer 2018 LiDAR opname (NAM).

6.6 Samenvatting

In dit hoofdstuk is de NAM-tijdreeks geplaatst in de lange-termijn trends die uit de vaklodingendata kunnen worden geconstateerd. Dit levert de volgende conclusies op:

- Doordat de vaklodingendataset is samengesteld uit multibeam data en lidardata geldt dat deze datareeks een grotere inherente onzekerheid heeft dan de lidardatareeks van de NAM. Daarnaast zijn de oude metingen (tot 1970) gereconstrueerd uit analoge bodemkaarten. Deze kanttekening is nodig voor de correcte interpretatie van de data.
- Als alleen vaklodingen sinds 1994 in acht worden genomen, is er binnen elk deelpolygoon een afname van areaal te constateren. De onzekerheid van deze trend wordt aangetoond door de grilligheid van het lidarsignaal uit de NAM dataset.
- De arealen binnen het Pinkegat staan onder invloed van verplaatsing van morfologische eenheden binnen en buiten de controlepolygoon: De wantijlijn die de Pinkegatpolygoon definieert is naar het oosten opgeschoven sinds 1927, wat tot een toename van areaal leidt. De lagergelegen delen van de Engelsmanplaat lagen voor 1987 deels binnen de Pinkegat polygoon. Dit verklaart de sprong in hypsometrische curve rond 1987 wanneer Het Pinkegat zonder de Engelsmanplaat wordt beschouwd.
- De hypsometrische curve van het Pinkegat laat zien dat de plaathellingen tot 1994 verflauwden. Na 1994 is dit proces niet meer terug te zien.
- Het kombergingsgebied Zoutkamperlaag is het best te interpreteren door analyse van deelgebied Brakzand: De vaklodingen suggereren een afname in areaal, wat te verklaren is uit zandhonger in de geulen na afsluiting Lauwerszee. Het lidarsignaal sluit voor hoger gelegen areaal goed aan op de vaklodingen dataset, maar laat recent juist een toename van areaal zien.
- Vergelijking van areaal in 2012 toont aan dat NAM-areaal een positieve bias heeft op - NAP-0.5m ten opzichte van de vaklodingen. Deze bias valt weg voor hoger gelegen plaatareaal (NAP+0m of hoger). 2018 LiDAR opnamen van RWS tonen aan dat met een verschillende LiDAR-contractor het hoogtebeeld systematisch af kan wijken.

7 Evaluatie LiDAR als monitoringsmethode Friesche Zeegat

LiDAR metingen als monitoringsmethode voor plaathoogteveranderingen hebben als voordeel dat er met zeer hoge resolutie worden gemeten (analyse vindt nu plaats op 10x10m roosters maar zou qua datadichtheid ook op 1x1m roosters kunnen plaatsvinden). Binnen een korte periode van enkele dagen kan het hele projectgebied worden ingemeten. Daarnaast is de frequentie van de huidige dataset hoog: in theorie kunnen invloeden van een enkel stormseizoen worden geanalyseerd omdat er altijd een voor- en na-meting beschikbaar is.

Bij het trekken van conclusies uit deze datareeks is de afgelopen jaren echter op meerdere beperkingen gestuit. Opwerken van laspunten naar 10x10m roosters middels één helder opgesteld protocol heeft een aantal van de bestaande onzekerheden weggehaald, maar meerdere beperkingen blijven nog altijd bestaan:

- Ondanks kalibratie van elke opname aan *ground-control-grids* blijken er systematische verschillen in gemiddeld gemeten hoogte op hard oppervlak te bestaan, en deze bleken zelfs tot 4cm groot tussen opeenvolgende jaren te zijn. Mogelijk is dit het gevolg van de verschillende wisselingen in meetdienst in de afgelopen 10 jaar. Dit leidt onvermijdelijk tot verschillen in preprocessing van de las-data, welke niet meer te achterhalen zijn.
- Gemiddelde diepebodemdaling over het gehele Friesche Zeegat is in de periode 2010-2019 6mm geweest. Dit is over de gehele periode een verandering die een orde kleiner is dan systematische verschillen die nu nog worden geconstateerd (zie vorig punt). De ruimtelijke systematische verschillen tussen opeenvolgende datasets, terwijl er al op elke opname al een *ground-control-grid* controle heeft plaatsgevonden, maken duidelijk dat fluctuaties door meetonzekerheid, fluctuaties door morfologie en eventuele effecten van bodemdaling onvoldoende uit elkaar te halen zijn. Waar de geconstateerde tilt en shift van een heel kaartblad kan worden gerelateerd aan metingen op hard oppervlak, zijn er daarnaast in vrijwel alle opnamen vliegbanen te herkennen, welke pas verdwijnen als de kleurenschaal van verschilkaarten een significantiegrens meekrijgen van ongeveer 7cm.
- LiDAR data kan alleen wat zeggen over oppervlakte van droogvallende wadplaten. Het Pinkegat is een zeer dynamisch kombergingsgebied waarin geulmigratie voor veel plaat-geulinteractie zorgt. LiDAR opnamen kunnen geen informatie bieden over geuldiepten en erosie/sedimentatie binnen de geulen. Mogelijkerwijs wordt sediment aangevoerd vanuit de buitendelta, maar ligt dit sediment in eerste instantie in de geulen voordat het door afzetting op de plaatranden hoger in de verticaal verschijnt en daarmee meetbaar wordt.
- Achterblijvend water op het wad is vanuit de lucht moeilijk te differentiëren van plaatoppervlak en heeft in grote mate invloed op de berekende plaatarealen. Pogingen om die differentiatie te maken door middel van classificatie worden ondernomen. De validatie van deze classificatie aan *ground-truth* is echter nog niet onderzocht.

Deze kanttekeningen bij de LiDAR dataset zetten vraagtekens bij de zekerheid waarmee een trend binnen de dataset daadwerkelijk vastgesteld kan worden. Wanneer we naar de equivalente plaathoogte van het gehele projectgebied kijken bijvoorbeeld, lijkt de plaathoogte in 2018 precies weer op de hoogte van 2010 te zijn teruggekomen. Als voor 3 meetpunten blijkt dat het verticale referentievlak toch 4 cm moet worden bijgesteld, dan wordt de conclusie heel anders. Binnen de onzekerheid van de LiDARopnamen (die binnen deze analyse toch weer rond de 5cm systematische fout blijkt te liggen) moeten trends dus groot

zijn om ze met zekerheid te kunnen vaststellen, of er moeten veel meetpunten beschikbaar zijn om de trend op te baseren.

8 Conclusies en aanbevelingen

8.1 Conclusies

- *Welke morfologische veranderingen zijn te detecteren in de opnames in de zomer en najaar van 2018 en hoe verhouden deze veranderingen zich tot de rest van de meetreeks, gerapporteerd in Schrijvershof et al. (2018)?*

De 2 nieuwe meetpunten van 2018 verbreken de geconstateerde dalende trend in plaatareaal binnen beide kombergingsgebieden: er is een toename van gemeten wadareaal ten opzichte van 2017.

- *Zijn er factoren die de grilligheid van het gemeten signaal binnen de LiDAR dataset kunnen verklaren?*

Het gemeten sedimentvolume correleert het sterkst met systematische verschillen die geconstateerd zijn door de NAM in de gemeten gemiddelde hoogte van harde oppervlakten. Deze verschillen zijn niet verklaarbaar door bodemdaling en hebben een significantie correlatie met de gemeten volumeveranderingen. Deze bestaan uit een verticale shift van het gehele projectgebied en tilt tussen gebieden Noord en Oost en gebieden Zuid en West. De geconstateerde meetafwijkingen zijn belangrijk omdat ze van dezelfde orde grootte zijn dan de eerder geconstateerde trend, maar verklaren op zichzelf niet de gehele geconstateerde trend of de intra-jaar fluctuaties.

Daarnaast correleren de gemiddelde laagwaterstand en de gemiddelde ebduur tijdens een meetcampagne met het gemeten plaatareaal. Een terugvoorspelling van het plaatareaal op NAP+0m laat zien dat de gemiddelde laagwaterstanden in de 2018 opnamen de toename in plaatareaal ten opzichte van 2017 deels kan verklaren.

- *Hoe verhouden opnamen in opdracht van de NAM zich tot de opnamen gemaakt door RWS in de jaren waar RWS-data beschikbaar is; namelijk 2012 en 2018?*

De NAM datareeks heeft een positieve bias ten opzichte van de vaklodings dataset voor plaatareaal op NAP-0.5m. Dit heeft mogelijk te maken met de methode van samenvoegen van LiDAR en multi-beam metingen binnen de vaklodings dataset, of met de aanwezigheid van wateroppervlak in de opnamen van de NAM. Op hogere referentiehoogten verdwijnt deze bias, en sluiten de twee meetseries goed op elkaar aan, gegeven de meetonzekerheid geassocieerd met individuele meetpunten. De 2018 LiDAR opnamen van RWS vertonen een systematisch hoogteverschil.

- *Hoe verhouden trends gedetecteerd aan de hand van de NAM-dataset zich tot de lange-termijn trend vanuit de vaklodings dataset?*

De vaklodings tonen vanaf 1994 in beide kombergingsgebieden een lichte afname van plaatareaal op NAP-0.5m. De NAM dataset sluit goed aan op deze trend en toont afname over de periode 2010-2018. De afname sinds 1994 is een orde kleiner dan de areaaltoename in de periode daarvoor (1927-1994). Areaalveranderingen zijn te verwachten omdat beide kombergingsgebieden zeer dynamisch zijn. Het plaat-geul systeem van de Zoutkamperlaag reageert op de afsluiting van de Lauwerszee. Binnen het kombergingsgebied van het Pinkegat brengt de pseudo-cycliciteit van geulmigratie van de hoofdgeul en verdere vertakkingen areaalveranderingen in het gehele kombergingsgebied teweeg.

- *Hoe werkt de meegeleverde land-water-vegetatie classificatie van de las-data door in de resultaten?*

Deze onderzoeksvraag is enkel binnen de appendix behandeld. De conclusie wordt hier samengevat. Wanneer de classificatie op laspuntniveau wordt toegepast, leidt dit tot veel misclassificatie geulen als land. Daarnaast heeft differentiatie tussen land en vegetatie tot gevolg dat de hoger gelegen laspunten niet als land worden geïdentificeerd. Hierdoor wordt de hoogtekaart artificieel twee centimeter omlaag getrokken, en is er geen data beschikbaar op platen hoger dan NAP+1m. De classificatie kan wel meerwaarde hebben binnen de analyse als de classificatie wordt vergridt tot een mediane classificatiekaart. Onder de aanname dat de classificatie van waterpunten juist is, kan een kwantificatie van de roosterzellen met water boven NAP-0.5m bijdragen aan de onzekerheid die wordt toegekend aan de betreffende opname.

8.2 Aanbevelingen

Binnen deze analyse is wederom gebleken dat meetonzekerheden in de NAM tijdreeks groter blijken dan het signaal dat wordt gemeten. Deze meetonzekerheden moeten worden aangepakt. Daarom wordt een aantal onderzoeksvragen gesteld voor voortzetting van de analyse van de LiDAR meetreeks van het Friesche Zeegat:

- Waarom zijn er systematische verschillen tussen gemiddelde hoogte van hard oppervlak van opeenvolgende metingen in de dataset aanwezig als deze reeds is gecorrigeerd op acht over het gebied verspreide *ground-control-grids*?
- Zijn er naast noord-zuid en oost-west tilt nog andere rotatievlakken te identificeren in de opnamen, en hoe variëren deze rotatievlakken door de tijd heen?
- Hoe kun je de LiDAR opnamen het best corrigeren op dergelijke rotatievlakken?
- Corrigeren voor de geconstateerde cumulatieve shift tussen opeenvolgende metingen is mogelijk door het hele signaal een stukje op te tillen of te laten zakken. Maar hoe laat je het bodemdalingssignaal weg uit deze correctie?
- Classificatie van de opnamen in land/water kan bijdragen aan de interpretatie van de opnamen, maar vooral wanneer deze classificatie voor alle metingen binnen de analyse beschikbaar is. Anders is een consequente kwantificatie van het aandeel gemeten wateroppervlakte niet mogelijk. Hiervoor kunnen ook andere classificatietechnieken, zoals een segmentatie algoritme op basis van hoogte en intensiteit, worden onderzocht naast de *machine-learning* aanpak die nu door de NAM is voorgesteld.

9 Referenties

- Aerodata. (2016). *QUALITY REPORT WADDENZEE*.
- Aerodata. (2017a). *QUALITY REPORT WADDENZEE*.
- Aerodata. (2017b). *QUALITY REPORT WADDENZEE*.
- Arentz, L., & Vroom, J. (2014). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2013). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1209136-000*.
- Cronin, K., & Wang, Z. B. (2012). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1204654-000*.
- Donker, J. (2015). *Hydrodynamic processes and the stability of intertidal mussel beds in the Dutch Wadden Sea*. Department Physical Geography Faculty of Geosciences. Retrieved from <http://dspace.library.uu.nl/handle/1874/312601>
- Elias, E., Bruens, A. (2013). *Beheerbibliotheek Ameland. Feiten & cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004*.
- Elias, E., Wang, Z. B., & Cronin, K. (2013). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2012). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1206958-000*.
- Elias, E.P.L. et al. (2012). *Netherlands Journal of Geosciences (91-3), p. 293-310, Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century*.
- Eurosense. (2016a). *Report Lidar Survey. Waddenzee Autumn survey 2015*.
- Eurosense. (2016b). *Report Lidar Survey Waddenzee Spring survey 2016*.
- Fugro Geospatial B.V. (2010). *FUGRO AERIAL MAPPING Survey 2010. Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog*.
- Fugro Geospatial B.V. (2011a). *FLI-MAP survey for Nederlandse Aardolie Maatschappij. Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog Autumn 2011*.
- Fugro Geospatial B.V. (2011b). *FUGRO AERIAL MAPPING Survey 2011. Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog*.
- Fugro Geospatial B.V. (2012). *FLI-MAP survey for Nederlandse Aardolie Maatschappij. Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog Autumn 2012*.
- Fugro Geospatial B.V. (2013). *Waddenzee LiDAR Survey, Final report, version 1*.
- Fugro Geospatial B.V. (2014a). *Waddenzee LiDAR Survey May 2014, Final report, version 1*.
- Fugro Geospatial B.V. (2014b). *Waddenzee LiDAR Survey September 2014, Final report, version 141121*.
- Fugro Geospatial B.V. (2015). *Waddenzee LiDAR Survey July 2015, (July)*.
- Oost, A. P., van Buren, R., & Kieftenburg, A. (2017). *Overview of the hydromorphology of ebb-tidal deltas of the trilateral Wadden Sea*. Retrieved from www.waddensea-secretariat.org/sites/default/.../wsb_22-5-4-2_ebb-tidal-delta-report.pdf
- Schrijvershof, R.A., Van den Boogaard, H., Visser, M. (2018). *Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2018) – Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 11202013-000*.
- Schrijvershof, R. (2017). *Memo n.a.v. aandachtspunten rapport Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2016)*.
- Schrijvershof, R. A., Nederhoff, C. M., Haag, A., & Piening, H. (2017). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2016). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 11200469-000*.
- Schrijvershof, R. A., & Vroom, J. (2016). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2015). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1221249-000*.
- Terratec (2018a). *Project report Waddenzee – 1st acquisition for 2018*.
- Terratec (2018b). *Project report Waddenzee – 2nd acquisition for 2018*.
- Vroom, J., & Beekhuizen, J. (2015). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2014). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1210543-000*.

Wang, Z.B. et al. (2018). *Netherlands Journal of Geosciences* (97-3), p. 183-214, *Sediment budget and morphological development of the Dutch Wadden Sea: impact of accelerated sea-level rise and subsidence until 2100.*

Wang, Z.B., 2007, *Morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat, Analyse naar de mogelijke invloed van bodemdaling, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z3973.*

Wang, Z. B., Cronin, K., & Ormondt, M. (2010). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1202285-000.*

A Overzicht vluchtgegevens

LiDAR referentie	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
				Start	Eind			
2010 (voorjaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2010)</i>	FLI-MAP 1000	25-03-2010 26-03-2010 28-03-2010	09:00 10:33 13:02	11:03 (*) 12:26 (*) 14:36 (*)	Noord Zuid Midden	Helder weer Bewolking en neerslag Wisselend bewolkt	Tijdsinformatie van bijgevoegde <i>FlightLineRelation.xlsx</i> Vlieghoogte 500 m AGL
2011 (voorjaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2011)</i>	FLI-MAP 1000	14-04-2011 15-04-2011 16-04-2011	10:00 10:50 11:50	12:20 13:20 13:00	Noord Midden Zuid	Bewolkt Heldere hemel Nevel	Tijdsinformatie uit H6.5 (benaderd) Vlieghoogte 500 m AGL
2011 (najaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2011a)</i>	FLI-MAP 1000	24-9-2011 25-9-2011 26-9-2011 27-9-2011	13:20 14:00 15:00 16:20	15:00 16:20 16:50 17:00	Noord Zuid Midden Midden (extra)	Heldere hemel Heldere hemel Bewolkt Bewolkt	Tijdsinformatie uit: <i>11871-002 tidal data.xls</i> Vlieghoogte 500 m AGL
2012 (najaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2012)</i>	FLI-MAP 1000	15-10-2012 16-10-2012 26-10-2012	15:15 16:30 13:10	18:15 17:45 16:10	Noord, zuid (2) Midden (1), zuid (1) Zuid	Lichte bewolking Bewolkt, survey gestopt Bewolkt	Periode van 10 dagen tussen opnamen Vlieghoogte 500 m AGL
2013 (najaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2013)</i>	Riegl Q680i	18-10-2013 19-10-2013 20-10-2013	14:50 15:40 17:00	18:20 18:30 18:10	Noord Midden Zuid	Heldere hemel Heldere hemel Heldere hemel	Vlieghoogte 440 m AGL

2014 (voorjaar)	Fugro <i>Fugro</i> <i>Geospatial B.V.</i> (2014a)	Riegl Q680i	13-05-2014 14-05-2014 15-05-2014	15:20 15:20 15:50	16:50 18:10 17:30	Noord Midden Zuid	Licht bewolkt Licht bewolkt Heldere hemel	Cross-lines gedeeltelijk gevlogen buiten getijvenster Vlieghoogte 440 m AGL
2014 (najaar)	Fugro <i>Fugro</i> <i>Geospatial B.V.</i> (2014b)	Riegl Q680i	21-09-2014 22-09-2014 23-09-2014	14:16 15:39 15:38	16:04 17:17 17:37	6-19 20-28 29-38	Lage bewolking, regen Licht bewolkt Heldere hemel	Vlieglijnen 6-14 (Ternaard) gevlogen buiten getijvenster Vlieghoogte 440 m AGL
2015 (zomer)	Fugro (Eurosense) Fugro <i>Geospatial B.V.</i> (2015)	Riegl Q680i	30-06-2015 1-7-2015	14:08 15:10	17:45 18:24	6-20; 34-38 18; 21-33	Heldere hemel Heldere hemel	Vlieghoogte 460 m AGL
2015 (najaar)	Eurosense <i>Eurosense</i> (2016a)	Riegl Q680i	26-10-2015 8-11-2015 23-11-2015	14:03 12:22 15:03	16:55 (start*) 13:34 (start*) 16:38 (start*)	Noord, Zuid Midden; noord Midden; zuid <i>Figure 5</i>	Heldere hemel maar later mist Gestopt door bewolking	Vlieglijnen 20 t/m 23 buiten getijvenster Tot 15 dagen tussen meetdagen Vlieghoogte 460 m AGL
2016 (voorjaar)	Eurosense <i>Eurosense</i> (2016b)	Riegl Q680i	5-5-2016 6-5-2016	12:45 (**) 14:30 (**)	18:45 (**) 20:12 (**)	6-12; 26-39 27-9 <i>Figure 2</i>	Heldere hemel Heldere hemel	Vlieghoogte 460 m AGL
2016 (najaar)	Aerodata <i>Aerodata</i> (2016)	Riegl LMS-780	14-9-2016 15-9-2016 16-9-2016	14:05 16:19 15:55	16:57 17:24 18:39	8-14;20-23;33 15-17;33 15-19;24-32	Lichte nevel Lichte nevel Lichte nevel	Vlieghoogte 460 m AGL
2017 (voorjaar)	Aerodata	Riegl	27-5-2017	16:27	20:02	1-21;33	Onbekend	

	Aerodata (2017)	LMS-780	28-5-2017	17:39	19:58	1; 22-32		Vlieghoogte 460 m AGL
2017 (najaar)	Aerodata Aerodata (2017)	Riegl LMS-780	15-10-2017 17-10-2017 18-10-2017	11:52 14:06 15:16	14:15 16:35 16:39	1-16 22-33 17-21	Onbekend	Vlieghoogte 460 m AGL
2018 (zomer)	Terratec AS	Riegl, VQ-1560i	21-07-2018 22-07-2018 23-07-2018 24-07-2018	07:40 08:50 10:00 12:00	10:50 12:10 13:30 15:30	1-10,31,29,30 11,15,18-22 14,16,23-28,33 12,13,17	Bevredigend	Vlieghoogte 500m AGL, Vluchtlijn 11 buiten getijvenster
2018 (najaar)	Terratec AS	Riegl, VQ-1560i	14-11-2018 17-11-2018	17:05 09:00	09:00 11:25	1-18 19-23	Bevredigend. 3 dagen interval door mist.	Vlieghoogte 1250m AGL, alle controle lijnen op andere dag gevlogen dan gebieds-lijnen

*Geregistreerde eindtijd is de starttijd van de vlieglijn. Duur van een vlieglijn is gemiddeld ongeveer 20 minuten

**Geregistreerde tijd is de tijd van opstijgen en landen. Tijdsinterval waarin de data is ingewonnen is niet op te maken aan de hand van de rapportage.

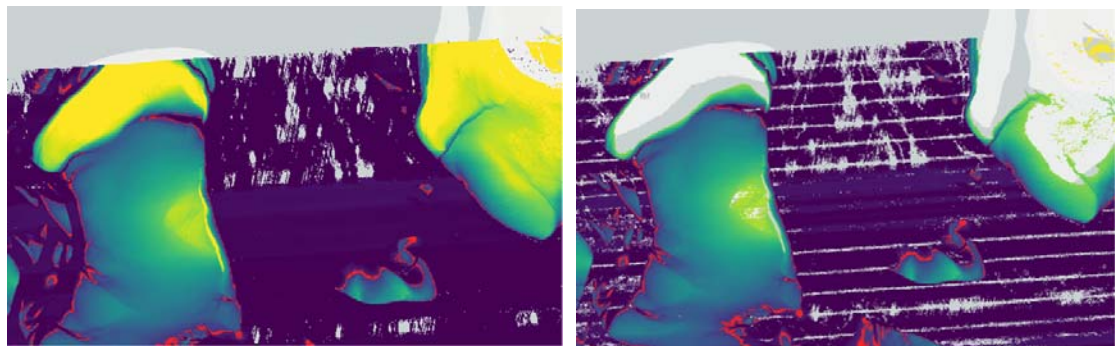
B Analyse invloed land/water classificatie op analyse LiDAR meetreeks

De laspunten uit de opnamen uit de zomer en het najaar 2018 hebben een attribuut met een classificatie land/vegetatie/water meegekregen. Deze classificatie kan helpen om achterblijvend water op het wat te identificeren en om een beter beeld te krijgen hoe vaak dit nu daadwerkelijk gebeurt.

B.1 Differentiatie op laspuntniveau

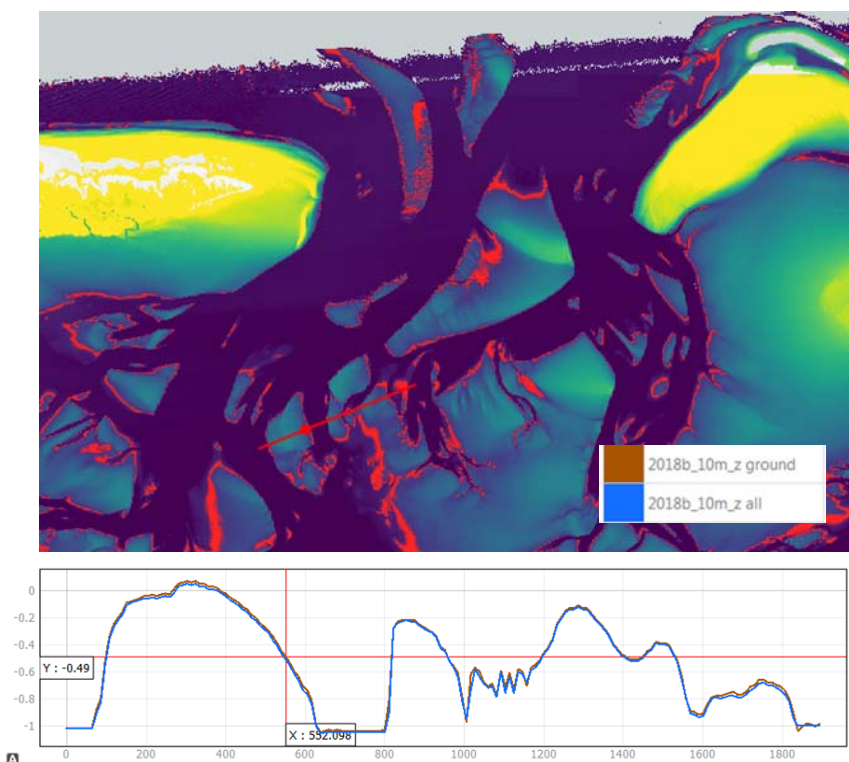
Om te onderzoeken hoe de classificatie kan bijdragen aan het analyseprotocol is in eerste instantie een extra criterium toegevoegd aan het dataopwerkingsprotocol. Alle las-punten met een classificatie anders dan land zijn weg gefilterd uit de dataset. Een snapshot van de hoogtekaart voor de zomer 2018 opname is geplot in Figuur B.1. Als enkel de laspunten met de classificatie land worden meegenomen, valt op dat roosterzellen in de geulen meestal nog steeds een hoogtewaarde rapporteren. Met andere woorden, in die cellen is minstens één laspunt geclassificeerd als land. Om een succesvolle differentiatie land/water te maken, moet er dus in ieder geval een strengere eis aan het aantal laspunten binnen een rooster cel worden gehanteerd.

Daarnaast valt op dat de hoger gelegen gebieden van Het Rif, van Schiermonnikoog en van de richel op de Engelsmanplaat NO-DATA rapporteren. Voor roosterzellen in deze gebieden is dus geen één laspunt met de landclassificatie aanwezig. De classificatie blijkt voor al deze cellen vegetatie te zijn. Deze platen zijn enorm zandig, het lijkt er dus op dat de classificatie vegetatie te zwaar differentieert naar z-hoogte van het laspunt.



Figuur B.1 Een snapshot van de Engelsmanplaat in een hoogtekaart van zomer2018 waarin laspunten met alle classificaties zijn meegenomen (links). Eenzelfde snapshot van de Engelsmanplaat van zomer2018, waarin enkel laspunten met de classificatie land zijn meegenomen.

Op een lagergelegen plaatgebied binnen het Pinkegat is de gelijkvormigheid van de platen tussen een hoogtekaart op basis van classificatie en zonder classificatie vergeleken. De plaatdoorsneden zijn zeer gelijkvormig. Zie voor een voorbeeld Figuur B.2. Op basis van zulke hoogteprofielen blijkt dat de roosterzellen gebaseerd op de geclassificeerde laspunten gemiddeld een centimeter of twee lager liggen. Dit is waarschijnlijk een gevolg van het feit dat laspunten met een vegetatieclassificatie gemiddeld iets hoger liggen dan die met een landclassificatie. Het is dus heel belangrijk om de classificatie voor alle opnamen in de meetreeks beschikbaar te hebben, omdat de resultaten met ordegrootte centimeters worden beïnvloed.



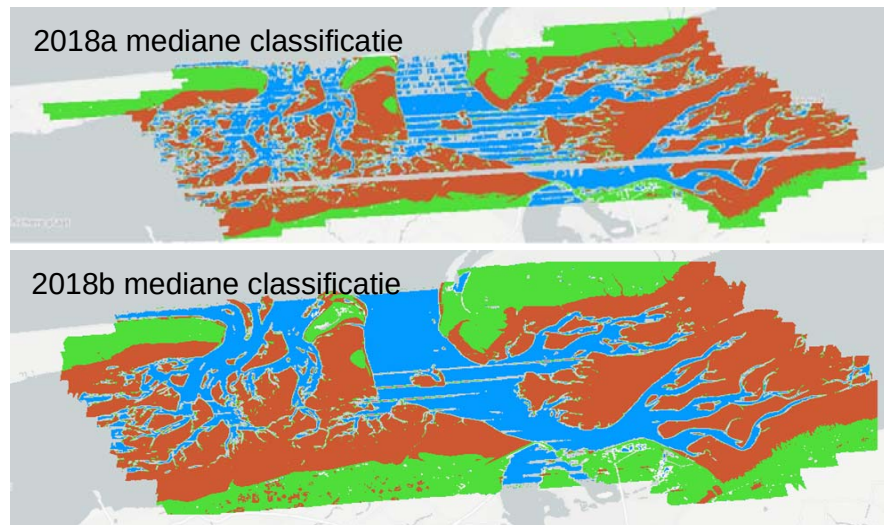
Figuur B.2 Voorbeeld van een doorsnede door lagergelegen platen in het Pinkegat met. Boven: locatie van de doorsnede. Onder: hoogteprofiel van de hoogtekkaart met classificatie (bruin) en zonder classificatie (blauw)

B.2 Differentiatie op roostercelniveau

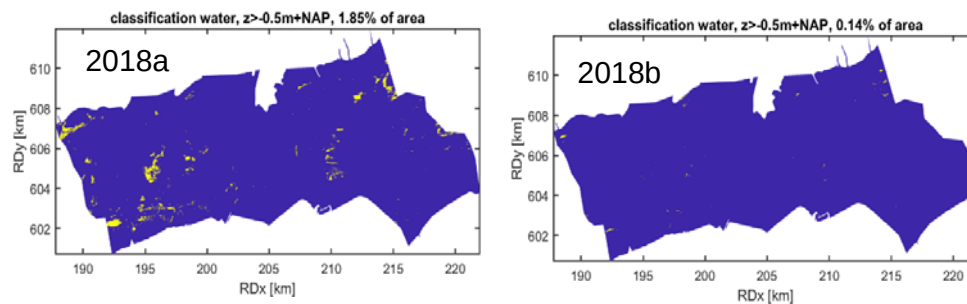
Omdat de classificatie niet differentieel genoeg is om water van land te onderscheiden in de geulen op laspuntniveau, is een tweede aanpak geprobeerd. Hiervoor zijn de laspunten volgens de standaard methode opgewerkt tot een hoogtekkaart (de mediaan van alle laspunten binnen een roostercel die lager dan NAP+2m liggen, is bepaald). Hierna is een classificatiemaskeerkaart berekend op basis van de mediane classificatie van elke roostercel. Deze maskeerkaart is geplot in Figuur B.3.

De maskeerkaarten kunnen inzicht verschaffen in het percentage roostercellen waar meer dan de helft van de laspunten water hebben gemeten en waar deze roostercellen zich in het gebied bevinden. Zo kan voor cellen boven de afkapgrens van NAP-0.5m inzichtelijk gemaakt worden of een meting in een roostercel afgekeurd zou moeten worden omdat er in meer dan de helft van de laspunten wateroppervlak wordt gemeten. Dit is visueel inzichtelijk gemaakt in Figuur B.4. Volgens de classificatie in de zomer2018 meting was dit voor 1.85% van de roostercellen het geval. In de najaar2018 meting was dit in veel mindere mate, slechts 0.15% van de roostercellen, aan de hand.

Wanneer de classificatie voor alle opnamen beschikbaar zou zijn, kan de classificatie dus helpen om de mate van invloed van wateroppervlakmetingen op de opname te kwantificeren.



Figuur B.3 Classificatiemaskeerkaarten voor zomer 2018 (boven) en najaar 2018 (onder). Blauw geeft een mediane classificatie voor water aan, rood een mediane classificatie van grond en groen een mediane classificatie vegetatie.



Figuur B.4 Indicatorkaarten waar de mediane classificatie van de rooster cel water is én de gerapporteerde hoogte boven de afkappgrens vallen: $z > NAP - 0.5$.

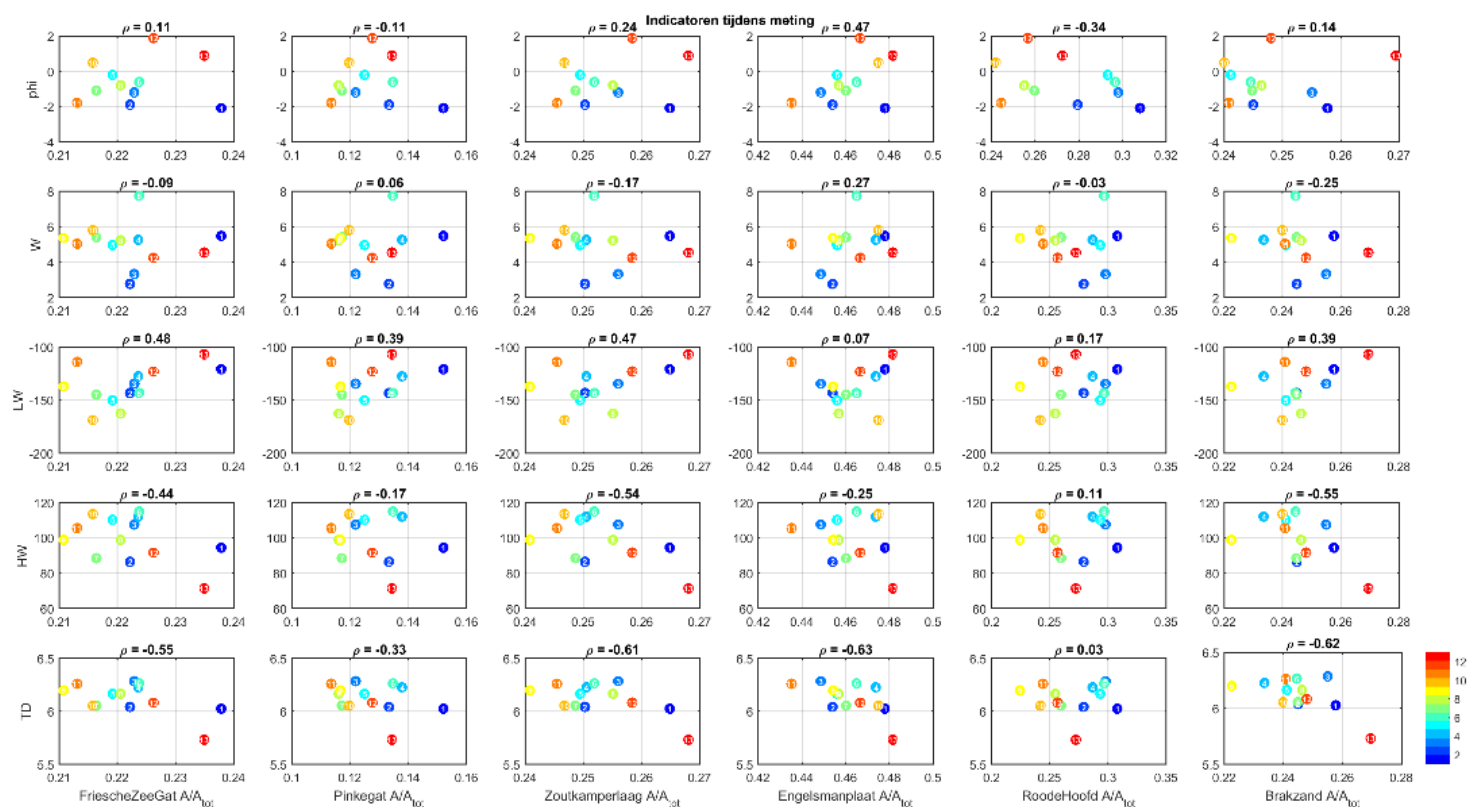
B.3 Conclusies

De classificatie land wordt nog voor te veel laspunten op open water in de geulen toegekend, waardoor differentiatie op classificatie op laspuntniveau niet werkt. Een striktere puntendichtheidseis (dus een rooster cel pas een waarde toekennen als er meer dan XX laspunten binnen de rooster cel vallen) zou kunnen helpen om de misclassificatie van rooster cellen te voorkomen. Dit zou, met name in de oudere opnamen, wel weer leiden tot meer missende data in de hoogtekaart. Omdat deze uiteindelijk weer moeten worden opgevuld met (lineaire) interpolatie, levert dit uiteindelijk geen betere hoogtekaart op. Deze classificatie is dus niet geschikt om op laspuntniveau watermetingen weg te filteren.

De volledige afwezigheid van landclassificaties boven een referentiehoogte van $NAP + 1.2m$ doet vermoeden dat de vegetatieclassificatie teveel afhangt van de z -waarde van het laspunt. Dit wekt de vraag op: wat is de trainingsdataset voor de vegetatieclassificatie?

De meerwaarde van de huidige classificatie zit hem in de bijdrage aan het kwantificeren van de kwaliteit van een individuele lidaropname door middel van het berekenen van de mediane classificatie binnen een rooster cel. Het percentage 'natte' rooster cellen boven $NAP - 0.5m$ zegt dan iets over de mate van positieve bias van de opname.

C Naslagwerk correlatieanalyse omgevingsfactoren



Figuur C.1 Overzichtsfiguur correlatieanalyse van relatief gemeten areaal (x-as) en indicatoren **tijdens** de meetcampagnes (y-as). Een rij per indicator, en een kolom per controlepolygon. Voor de definities van de controlepolygonen zie Hoofdstuk 0. De kleur van de markers geeft de plaats in de tijdreeks aan: blauw 2010 naar rood 2018b.



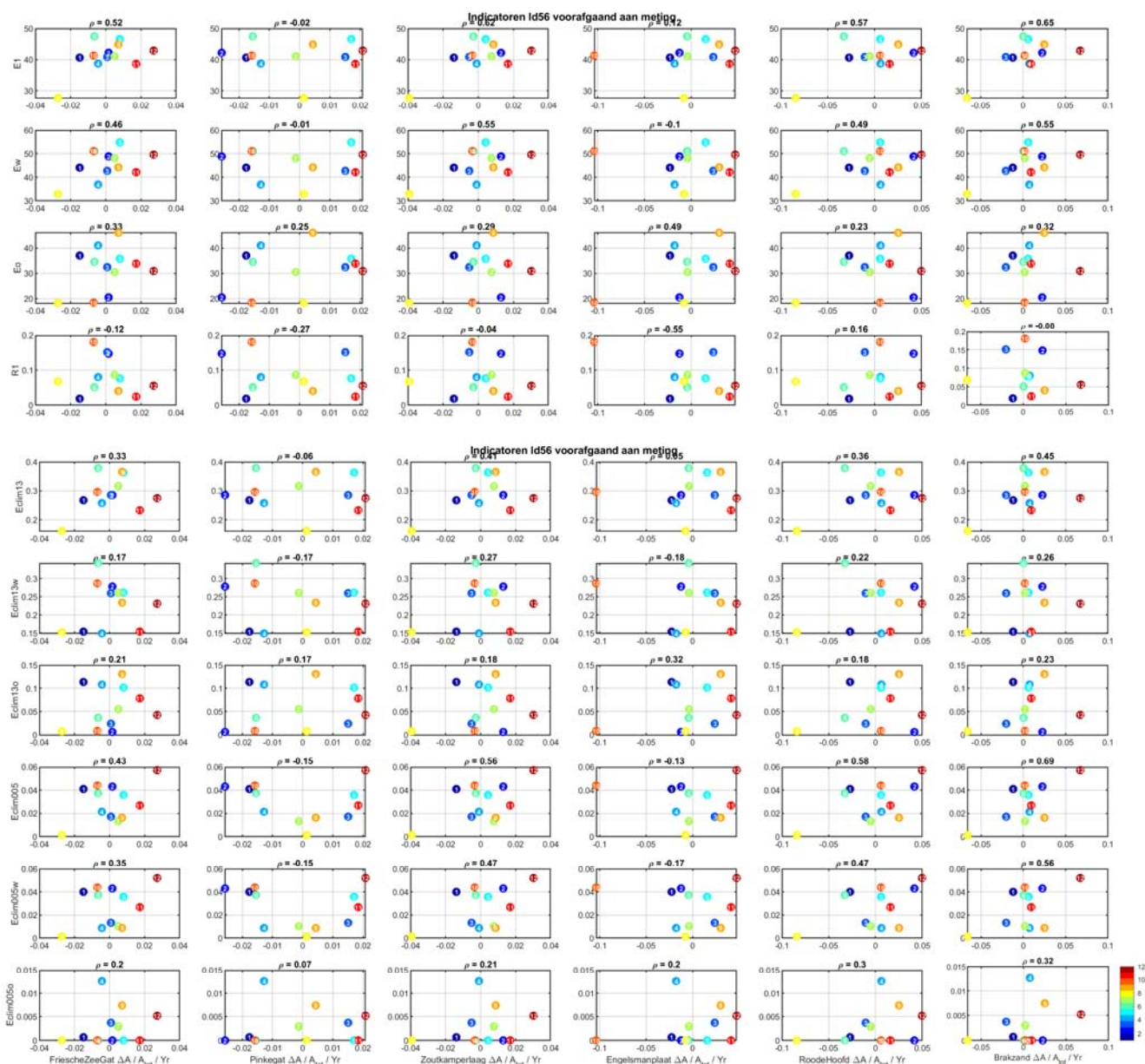
Figuur C.2 Overzichtsfiguur correlatieanalyse van relatief gemeten areaalverandering (ratio / jaar) (x-as) en indicatoren **tussen** twee meetcampagnes (y-as). De indicatoren tussen twee meetcampagnes zijn bepaald over de gehele periode tussen twee opnamen in. Een rij per indicator, en een kolom per controlepolygon. Voor de definities van de controlepolygonen zie Hoofdstuk 0. De kleur van de markers geeft de plaats in de tijdreeks aan: blauw 2010 naar rood 2018b.



Figuur C.3 Overzichtsfiguur correlatieanalyse van relatief gemeten areaalverandering (ratio / jaar) (x-as) en indicatoren **tussen** twee meetcampagnes (y-as). De indicatoren tussen twee meetcampagnes zijn bepaald over 14 dagen voorafgaand aan de tweede meting. Een rij per indicator, en een kolom per controlepolygon. Voor de definities van de controlepolygonen zie Hoofdstuk 0. De kleur van de markers geeft de plaats in de tijdreeks aan: blauw 2010 naar rood 2018b.



Figuur C.4 Overzichtsfiguur correlatieanalyse van relatief gemeten areaalverandering (ratio / jaar) (x-as) en indicatoren **tussen twee** meetcampagnes (y-as). De indicatoren tussen twee meetcampagnes zijn bepaald over 28 dagen voorafgaand aan de tweede meting. Een rij per indicator, en een kolom per controlepolygon. Voor de definities van de controlepolygonen zie Hoofdstuk 0. De kleur van de markers geeft de plaats in de tijdreeks aan: blauw 2010 naar rood 2018b.



Figuur C.5 Overzichtsfiguur correlatieanalyse van relatief gemeten areaalverandering (ratio / jaar) (x-as) en indicatoren **tussen** twee meetcampagnes (y-as). De indicatoren tussen twee meetcampagnes zijn bepaald over 56 dagen voorafgaand aan de tweede meting. Een rij per indicator, en een kolom per controlepolygon. Voor de definities van de controlepolygonen zie Hoofdstuk 0. De kleur van de markers geeft de plaats in de tijdreeks aan: blauw 2010 naar rood 2018b.



Figuur C.6 Overzichtsfiguur correlatieanalyse van relatief gemeten areaalverandering (ratio / jaar) (x-as) en indicatoren **tussen** twee meetcampagnes (y-as). De indicatoren tussen twee meetcampagnes zijn bepaald over 112 dagen voorafgaand aan de tweede meting. Een rij per indicator, en een kolom per controlepolygon. Voor de definities van de controlepolygonen zie Hoofdstuk 0. De kleur van de markers geeft de plaats in de tijdreeks aan: blauw 2010 naar rood 2018b.