



NAM

**Deltares**

# **Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019)**



## **Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019)**

### **Auteur(s)**

Marlies van der Lugt

Martijn Visser

Gini Ketelaar (NAM), bijlage C

### **Partners**

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., ASSEN

## Monitoring wadplaatareaal Friesche Zeegat met LiDAR (2010-2019)




<b>Opdrachtgever</b>	Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.
<b>Contactpersoon</b>	Harry Piening
<b>Referenties</b>	
<b>Trefwoorden</b>	Monitoring gaswinning, Friesche Zeegat, Zoutkamperlaag, Pinkegat, LiDAR

### Documentgegevens

<b>Versie</b>	0.1
<b>Datum</b>	15-04-2020
<b>Projectnummer</b>	11203620-002
<b>Document ID</b>	11203620-002-ZKS-0006
<b>Pagina's</b>	69
<b>Status</b>	definitief

### Auteur(s)

	Marlies van der Lugt	
	Martijn Visser	
	Gini Ketelaar (NAM), bijlage C	

Doc. Versie	Auteur	Controle	Akkoord	Publicatie
0.1	Marlies van der Lugt 	Zheng Bing Wang 	Toon Segeren 	
	Martijn Visser	Ad van der Spek		
	Gini Ketelaar (NAM)			

# Samenvatting

In deze monitoringsrapportage over de ontwikkeling van het plaatareaal in het Friesche Zeegat is aan de hand van een meetreeks van tweemaal per jaar ingewonnen LiDAR opnamen uit de periode 2010-2019 onderzocht of de morfologie van de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag gevolgen ondervindt van diepe bodemdaling door gaswinning. Over dit onderzoek wordt jaarlijks gerapporteerd in het kader van het hand-aan-de-kraan principe en voorgelegd aan de Commissie monitoring Waddengas.

In deze rapportage van de analyse van de data tot en met 2019 ligt de nadruk van het onderzoek op de bruikbaarheid van een door NAM voorgestelde correctie op de originele dataset. Met deze correctie worden systematische verschillen in hoogte van harde, niet door bodemdaling beïnvloede oppervlakken aan de randen van het projectgebied en op de sedimentgrids geminimaliseerd. De correctie van de meetreeks maakt de interpretatie van veranderingen in de hypsometrie eenduidiger en geeft een herleidbaar en aantoonbaar verband tussen areaalveranderingen en windcondities tussen opeenvolgende metingen. Omdat daarnaast uit de NAM analyse blijkt dat de meetfouten na de correctie meer normaal verdeeld zijn, wordt aanbevolen de voorgestelde correctie toe te voegen aan het standaard opwerkprotocol van de LiDAR opnamen.

Zowel uit de tijdreeksanalyse als uit de hypsometrische curven wordt een lichte afname van plaatareaal boven NAP-0.5m binnen het kombergingsgebied Pinkegat geconstateerd. Deze ontwikkeling valt binnen de foutenmarge en is daarom binnen de grenzen van de meetmethode niet significant. Het plaatareaal van het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag is constant gebleven in de monitoringsperiode. Op niveau van individuele platen zijn gebieden aan te wijzen waar toe- en afname van plaatareaal groter is dan de meetonzekerheid.

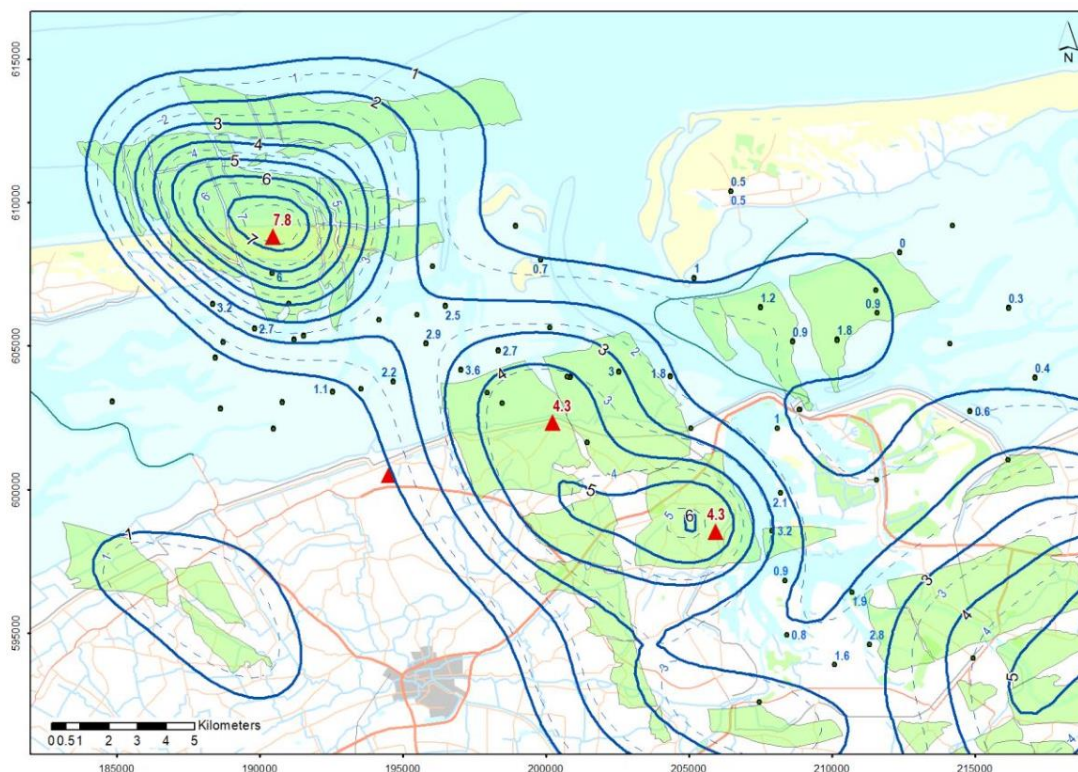
# Inhoud

	<b>Samenvatting</b>	<b>4</b>
<b>1</b>	<b>Inleiding</b>	<b>7</b>
1.1	Status monitoring na 2018	8
1.2	Onderzoeksvragen	8
1.3	Aanpak en leeswijzer	8
<b>2</b>	<b>Verwerking LiDAR data</b>	<b>10</b>
2.1	Beschrijving opnamen 2019	10
2.2	Aanbeveling correctie systematische afwijkingen	11
2.3	Opwerking	12
2.4	Voorgestelde correctie	13
2.5	Data overzicht	15
<b>3</b>	<b>Analyse Areaalontwikkeling</b>	<b>16</b>
3.1	Ruimtelijk geïntegreerde ontwikkelingen	16
3.2	Tijdsgemiddelde ontwikkelingen	20
3.3	Dwarsdoorsneden	22
3.4	Conclusies	24
<b>4</b>	<b>Analyse Hypsometrie</b>	<b>25</b>
4.1	Kombergingsgebieden	25
4.2	Platen in het Pinkegat	26
4.3	Wad ten zuiden van Ameland	28
4.4	Platen in het Zoutkamperlaag	29
4.5	Conclusies	30
<b>5</b>	<b>Verklarende factoren</b>	<b>31</b>
5.1	Invloed condities tijdens de inwinning	31
5.2	Invloed stormachtigheid tussen twee opnamen	33
5.3	Conclusies	38
<b>6</b>	<b>Analyse lange-termijn trends</b>	<b>39</b>
6.1	Methode	39
6.2	Aansluiting datasets	40
6.3	Conclusies	42
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>43</b>
7.1	Conclusies	43
7.2	Aanbevelingen	44
<b>8</b>	<b>Referenties</b>	<b>45</b>
<b>A</b>	<b>Overzicht vluchtgegevens</b>	<b>46</b>
<b>B</b>	<b>Analyse individuele platen</b>	<b>49</b>
<b>C</b>	<b>NAM rapportage datareeks correctie</b>	<b>54</b>

C.1	Het gebruik van harde oppervlaktes en sedimentgrids voor de berekening van residuele systematische verschillen	54
C.2	Evaluatie op de Ground Control Point grids	66

# 1 Inleiding

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het waddegebied en de Noordzee. Deze winning vindt vanaf 1986 plaats bij Ameland en is in 2007 uitgebreid met drie gasvelden in de Waddenzee: Moddergat, Lauwerroog en Vierhuizen. Deze gaswinning leidt tot daling van de diepe bodem, welke enkele millimeters per jaar bedraagt. Figuur 1.1 plot de contourlijnen van de totale diepebodemdaling volgens de modellen van NAM vanaf de nulmeting Waddenzee (2006).



*Figuur 1.1 Bodemdaling in cm (status modelcontour: 1-1-2018) door gaswinning sinds de nulmeting in de Waddenzee in 2006. In blauw de contouren van de gemodelleerde bodemdaling volgens de aangepaste/gekalibreerde geomechanische modellen (gestreepte contouren geven de bodemdaling van 2017 weer zoals getoond in de M&R-rapportage over 2017). De punten met label in de Waddenzee representeren de peilmerken met de gemeten hoogteverschillen vanaf 2006 (nulmeting Waddenzee) tot de laatst uitgevoerde meting in mei 2018. De rode waarden geven de daling aan van de permanente GPS-stations in de periode feb. 2007- jan. 2019. Er is geen bodemdaling aangegeven voor het Ternaard GPS-station omdat deze nog niet in bedrijf was in 2006.*

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 waddegebied 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, en waar deze rapportage ook onderdeel van vormt.

Leidend in deze rapportage is de vraag of de morfologie van de wadplaten gevolgen ondervindt van de vergrote bergingscapaciteit die wordt gecreëerd door de diepe bodemdaling. Hiertoe wordt de meetreeks van LiDAR opnamen geanalyseerd.

## 1.1 Status monitoring na 2018

Van der Lugt et al. (2019) constateerden dat in 2018 het gemeten plaatareaal toegenomen was ten opzichte van 2017. Daarnaast bleek hoogteligging van harde oppervlakken zoals wegen, in opeenvolgende jaren te variëren. Hoogteverschillen tot wel 7 cm werden gevonden aan de randen van het meetgebied, in sommige jaren negatief en in andere jaren juist positief, waar men eigenlijk zou verwachten dat de hoogte niet verandert. Deze verschillen zijn niet verklaarbaar met bodemdaling. Echter, ze bepalen wel de gemeten volumeveranderingen van de wadplaten tussen opeenvolgende jaren. Van der Lugt et al. (2019) adviseerden de systematische verschillen verder te onderzoeken en na te denken over een mogelijke correctie op de meetreeks.

## 1.2 Onderzoeksvragen

De vraag achter de monitoring is: "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?".

Voor deze monitoringsrapportage 2019 is het onderzoeken van het effect van de voorgestelde correctie leidend. De volgende onderzoeksvragen worden behandeld:

Interpretatie NAM meetreeks:

- *Hoe passen de twee opnamen uit 2019 in de meetreeks zoals gerapporteerd in Van der Lugt et al. (2019)?*
- *Helpt een correctie van de dataset op basis van de geconstateerde systematische verschillen bij de interpretatie van de meetreeks?*
- *Helpt de correctie van de dataset op basis van de geconstateerde systematische verschillen de analyse van verklarende factoren voor fluctuaties in gemeten areaal?*

Inpassing NAM meetreeks in lange-termijn trends:

- *Hoe verhoudt de NAM meetreeks zich tot de Rijkswaterstaat meetreeks, welke uitgebreid is met een 2019 opname van het Friesche Zeegat?*

## 1.3 Aanpak en leeswijzer

Voor de interpretatie van de NAM meetreeks zijn de 2019 opnamen opgewerkt volgens het standaard protocol (zie Schrijvershof (2018), Van der Lugt et al. (2019)). Omdat NAM systematische verschillen in 2019 constateerde, heeft zij in voorjaar 2020 zelf het onderzoek naar deze hoogteverschillen voortgezet en een voorstel gedaan voor een correctie. Een uitwerking van deze analyse en de voorgestelde correctie is bij dit rapport bijgevoegd als Bijlage C. Deltares heeft het voorstel voor de correctie nader bekeken. Dit is uitgewerkt in Hoofdstuk 2.

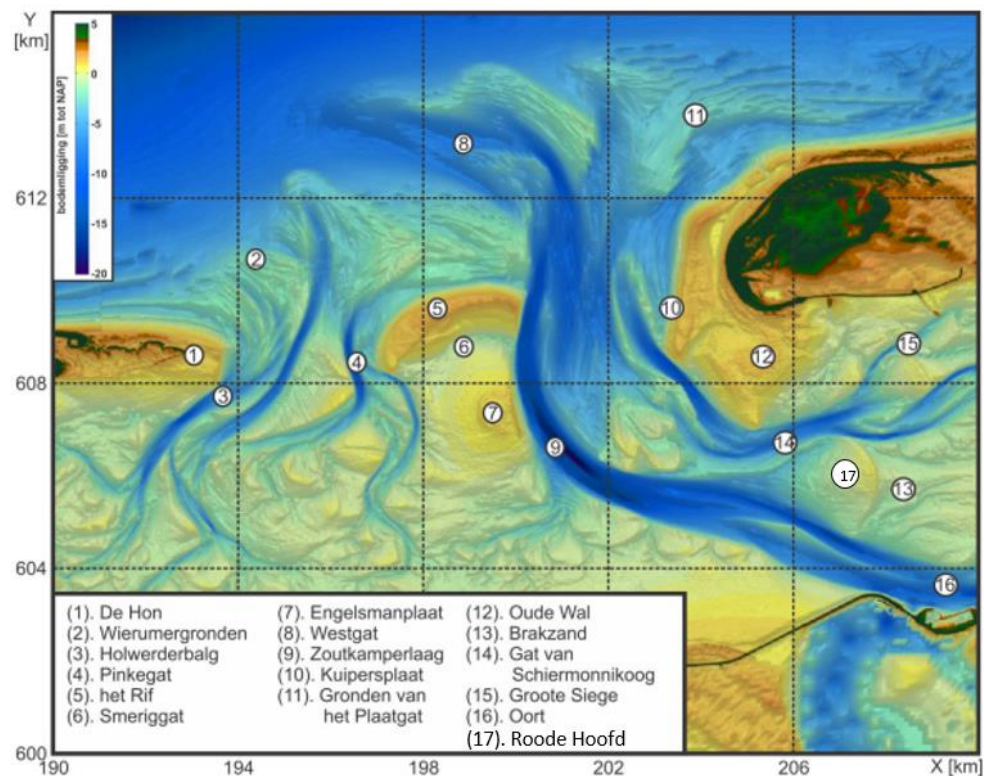
Omdat de voorgestelde correctie nog niet definitief is opgenomen in het opwerkingsprotocol, worden dit jaar alle analyseresultaten zowel mét als zonder correctie gerapporteerd. Hoofdstuk 3 beschrijft de analyse van de ontwikkeling van het plaatareaal boven NAP-0.5m. In de rapportage over periode 2010-2018 werd op meerdere referentiehoogten ingezoomd, maar dit leidde tot een veelvoud aan tijdreeksen die een eenduidig beeld niet bevorderden. Er is nu voor gekozen de rapportage daarom alleen op tijdreeksen van areaal boven NAP-0.5m te focussen. Uit de hypsometrische curven kan dan alsnog worden afgelezen hoe de sedimentverdeling in de verticaal vanaf NAP-0.5m verandert. Deze curven worden besproken in Hoofdstuk 4.



Hoofdstuk 5 bespreekt hoe zowel de toevoeging van de twee 2019 opnamen als het meenemen van de voorgestelde correctie de analyse van verklarende factoren beïnvloeden. Alleen indicatoren waarvoor eerder een verband werd gevonden met gemeten plaatareaal en indicatoren voor areaalveranderingen, zijn aangevuld met de nieuwe resultaten en de voorgestelde correctie en geanalyseerd.

In Van der Lugt et al. (2019) is de aansluiting van de NAM meetreeks op de Rijkswaterstaat Vaklodingen dataset besproken. Hiervoor werden de Vaklodingen opnieuw geanalyseerd binnen het verticale bereik NAP-0.5 m tot NAP+2 m. De aansluiting van de twee datasets leek goed, maar was slechts op één overlappende opnameperiode, die van 2012, gebaseerd. Recent zijn de Vaklodingen van het Friesche Zeegat van 2019 beschikbaar gemaakt. Hoofdstuk 6 bespreekt de uitbreiding van de inpassing met deze nieuwe opname.

Als laatste worden in Hoofdstuk 7 conclusies getrokken en aanbevelingen gedaan. Ter referentie is een overzichtsfiguur met de benaming van specifieke morfologische eenheden weergegeven in Figuur 1.2.



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

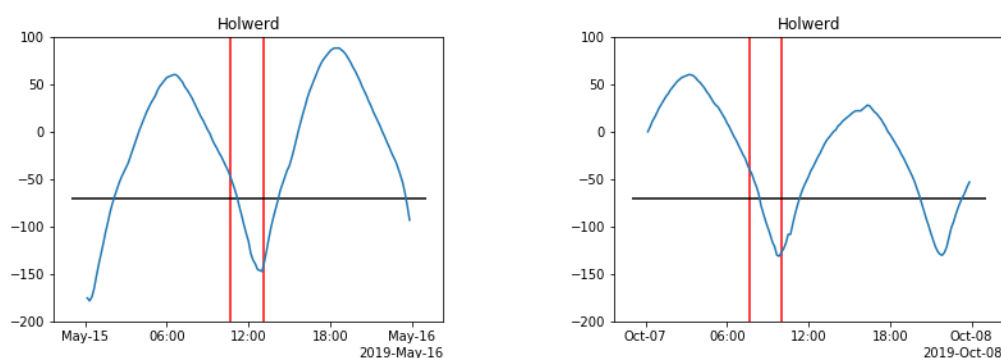
## 2 Verwerking LiDAR data

In dit hoofdstuk wordt de kwaliteit van de twee nieuwste LiDAR opnamen besproken. Daarnaast wordt uiteengezet hoe de taakverdeling van een mogelijke datacorrectie tot stand is gekomen en hoe deze datacorrectie eruit ziet.

### 2.1 Beschrijving opnamen 2019

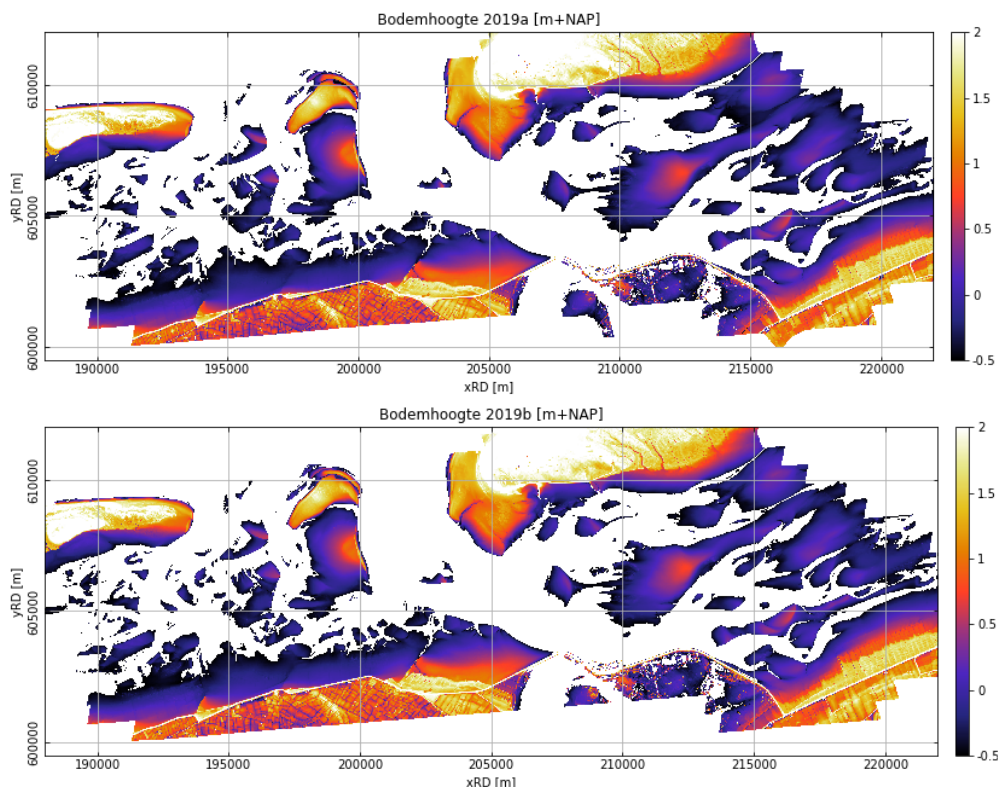
LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat zijn in 2019 wederom door Terratec ingewonnen. De voorjaar opname vond plaats op 15 mei 2019, de najaar opname op 7 oktober. Terratec (2019a, 2019b) beschrijven het vliegplan, de vlakdekking, puntendichtheid en de kwaliteitscontrole. Om het inplannen van de winning binnen één getijdenvenster eenvoudiger te maken is de vluchthoogte enigszins aangepast ten opzichte van 2018b; van 1250 m naar 1500 m. Hiermee kunnen ook de controlelijnen worden ingewonnen in hetzelfde getijdenvenster; in 2018 werden deze ingewonnen op een omliggende dag. De minimale puntendichtheid geassocieerd met deze nieuwe hoogte is 5.76 punten/m<sup>2</sup>, wat nog steeds voldoende is voor opwerking naar rasters.

Het vluchtplan is gebaseerd op het getijdenvenster van de stations Lauwersoog, Nes en Schiermonnikoog. In eerdere rapportages (Van der Lugt et al. (2019)), werd duidelijk dat voor controle van waterstanden in de zuidwestelijke hoek van het projectgebied de waterstanden bij station Holwerd ook relevant zijn. Voor beide 2019 opnamen zijn de eerste vluchtlijnen gemeten op tijdstippen die niet binnen het getijdenvenster van Holwerd passen (Figuur 2.1). Bij eerdere opnamen werd uit inspectie van de opgewerkte hoogtekaarten duidelijk dat er banden in de vorm van vlieglijnen te herkennen waren met een zeer vlakke, afwijkende hoogte ten opzichte van de omliggende vliegbanen. Dit is een aanwijzing dat waterstanden i.p.v. bodemhoogtes zijn gemeten. Bij nadere inspectie van de 2019 opgewerkte data, zijn deze waterstanden niet traceerbaar in de resultaten van 2019 en is de invloed van de te hoge waterstand bij Holwerd blijkaar niet erg groot geweest (Figuur 2.2). Wel is het aan te bevelen om de vliegbanen van noord naar zuid in te winnen, omdat op basis van het astronomisch getij de waterstand bij Holwerd op een later moment onder NAP-0.7m zakt dan bij Nes en Schiermonnikoog, . Deze vliegbaanvolgorde is in 2019 wel gehanteerd voor de voorjaarsinwinning, maar niet in het najaar.



Figuur 2.1 Waterstand gemeten bij Holwerd (blauw), met start en stop tijden van de metingen (rood) en het waterstandscriterium van -0.7m (zwart).

Uit Figuur 2.2 wordt ook duidelijk dat de vlakdekking van de data goed was in 2019. Een samenvatting van gegevens bij elke opname is getabuleerd in Appendix A met informatie over meetdienst, instrumentgebruik en inwinduur.



Figuur 2.2 Hoogtekaarten van de ingewonnen data in voorjaar 2019 (boven) en najaar 2019 (onder).

## 2.2 Aanbeveling correctie systematische afwijkingen

Van der Lugt et al. (2019) beschreven een eerste analyse van de systematische verschillen tussen de gemiddeld gemeten hoogte op hard oppervlakte van de eilanden en van de N361 op het vasteland bij opéénvolgende opnamen. Eén component van de verschillen tussen de gemiddeld gemeten hoogte is bodemdaling door gaswinning. De systematische verschillen bleken echter bij ongeveer de helft van de opeenvolgende metingen positief en bij de andere helft negatief. Hierdoor kunnen deze verschillen niet uit bodemdaling alleen voortkomen. We concludeerden toen dat deze systematische verschillen de meest verklarende factor voor de grilligheid van het meetsignaal bleken. Daarom was de aanbeveling van Van der Lugt et al. (2019) om een nadere uitwerking van de geconstateerde systematische verschillen te maken, waarbij ook anders georiënteerde rotatievlakken moeten worden onderzocht naast de reeds onderzochte rotatieassen noord-zuid en oost-west. Daarnaast werd voorgesteld na te denken over hoe het bodemdalingssignaal uit de uitwerking weg kan worden gelaten.

NAM heeft in 2020 zelf een uitwerking van deze geconstateerde systematische verschillen gemaakt. Een rapport van deze uitwerking geschreven door NAM is toegevoegd aan dit rapport als Appendix C. De rol van Deltares is daarna geweest om te onderzoeken in hoeverre deze correctie de analyse van de meetreeks verbetert. Hieronder vatten we de resultaten van de analyse van NAM samen en bespreken we hoe dit in het opwerkingsprotocol doorwerkt.

In verdere hoofdstukken wordt waar mogelijk de vergelijking getrokken tussen resultaten mét en zonder correctie. Hierdoor kan direct worden vergeleken wat het effect van de correctie is op de interpretatie van de meetreeks.

## 2.3 Opwerking

We hanteren het opwerkprotocol voor verwerking van laspuntenwolken tot hoogtekaarten zoals beschreven in Van der Lugt et al. (2019). Dat is kort samengevat:

- Wegfilteren van laspunten uit dwarslijnen
- Wegfilteren van laspunten boven NAP+2m
- Wegfilteren van vlieglijnen waar uit de rapportage blijkt dat buiten het getijvenster is gevlogen (niet toegepast op 2019 data m.b.t. het getijvenster bij Holwerd omdat het geen zichtbaar effect had op opnamen).
- Mediaan van laspunten binnen roostercel bepalen op standaard 1x1m, 10x10m en 20x20m rooster, waarbij geen minimale hoeveelheid punten wordt aangehouden.

Deze hoogtebeelden vormen de originele, niet ingevulde dataset. NAM hanteert de hoogtekaarten op 1x1m van alle opnamen 2010-2019 als basis voor de afleiding van een correctie. Voor een uitgebreide verslag van de totstandkoming van de correctie, zie Appendix C. Hier vatten we het uiteindelijke stappenplan waartoe NAM is gekomen bondig samen:

- Punten op harde oppervlak zijn geïdentificeerd die minder dan 2 cm bodemdaling hebben ondergaan sinds het begin van de winning. Deze liggen veelal aan de rand van het monitoringsgebied.
- Voor elke opname is de LiDAR hoogte op deze punten geëxtraheerd uit de 1-m roosters, deze set is  $Y_{Lidar}(t)$  genoemd.
- Voor de jaren waar sedimentgridmetingen zijn ingewonnen zijn deze toegevoegd aan de LiDAR hoogtemetingen:  $Y(t) = Y_{Lidar}(t) \cup Y_{sedgrid}(t)$ .
- Voorjaar 2017 is gekozen als referentiemeting, omdat dit een opname is met veel sedimentgridmetingen en de residuen ten op zicht van de andere metingen relatief laag zijn. Ook was de gemiddelde laagwaterstand tijdens deze meting zeer laag.
- Voor ieder jaar  $t \in T$  is voor alle punten in de set  $Y$  het verschil met de 2017a opname berekend:  $\epsilon(t) = Y(t) - Y_{2017a}$ .
- Deze fouten liggen ruimtelijk verdeeld door het projectgebied. Voor elk jaar is een lineair vlak ( $\epsilon(x, y, t) = a(t) \cdot x + b(t) \cdot y + c(t)$ ) gefit door deze verschillen, waarbij  $\epsilon$  in m, en  $x$  en  $y$  in km.

In Tabel 2.1 zijn de waarden van de vlak coëfficiënten zoals berekend door NAM getabuleerd.

Tabel 2.1 Voorgestelde correctievlak coëfficiënten per survey

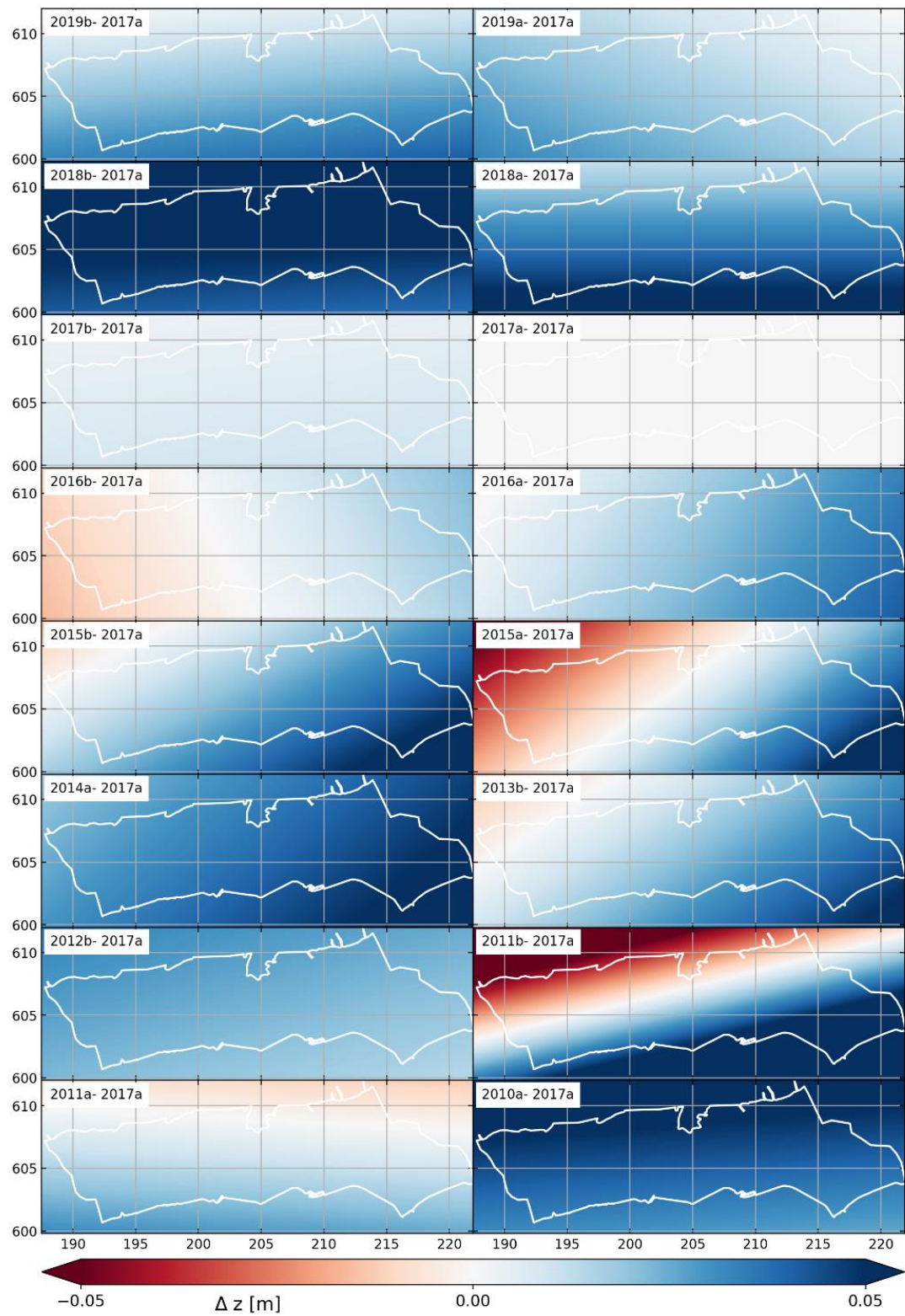
survey	a	b	c
2010a	0.00019	0.00243	-1.38996
2011a	0.00018	0.00314	1.94878
2011b	0.00273	0.01117	6.22332
2012b	0.00025	0.00090	-0.47052
2013b	0.00135	0.00203	0.9735
2014a	0.00083	0.00094	0.43762
2015a	0.00241	0.00332	1.52316
2016a	0.00106	0.00070	0.22663
2016b	0.00094	0.00049	-0.48624

<b>2017a</b>	0.00000	0.00000	0
<b>2017b</b>	0.00007	0.00051	0.30095
<b>2018a</b>	0.00000	0.00372	2.28838
<b>2018b</b>	0.00010	0.00219	-1.25342
<b>2019a</b>	0.00053	0.00134	0.93675
<b>2019b</b>	0.00026	0.00277	1.64601

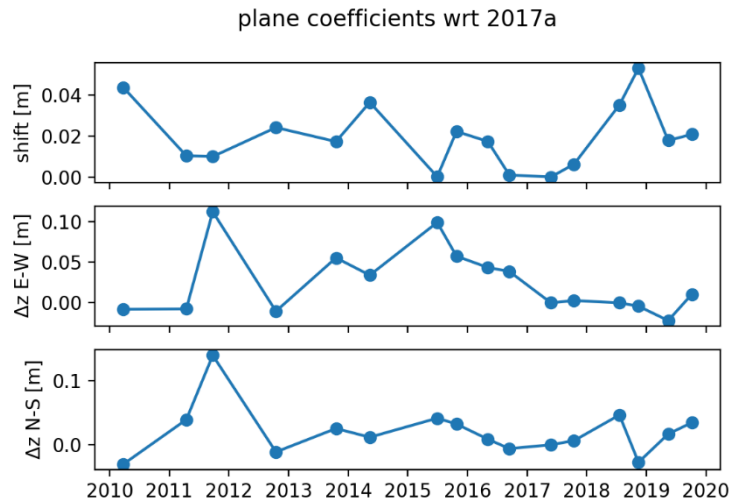
## 2.4 Voorgestelde correctie

Figuur 2.3 toont de voorgestelde correctievlakken om deze beter te kunnen interpreteren. De voorjaarsmeting wordt aangegeven met een achtervoegsel a, een najaarsmeting met b. Voor de opname 2017a is het vlak logischerwijs helemaal horizontaal door 0, omdat dit het referentiejaar is. Andere opnamen vertonen soms zowel blauwe als rode vlakken, wat wil zeggen dat delen van de opname moeten worden verlaagd ten opzichte van opname 2017a, en andere juist verhoogd. In de meeste opnamen valt op dat positieve afwijkingen (blauwe kleuren) domineren in het beeld. Bijna alle jaren liggen ten opzichte van 2017a dus hoger en worden door de correctie naar beneden bijgesteld. Verder blijkt bijvoorbeeld voor opnamen 2011b en 2015a een rotatie-as duidelijk anders dan Noord-Zuid of Oost-West te bestaan.

Een aantal effecten van deze voorgestelde correctie zijn berekend ter vergelijking met de resultaten van de analyse van Shizhuo Liu van vorig jaar. Ten eerste is het correctievlak over het hele Friesche Zeegat gemiddeld, en geplot in het bovenste paneel van Figuur 2.4. Dit toont aan dat alle opnamen gemiddeld genomen hoger liggen dan opname 2017a. Dat betekent dat alle opnamen door de correctie gemiddeld genomen naar beneden worden bijgesteld, variërend met 0 tot 5 cm. Hoe hoger de geconstateerde shift, hoe sterker deze bijstelling is. Daarnaast is berekend wat het verschil is in de correctie tussen de oostrand van het domein en de westrand, dit is het tweede paneel. De oostrand van het domein wordt over het algemeen genomen sterker naar beneden bijgesteld dan de westrand, dit verschil kan oplopen tot 10 cm (zie opname 2011b). Eenzelfde analyse is gemaakt voor de noordrand en de zuidrand (onderste paneel). Ook hier is voor opname 2011b het verschil tussen de twee randen het grootst, zo'n 13 cm. Deze getallen komen kwalitatief overeen met de analyse van vorig jaar. De precieze getallen verschillen tussen de twee analyses omdat de controlepunten binnen de 2cm-bodemdalingscontour in de 2020 analyse niet zijn gebruikt. De keuze van de set controlepunten heeft dus enige invloed op de berekende foutenvlakken. Een verdere beschouwing hiervan is te vinden in Bijlage C.



Figuur 2.3 Visualisatie van de correctievlakken per jaar berekend door NAM op basis van sedimentgridmetingen en harde oppervlakken aan de projectgebiedsranden.



Figuur 2.4 Overzicht van de effecten van de correctie op gemiddelde hoogte in het Friesche Zeegat (boven), het verschil in correctie van de Oostgrens en de westgrens van het projectgebied (midden), en het verschil in correctie van de noordgrens en de zuidgrens van het projectgebied (onder).

## 2.5 Data overzicht

Voor de verdere analyse zijn er dit jaar 2 typen data beschikbaar: zowel de gecorrigeerde hoogtekaarten als de originele hoogtekaarten. Binnen beide typen bestaan nog roosterpunten waar in sommige jaren geen laspunten in zijn gevallen en dus geen waarde toegekend hebben gekregen. In recente jaren is het aantal missende roostercellen sterk gereduceerd. Voor de berekening van tijdreeksen van areaal en hypsometrie zijn deze kaartbeelden nog opgevuld met lineaire driehoeksinterpolatie. Voor analyse van tijdsgemiddelde ontwikkelingen en dwarsdoorsneden worden de niet-opgevulde hoogtebeelden gebruikt. In alle analyses worden resultaten mét en zonder correctie met elkaar vergeleken.

In lijn met de afgelopen twee rapportagejaren worden de opnamen 2014b en 2015b weggelaten uit de analyse. In deze opnamen zijn teveel vlieglijnen buiten het getijdenster gevlogen, waardoor opvullen van het beeld met voorgaande metingen en omliggende observaties niet nuttig bleek. Voor een visueel overzicht van de kaartbeelden 2010-2018 verwijzen we naar Van der Lugt et al. (2019), voor 2019 naar Figuur 2.2.

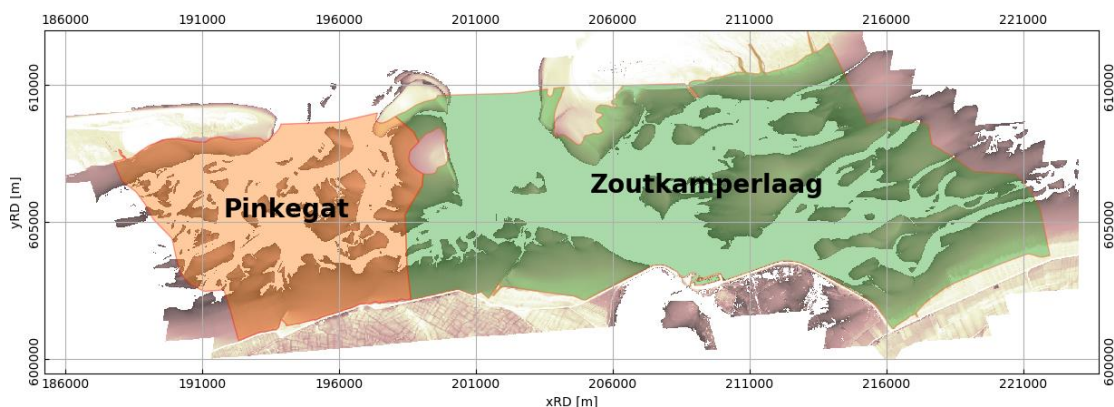
## 3 Analyse Areaalontwikkeling

In voorgaande rapportages werd naar verschilkaarten van opnamen gekeken om bodemveranderingen te constateren. De lange reeks aan verschilkaarten droeg niet rechtstreeks bij aan de interpretatie van de data, maar hielp vooral bij het interpreteren van de kwaliteit van individuele opnamen. Omdat de 2019 opnamen van vergelijkbare kwaliteit zijn als de 2018 opnamen, vinden we het niet nodig om nogmaals de lange lijst verschilplots in het rapport op te nemen. Dit jaar wordt alleen het ruimtelijke patroon van tijdsgemiddelde ontwikkelingen en de ruimtelijk geïntegreerde tijdreeksen van plaatareaal gerapporteerd. Een aantal observaties die de twee kombergingsgebieden van elkaar differentiëren wordt daarna nog inzichtelijk gemaakt aan de hand van een paar dwarsdoorsneden, wat als alternatief kan worden gezien aan een contourplotanalyse.

### 3.1 Ruimtelijk geïntegreerde ontwikkelingen

#### Kombergingsgebieden

Voor de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat zijn integrale tijdreeksen van plaatareaal gelegen boven NAP-0.5m geplot in Figuur 3.2, zowel voor het originele als het gecorrigeerde signaal. De correctie op de dataset leidt tot een verlaging van het plaatareaal op de tijdreeks voor de Zoutkamperlaag. Dit konden we al afleiden uit de donkerblauwe tinten van Figuur 2.3 aan de oostkant van het gebied. Dit moeten niet worden geïnterpreteerd als een daadwerkelijke verlaging van het wad, de correctie heeft er alleen voor gezorgd dat we de opnamen onderling beter kunnen vergelijken. Voor alle opnamen is de gemiddelde hoogte van harde vlakken buiten het dalingsgebied gelijk getrokken met de gemiddelde hoogte op diezelfde plekken van het referentiejaar 2017a.

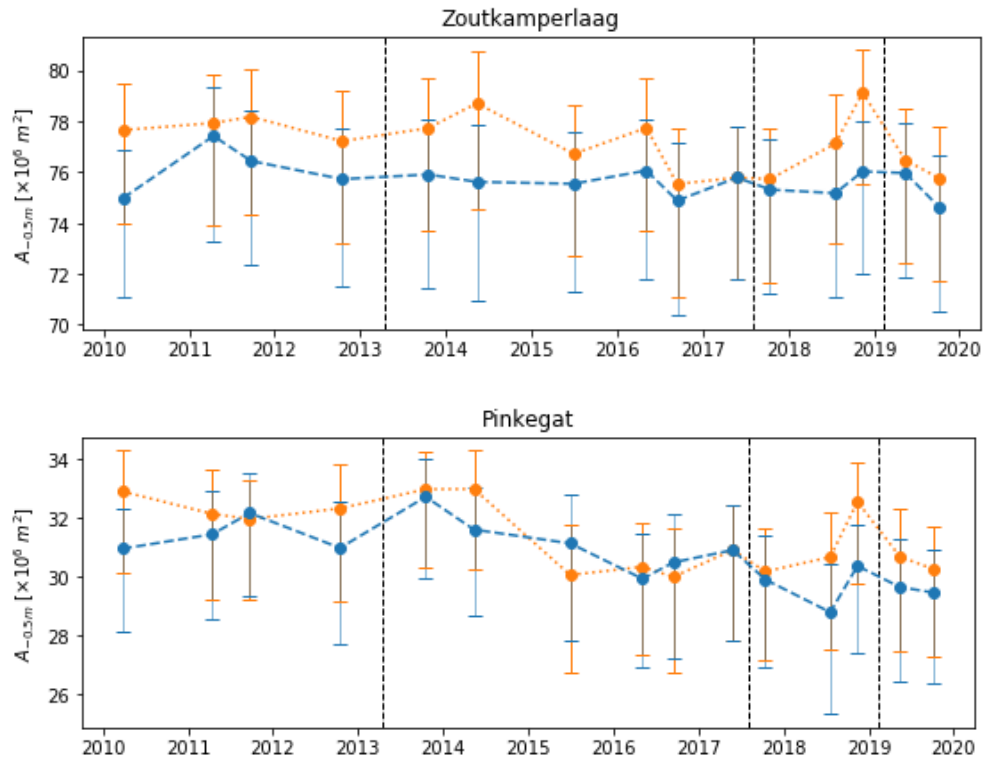


Figuur 3.1 Analysepolygoenen voor areaalontwikkeling op kombergingsschaal.

Van der Lugt et al. (2019) konden geen verklaring vinden voor een sprong in het areaal van het Pinkegat tussen 2014 en 2015. De voorgestelde correctie suggereert nu dat deze sprong een gevolg was van de systematische verschillen tussen referentievlakken van de opnamen onderling; in de gecorrigeerde tijdreeks is de ontwikkeling meer geleidelijk. De correctie verwijdert niet alle fluctuaties in de meetreeks. Voor de Zoutkamperlaag is het signaal constanter geworden. Voor het Pinkegat is variantie in het signaal min of meer constant gebleven, maar is dit alleen gelijkmatiger over de tijd heen verdeeld. Voor het Pinkegat lijkt een licht dalende trend in het signaal te zitten. Ter referentie zijn onzekerheidsbanden geplot met  $\sigma = 3\text{ cm}$ . De onzekerheidsmarge die nog aanwezig is, ook na de correctie, is onderzocht door NAM door middel van een analyse van de parameters van histogrammen (standaardafwijking en percentielen) van hoogteverschillen op harde topografie en sedimentgrids, zie Bijlage C. Hieruit blijkt 3 cm een goede schatting van de residuele verschillen tussen opnamen.



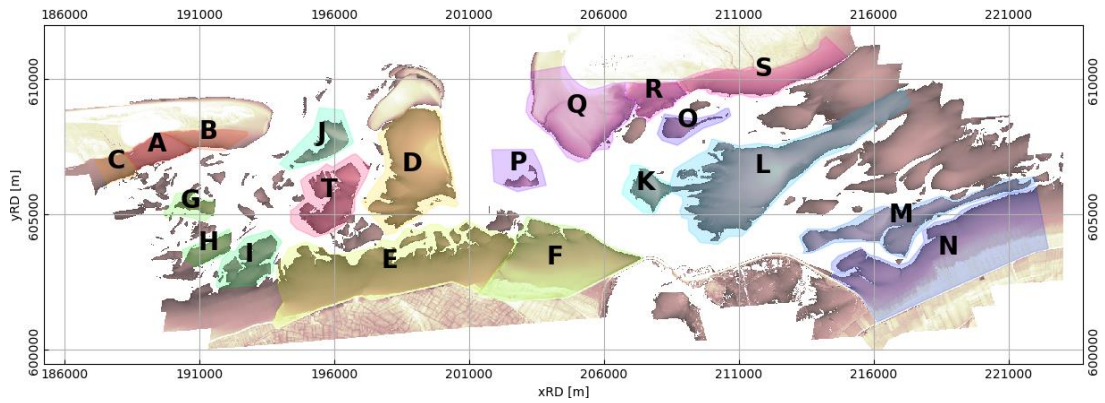
De tijdreeks, zowel gecorrigeerd als origineel, toont nog geen indicatie dat er areaalontwikkelingen plaatsvinden die buiten deze onzekerheidsband vallen.



Figuur 3.2 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag (boven) en Pinkegat (onder). De onzekerheidsbanden tonen effect van onzekerheidsmarge van 3 cm. De oranje punten, lijn en onzekerheidsbanden tonen de originele dataset, de blauwe punten, lijn en onzekerheidsbanden de gecorrigeerde dataset.

### Individuele platen

Op kombergingsgebied-geaggregeerd niveau is geen duidelijke ontwikkeling in areaal af te leiden. Dit komt deels door de meetonzekerheid, maar ook omdat op geaggregeerde schaal de ontwikkeling van meerdere platen wordt geïntegreerd. Op individueel plaatniveau vindt wel degelijk ontwikkeling plaats, die ook met de LiDAR opnamen waar te nemen is. Om deze ontwikkelingen te onderzoeken, is een aantal platen (plaatsystemen) nader beschouwd, zie Figuur 3.3. De relevante deelgebieden bespreken we hier. Zie Appendix B voor een volledig overzicht van de tijdreeksen voor alle deelgebieden.



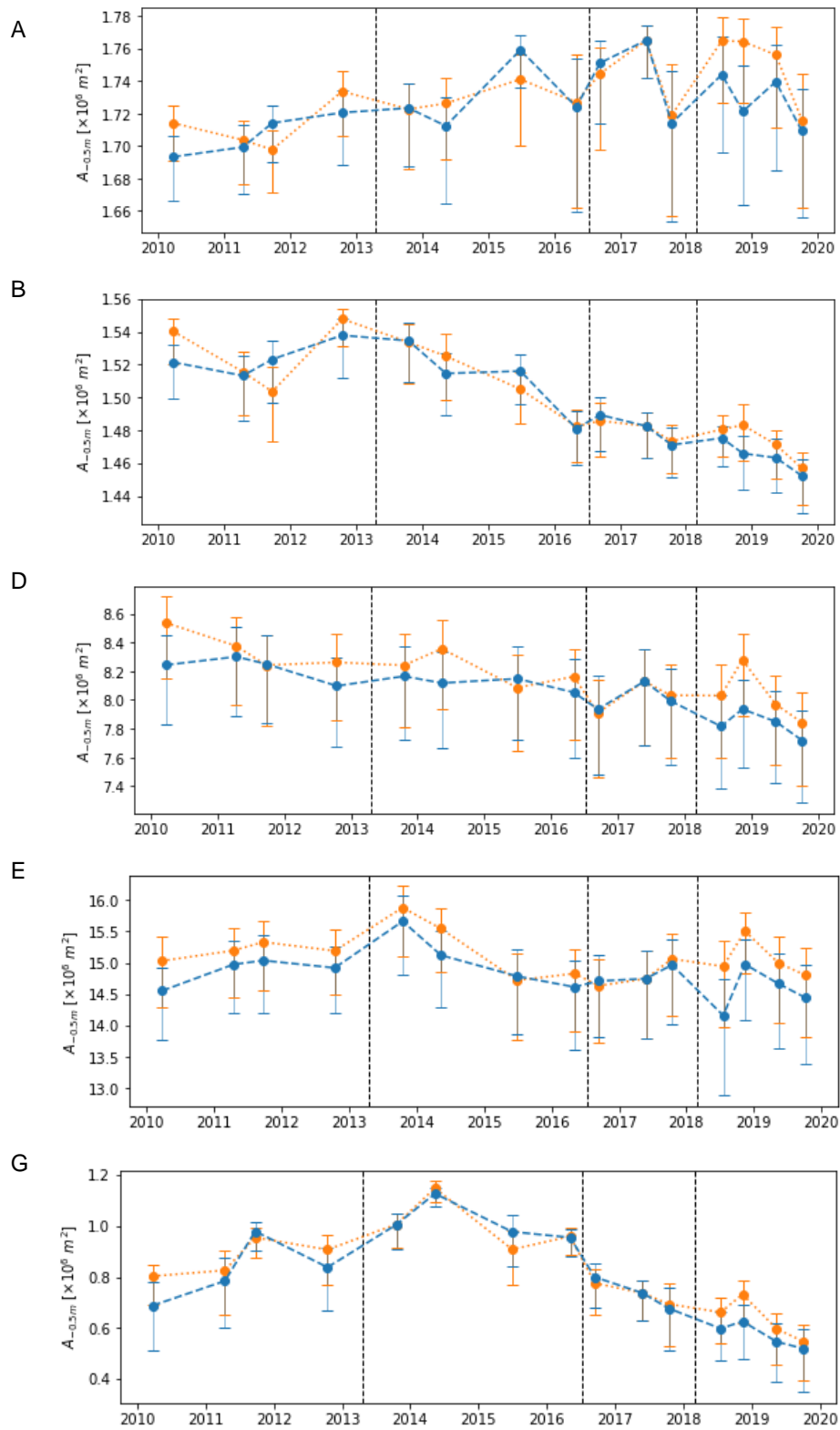
Figuur 3.3 Overzicht van (delen van) platen die individueel zijn bestudeerd.

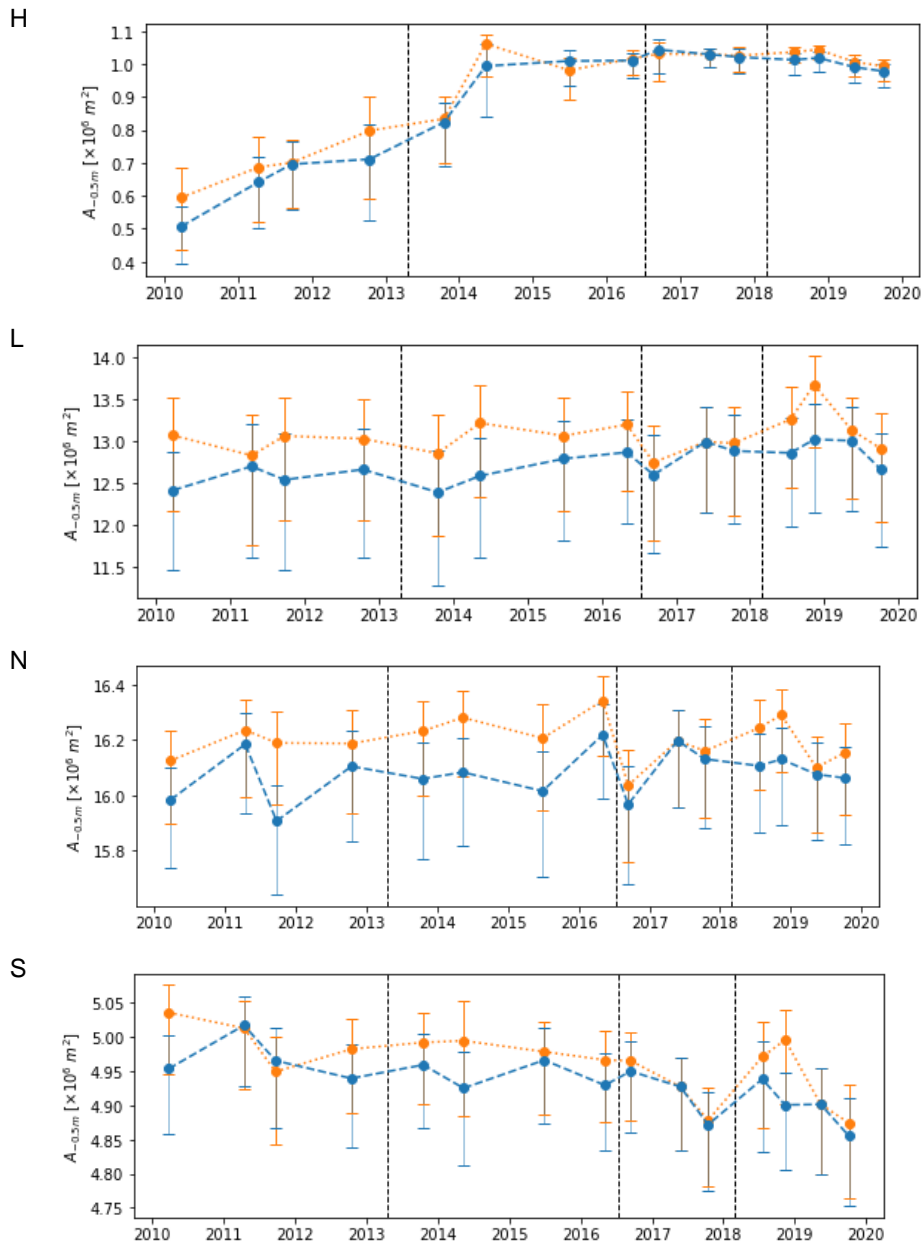
Allereerst relateren we de areaalontwikkeling van de platen ten zuiden van Ameland-Oost aan de conclusies uit de spijkermetingen. Uit de spijkermetingen blijkt dat alle wadplaten sedimenteren. Voor spijkermetingen die ruwweg corresponderen met deelgebied A is de sedimentatiesnelheid gemiddelde groter dan de gerapporteerde diepebodemdaling. Voor spijkermetingen liggend in het gebied B is de snelheid van sedimentatie niet zo groot als de diepebodemdaling. Uit de LiDAR tijdreeksen voor deze gebieden blijkt dat deze hoogteontwikkeling een vergelijkbaar effect heeft op de ontwikkeling van het plaatareaal (Figuur 3.4 A-B). In deelgebied A schommelt het plaatareaal sterk, met grote onzekerheid, maar neemt gemiddeld genomen toe met zo'n 2 ha. In deelgebied B is het plaatareaal afgenomen met 6 ha. De nauwe onzekerheidsbanden rond de punten in dit deelgebied wijzen op een steile vooroever, waardoor deze ontwikkeling relatief zeker vast is te stellen.

Voor de deelgebieden D en E, liggend rond de Engelsmanplaat en de vooroever van Ternaard, is het signaal in lijn met het kombergingsgeaggregeerde signaal. Ook de mate van onzekerheid in hoogtebepaling werkt even sterk door in de onzekerheid rond de areaalbepaling (Figuur 3.4 D-E).

De platen liggend tegen het wantij, G en H, geven een afwijkend signaal van het kombergingsgeaggregeerde signaal. Voor gebied G vond in de eerste 4 jaar van de monitoring plaatuitbreiding boven NAP-0.5m plaats met 40 ha, wat in de jaren daaropvolgend weer verdwenen is uit het controle polygoon. De plaat in controlegebied H breidde ook uit in de eerste vier jaar met 50 ha maar blijft dan vanaf 2014 min of meer constant (Figuur 3.4 G-H).

Ter referentie bespreken we ook een aantal platen in de Zoutkamperlaag. Controlegebied S, onder Schiermonnikoog fluctueert binnen 15 ha, en lijkt qua signaal op de Engelsmanplaat (D). De trend lijkt neerwaarts, maar er vallen geen punten buiten de onzekerheidsbanden. De controlegebieden L (Brakzand) en N, hebben een signaal dat sterk overeenkomt met het kombergingsgeaggregeerde signaal en vertonen een constante trend. Er zijn fluctuaties (binnen een band van 20-30 ha) rond deze constante trend, maar deze zijn duidelijk kleiner dan de onzekerheid. De onzekerheden in areaal zijn in de Zoutkamperlaag relatief groot door de flauwheid van de plaatranden.





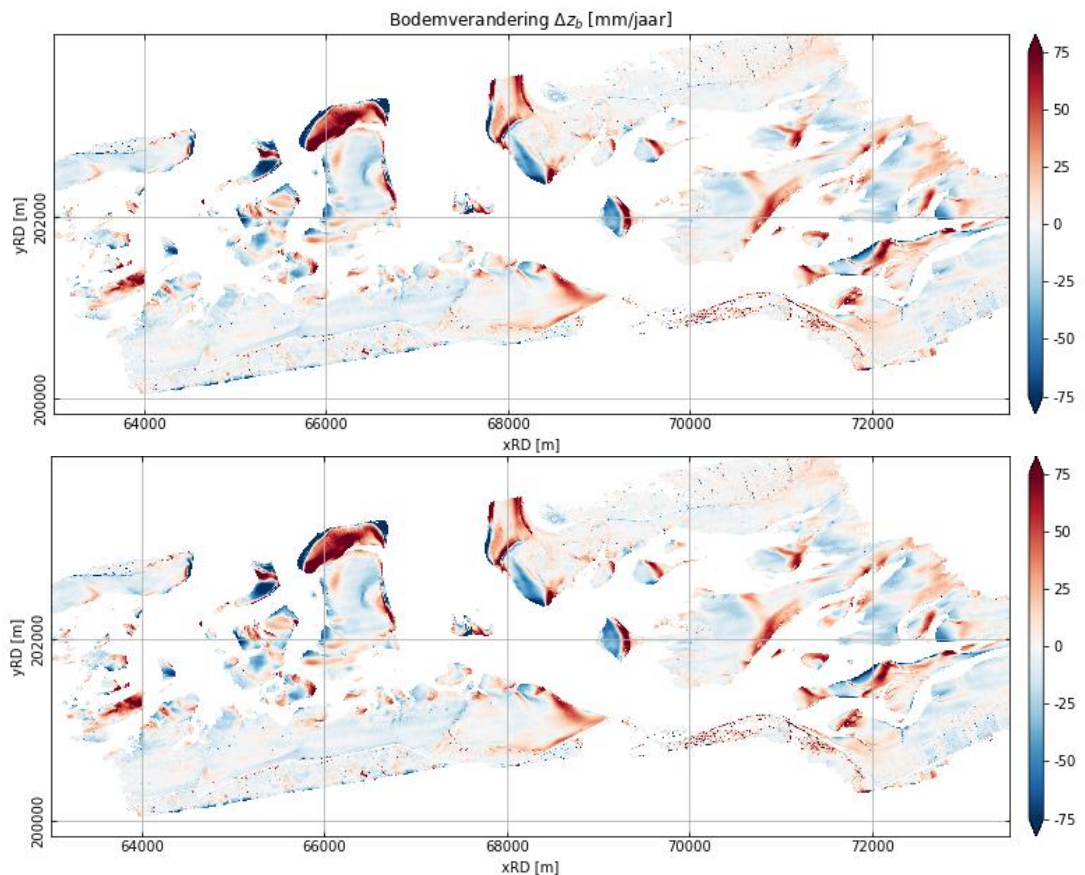
Figuur 3.4 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor besproken (delen van) platen. Voor locatie van de platen zie Figuur 3.3. De zwarte referentielijn is totale oppervlakte van het analysepolygoon. De onzekerheidsbanden tonen effect van onzekerheidsmarge van 3 cm. De oranje punten, lijn en onzekerheidsbanden tonen de originele dataset, de blauwe punten, lijn en onzekerheidsbanden de gecorrigeerde dataset.

### 3.2 Tijds gemiddelde ontwikkelingen

De meetreeks van bodemhoogtekaarten geeft voor elke roostercel een tijdreeks van bodemhoogte. Hierboven is deze informatie geaggregeerd in de ruimte. Daarnaast aggregeren we de meetreeks ook in de tijd. In deze analyse wordt een lineaire trend bepaald door middel van tijdsinterpolatie voor alle roostercellen van 10x10m. In deze analyse worden de niet-ingevulde hoogtebeelden gebruikt. De trendcoëfficiënt is uitgedrukt in millimeters per jaarbodemhoogteverandering. Alléén roostercellen waar meer dan 8 geldige waarden voor aanwezig zijn in de meetreeks, hebben een geldige waarde gekregen. Hierdoor wordt de invloed van incidenteel afwijkende punten die meestal buiten het verticale analysebereik vallen verminderd. De ontwikkeling van de bodemhoogte hoeft in werkelijkheid niet lineair te verlopen.

Wanneer er echter een sterke positieve dan wel negatieve ontwikkeling plaatsvindt, zal dit zich uiten in een positieve of negatieve coëfficiënt. Als er geen duidelijke ontwikkeling plaatsvindt zal de coëfficiënt zich in de buurt van 0 bevinden. Zo kunnen sterk variabele gebieden worden onderscheiden van meer statische gebieden, en kan ook de richting van de ontwikkeling (verhoging of verlaging) worden gekwantificeerd.

Tijdsgemiddelde migratiepatronen en bodemhoogteveranderingen zijn weergegeven in Figuur 3.5 voor een analyse mét voorgestelde correctie en zonder correctie. Hoewel de kwantitatieve bepaling niet precies overeenkomt, zijn de patronen tussen de twee figuren gelijk en op het oog niet te onderscheiden. De correctie beïnvloedt deze analyse dus niet significant. De migratiepatronen domineren het verkregen beeld. De sterkst veranderende gebieden zijn aanlanding van het Rif op de Engelsmanplaat waardoor het Smeriggat zich verzandt. Er vindt sterke erosie plaats aan de Oude Wal en het Roode Hoofd migreert sterk oostwaarts. In het Pinkegat lijkt gemiddeld genomen afzetting plaats te vinden aan de oevers van de Holwerderbalg, terwijl het Pinkegat wat uitbocht wat tot erosie van de oever van de Engelsmanplaat leidt. Uit de contourplots uit Van der Lugt et al. (2019) bleek een oostwaartse migratie plaats te vinden voor de meerderheid van de platen in de Zoutkamperlaag. In Figuur 3.5 is dat terug te zien als blauwe vlakken (een afnemende hoogte) westelijk gelegen van rode vlakken met een toenemende hoogte.

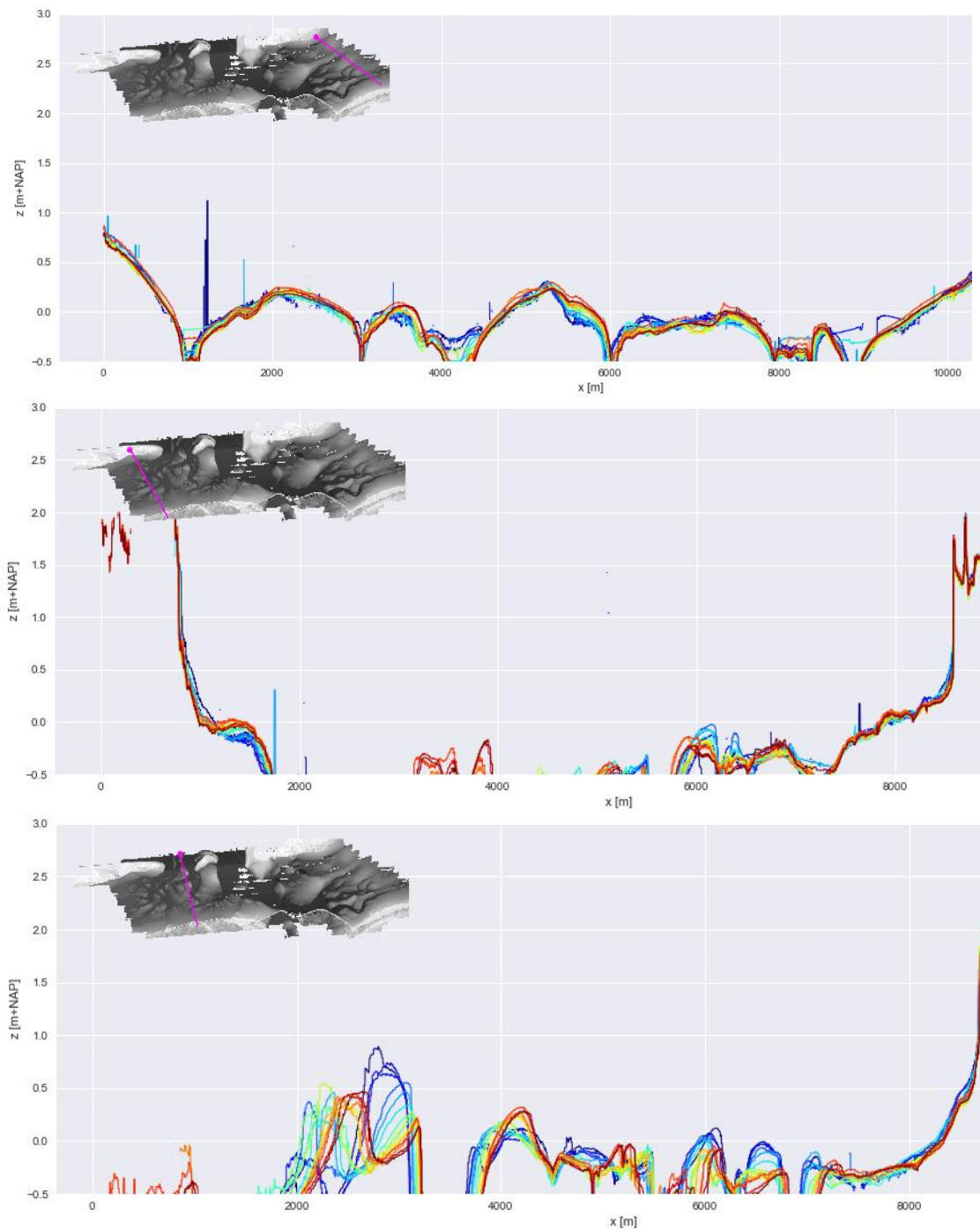


*Figuur 3.5 Lineaire trend coëfficiënt berekend per roostercel op basis van de tijdserie 2010-2019 met voorgestelde correctie (boven) en zonder correctie (onder). Blauwe kleuren geven een daling weer, rode kleuren sedimentatie. Cellen waar minder dan 8 waarnemingen aanwezig waren in de tijdreeks zijn uitgesloten van de berekening en tonen dus wit (geen data).*

### 3.3 Dwarsdoorsneden

Aan de hand van een drietal dwarsdoorsneden tonen we nog een aantal inherente verschillen tussen de twee kombergingsgebieden. De spikes die zich in de dwarsdoorsneden van eerdere opnamen bevinden zijn artefacten van het gehanteerde opwerkingsprotocol: dit betreft uitschieters van LAS punten die niet uit zijn gemiddeld omdat de datadichtheid in de eerste opnamen laag was. Wanneer er maar één uitschieter LAS punt beschikbaar is in een rooster cel, wordt dit de waarde van de hele cel. Aangezien het volume onder deze uitschieters beperkt is, beïnvloedt het de analyse niet sterk.

De platen tegen het wantij gebied aan in de Zoutkamperlaag liggen gemiddeld rond NAP+0m, terwijl dat voor het Pinkegat gemiddeld genomen lager ligt dan het verticale bereik van de LiDAR (NAP -0.5 m) (Figuur 3.6). Alleen de platen ten zuiden van Ameland en gelegen aan het vasteland zijn zichtbaar in alle opnamen, en alleen in de laatste paar jaar lijkt er een plaat in hoogte te ontwikkelen halverwege de dwarsdoorsnede. We zien hier dus dat de verhouding plaatareaal versus geulareaal verschilt tussen de twee kombergingsgebieden. Een dwarsdoorsnede van de platen die de geulen van het Pinkegat scheiden laat zien hoe veranderlijk sommige platen zijn onder invloed van geulmigratie. In tegenstelling daartoe zijn de platen langs het vasteland qua hoogte juist erg stabiel.



Figuur 3.6 Drie dwarsdoorsnedes van de LiDAR opnamen met voorgestelde correctie. In de buurt van wantij van Zoutkamperlaag (boven), in de buurt van wantij Pinkegat (midden) en door platen die de geulen van het Pinkegat scheiden (onder). Kleuren gaan van 2010a (blauw) naar 2019b (rood). De magenta lijn op het referentiefiguur geeft de locatie van de dwarsdoorsnede aan; 0m komt overeen met de magenta stip.

## 3.4 Conclusies

Analyse van tijdsgemiddelde ontwikkelingen toont aan welke platen en gebieden onderhevig zijn aan sterke morfologische veranderingen. Conclusies over deze veranderingen veranderen niet door de voorgestelde correctie.

De voorgestelde datasetcorrectie verandert ook de uiteindelijke conclusies uit de ruimtelijk geïntegreerde tijdreeksen van areaalontwikkelingen niet. De correctie levert wel een verbetering op in de interpretatie van de tijdreeksen; deze biedt een verklaring voor de sprong in het gerapporteerde plaatareaal dat in de voorgaande rapportage was waargenomen tussen 2014 en 2015. De correctie suggereert dat deze verandering geen sprong tussen twee opnamen betrof, maar een meer geleidelijke ontwikkeling betrof.

Het gerapporteerde plaatareaal voor de Zoutkamperlaag is constanter dan voor het Pinkegat. In het Pinkegat suggereert de meetreeks een lichte afname van plaatareaal. De deelgebiedsanalyse toont aan dat dit met name wordt veroorzaakt door het signaal van de Engelsmanplaat en de platen bij Ternaard. Het signaal is klein ten opzichte van een onzekerheidsmarge van 3 cm. Een analyse van de standaardafwijkingen van histogrammen van hoogteverschillen op harde topografie en sedimentgrids toont aan dat circa 3cm onzekerheidsmarge na de correctie nog aanwezig is.

De deelgebiedsanalyse heeft verder aangetoond dat verandering in plaatareaal in actieve (deel)gebieden wel degelijk kan worden gemonitord met LiDAR. Hieruit kunnen we concluderen dat de eventuele trend op kombergingsniveau zo klein is dat het totale plaatareaal zich niet buiten de onzekerheidsband ontwikkelt. Er vindt geen significante aangroei van totaal plaatareaal plaats, en ook geen significante afname.



## 4 Analyse Hypsometrie

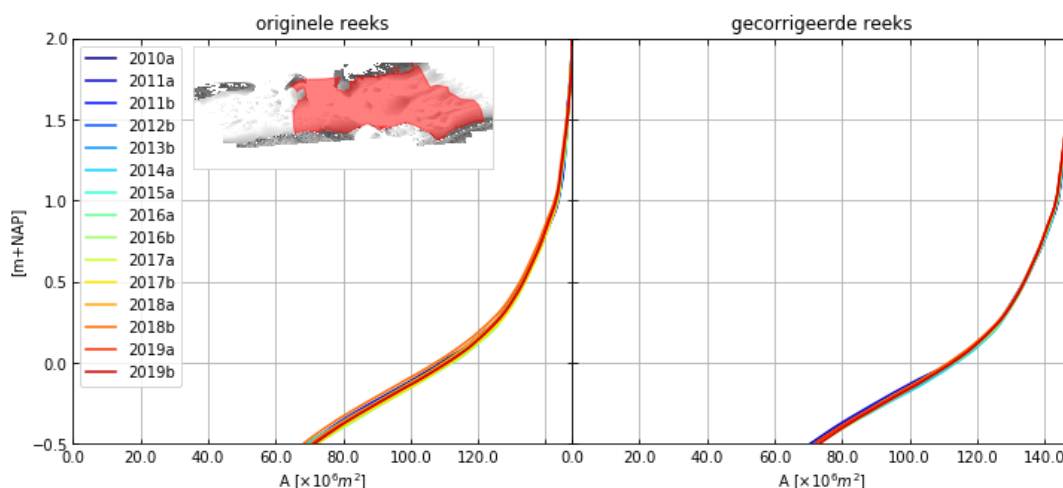
Hypsometrische curven geven de cumulatieve areaalverdeling in relatie tot de hoogte (dat wil zeggen, het verdeelt de totale oppervlakte van een doorsnede in een water- en een grondoppervlakte. Ze geven het totale plaatje over sedimentverdeling over de verticaal, en zijn dus veelzeggender dan tijdreeksen op NAP-0.5m alleen.

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. Daarnaast worden zowel de hypsometrische curven mét als zonder correctie gerapporteerd, waardoor we de invloed van de correctie op de interpretatie kunnen onderzoeken.

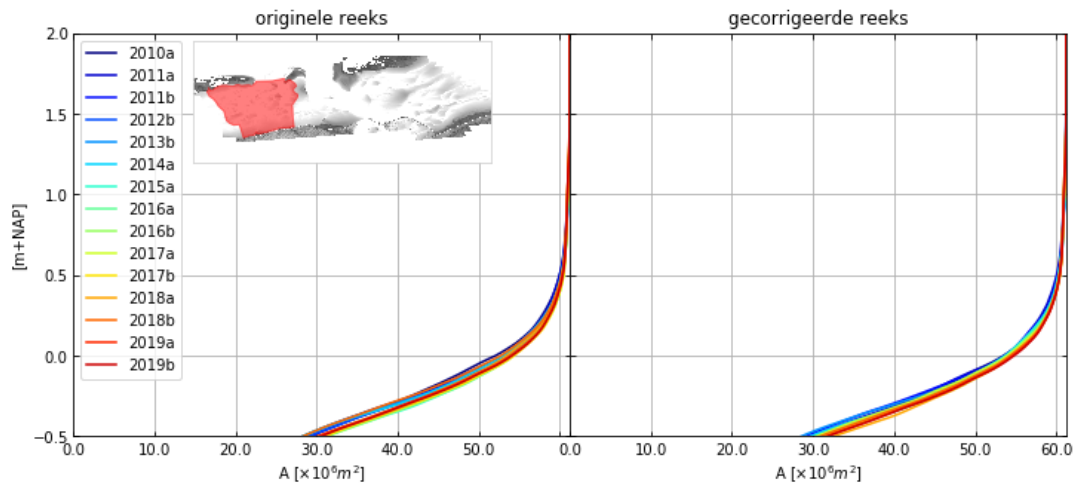
### 4.1 Kombergingsgebieden

De platen in de Zoutkamperlaag liggen gemiddeld genomen hoger dan in het Pinkegat. Ongeveer de helft van het areaal ligt boven NAP+0m, de andere helft ligt onder NAP+0m in de Zoutkamperlaag. In het Pinkegat is de verhouding meer 1/3 boven NAP+0m, en 2/3 daaronder. Uit de curven van de originele dataset is het verloop door de monitoringsjaren niet duidelijk te onderscheiden. De kleuren lopen door elkaar heen en communiceren enkel een soort bandbreedte. De correctie van NAM leidt ertoe dat de hypsometrische curven van de Zoutkamperlaag duidelijker op elkaar liggen. De bandbreedte in het interval NAP-0.25 tot NAP+1m is gereduceerd. De gecorrigeerde data geven dus een consistent beeld van een vrij constant plaatareaal.

De originele dataset levert ook voor het Pinkegat geen duidelijk beeld over de variatie van de hypsometrische curves door de tijd heen. De voorgestelde correctie schoont het beeld van het Pinkegat op.. De correctie suggereert dat de hoogteligging van de platen door het gehele gebied gemiddeld genomen licht is afgenomen (blauwe curves voor de eerdere opnamen liggen hoger dan de oranje/rode curves voor de meest recente jaren). Dit kleurverloop is niet strikt monotoon; afhankelijk van de referentiehoogte waarnaar men kijkt komt een wisselende opname naar voren als grootste of kleinst berekende plaatareaal.



Figuur 4.1 hypsometrische curven voor de Zoutkamperlaag. Een vergelijking wordt gemaakt van de originele data (links) en de gecorrigeerde data (rechts).



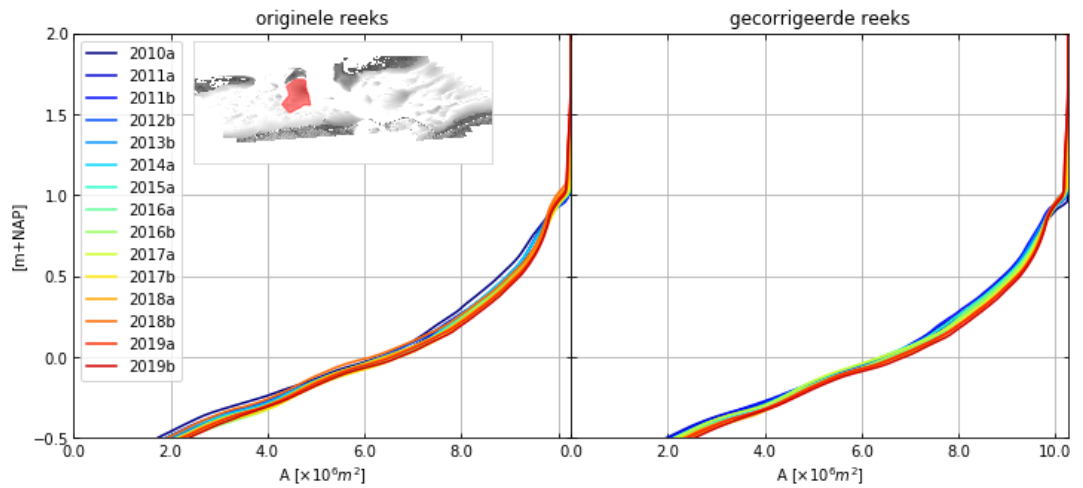
Figuur 4.2 hypsometrische curven voor het Pinkegat. Een vergelijking wordt gemaakt van de originele data (links) en de gecorrigeerde data (rechts).

## 4.2 Platen in het Pinkegat

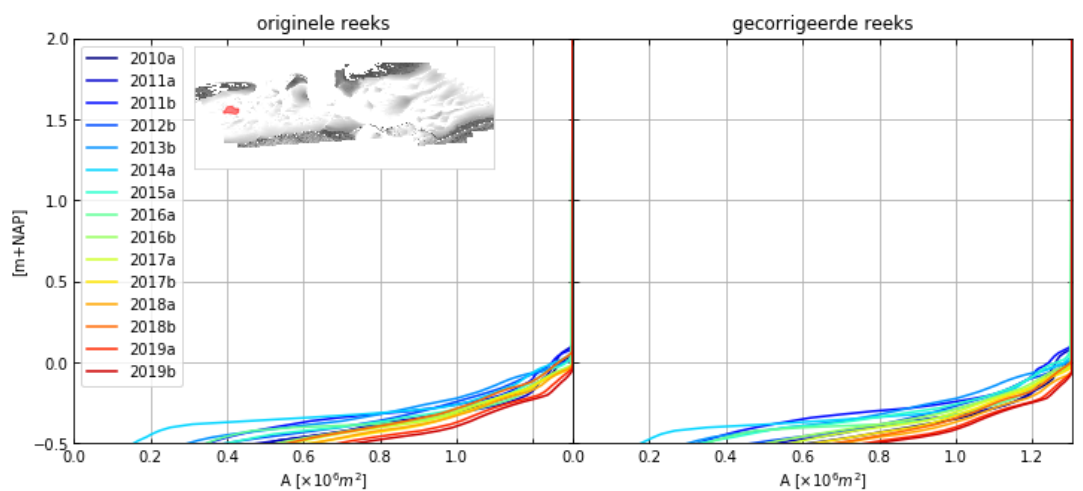
Een aantal platen in het Pinkegat lichten we uit om tot een beter begrip van het geaggregeerde beeld van het Pinkegat te komen. Dit zijn dezelfde deelgebieden als besproken in Paragraaf 3.1. Voor de Engelsmanplaat (Figuur 4.3) laat de hypsometrie op basis van de gecorrigeerde dataset zien dat de mate van sedimentatie varieert door de verticaal. Op en net onder NAP+0m liggen de curves dicht op elkaar en over elkaar heen. Hoger en lager dan NAP+0m is er meer differentiatie in de curves van de opeenvolgende jaren, en lijkt de algemene trend te zijn dat de platen iets lager worden in de tijd.

Twee platen tegen het wantij aan, Figuur 4.4 en Figuur 4.5 liggen voornamelijk onder NAP+0m. Het intrinsieke signaal van plaatveranderingen bij deze platen is veel groter dan voor de Engelsmanplaat en het gehele kombergingsgebied. Hierdoor heeft de datacorrectie minder invloed op de interpretatie van de curves. Het areaal van deze platen schommelt over het hele bereik. Voor de noordelijke van deze platen fluctueert het areaal behoorlijk, maar neemt in de laatste jaren toch duidelijk af. De zuidelijke plaat is in de monitoringsperiode enorm gegroeid: een hoogtetoename van 30-40 cm heeft ervoor gezorgd dat deze plaat bijna tweemaal zo groot is geworden.

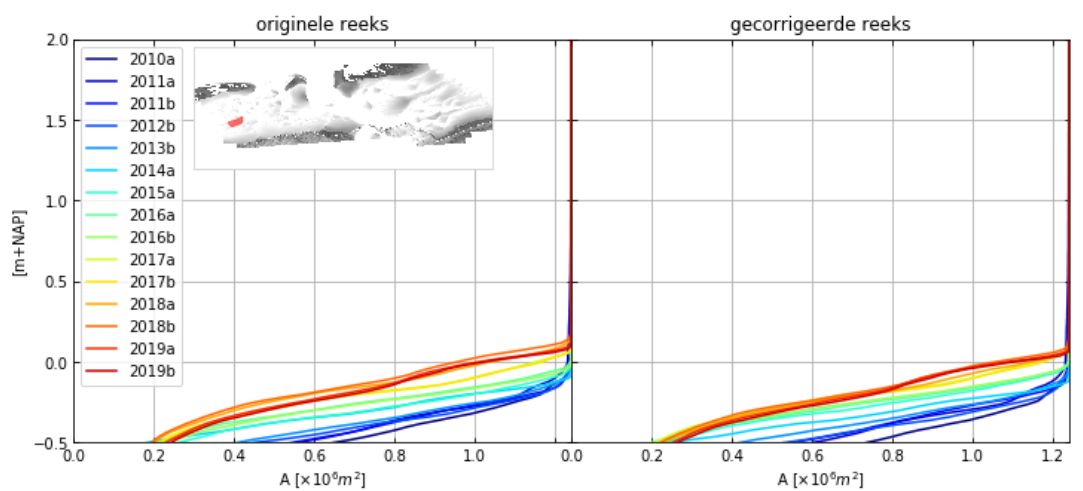
Voor een controlegebied bij Ternaard heeft de datacorrectie geen grote invloed op de interpretatie van de curves. De kleuren leveren een bandbreedte van de curves op, maar zeker in de tweede helft van de meetreeks lijkt de plaathoogte vrij constant.



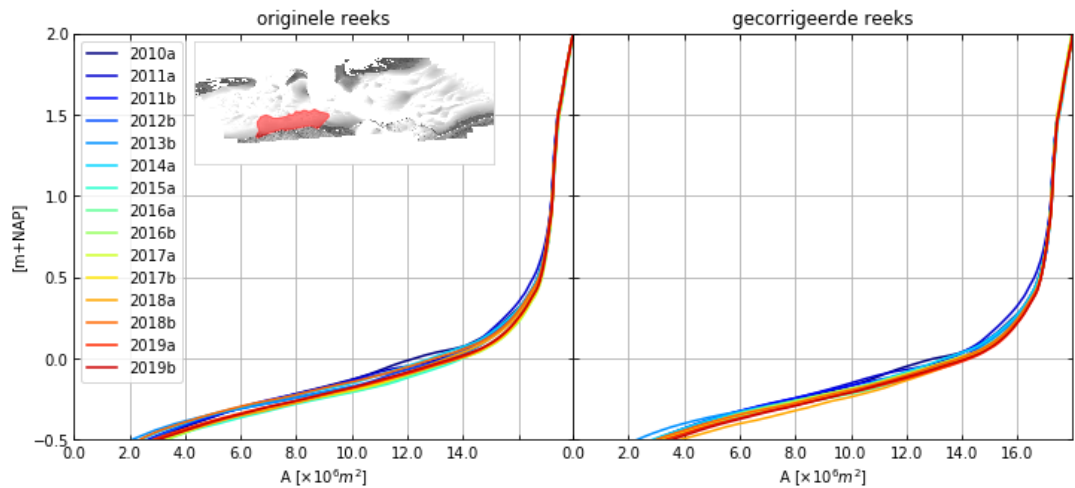
Figuur 4.3 Hypsometrische curve van de Engelsmanplaat.. Op basis van originele data (links) en gecorrigeerde data (rechts).



Figuur 4.4 Hypsometrische curve van een sterk veranderlijke plaat binnen het Pinkegat. Op basis van originele data (links) en gecorrigeerde data (rechts).



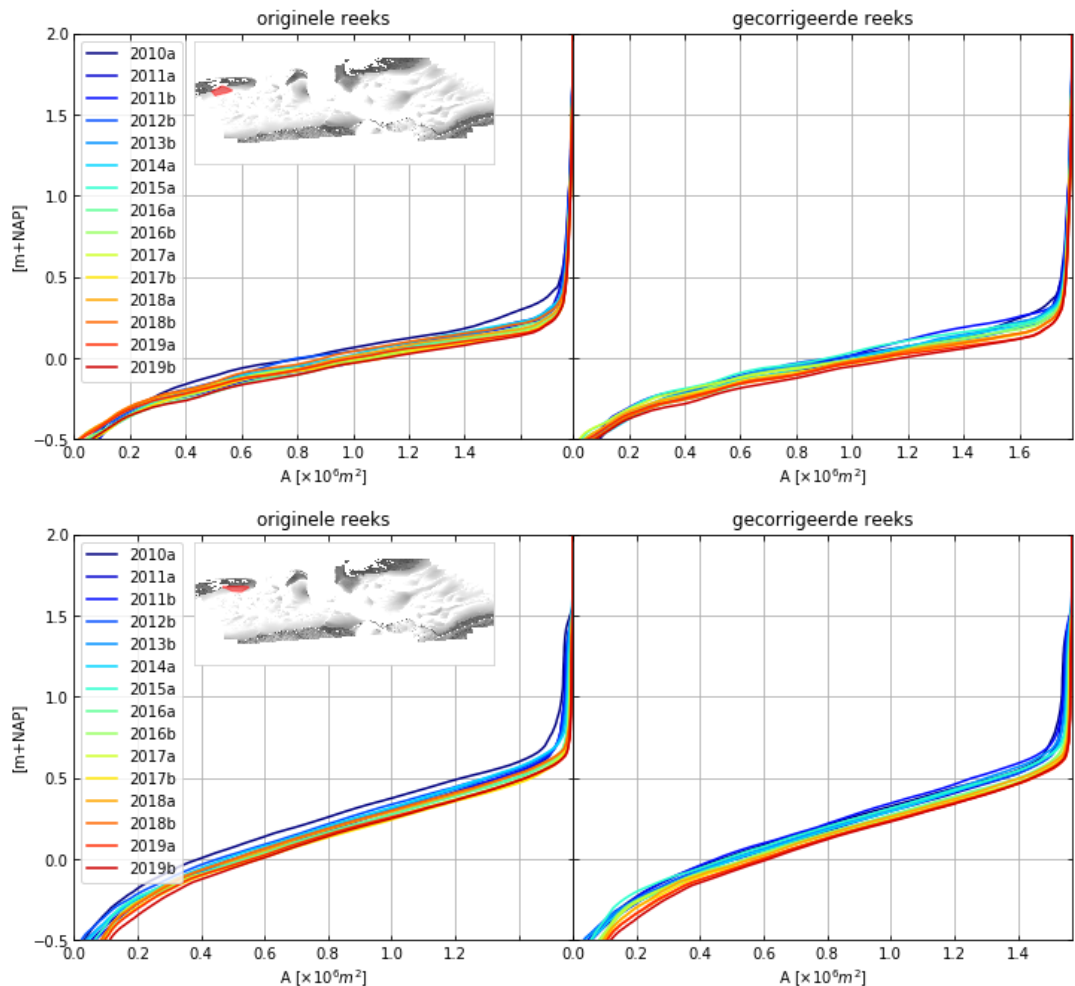
Figuur 4.5 Hypsometrische curve van een sterk aangroeiende plaat binnen het Pinkegat. Op basis van originele data (links) en gecorrigeerde data (rechts).



Figuur 4.6 Hypsometrische curve platen bij Ternaard. Op basis van originele data (links) en gecorrigeerde data (rechts).

### 4.3 Wad ten zuiden van Ameland

In Paragraaf 3.1 relateerden we de ontwikkeling van het areaal op NAP-0.5m aan de resultaten van de spijkermetingen. Om te controleren of de conclusies van de spijkermetingen ook aansluiten bij andere referentiehoogten, zijn in Figuur 4.7 de curven voor dezelfde controlegebieden geplott. Uit de areaalontwikkeling op NAM-0.5m leidden we af dat de bodemdaling wel effect had op de areaalontwikkeling van het oostelijke controlegebied B, maar dat de areaalontwikkeling van controlegebied A constant bleef. De hypsometrische curven laten zien dat deze conclusie eigenlijk alleen maar stand houdt voor de referentiehoogte NAP-0.5m. Voor elke ander te kiezen referentiehoogte is ook in gebied A de plaatareaal vrij monotoon afgenomen. Hoger in de verticaal betekent bij deze platen ook dichterbij de kwelder gelegen en daarmee ook dichterbij het midden van de bodemdalingskom. Het verdient de aanbeveling om de schijnbare inconsistentie tussen spijkermetingen en de hypsometrie van gebied A gebaseerd op de gecorrigeerde meetreeks verder uit te zoeken. Visueel maakt de correctie het signaal van de deelgebieden consistent. In de originele datasets zijn conclusies niet zo duidelijk te trekken.

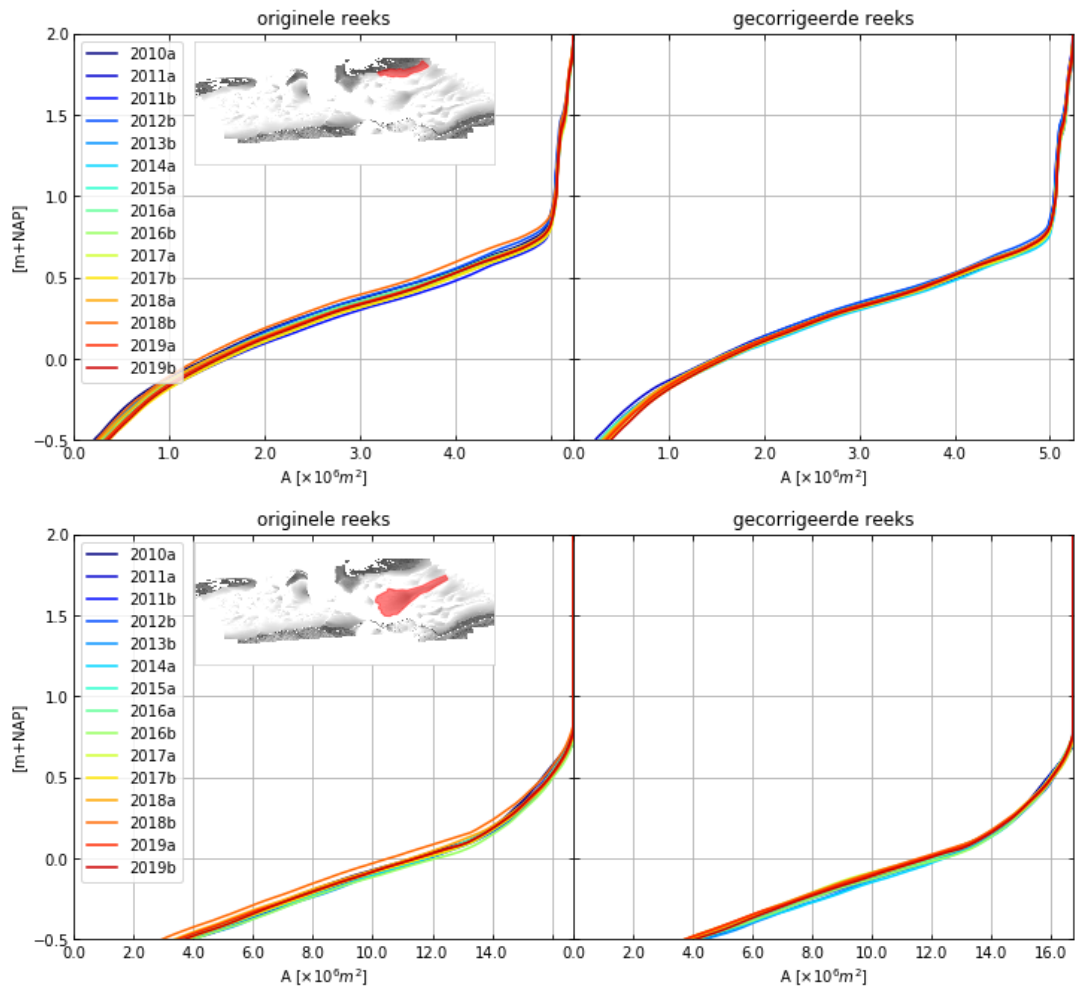


Figuur 4.7 Vergelijking van hypsometrische curve voor westelijk deel van de plaat onder de Hon (gebied A, boven) en oostelijke plaat (gebied B, onder). Op basis van originele data (links) en gecorrigeerde data (rechts).

#### 4.4 Platen in het Zoutkamperlaag

Voor de volledigheid beschouwen we hier ook een paar platen binnen de Zoutkamperlaag, zie Figuur 4.8. De correctie van de datareeks leidt er voor de platen onder Schiermonnikoog toe dat de bandbreedte rond de curve afneemt. Het aandeel van de platen boven NAP+0m toont ook met correctie geen trend. Voor het aandeel van de platen dat onder NAP+0m ligt wordt een afname van de hoogte duidelijk door de meetreeks heen.

Voor het Brakzand neemt de bandbreedte rond de hypsometrische curven ook af door de voorgestelde correctie. De trend van lichtelijke plaatverhoging over de gehele verticaal blijft onveranderd door toepassing van de correctie.



Figuur 4.8 Hypsometrische curven voor platen in de Zoutkamperlaag. Plaat onder Schiermonnikoog (boven) en voor het Brakzand (onder). Op basis van originele data (links) en gecorrigeerde data (rechts).

## 4.5 Conclusies

Uit de hypsometrische curven komt de invloed van de voorgestelde correctie duidelijker naar voren dan uit de tijdreeksen van areaalontwikkeling. De interpretatie van de curven wordt door de voorgestelde correctie eenduidiger, en is daarom een verbetering van de methode. De hypsometrische curven ondersteunen de conclusies die kunnen worden getrokken uit de analyse van areaalontwikkeling op NAP-0.5m. Dat wil zeggen dat het plaatareaal in de Zoutkamperlaag op geaggregeerde schaal constant blijft, en ook dat ontwikkeling van deelgebieden niet sterk varieert. Het plaatareaal in het Pinkegat lijkt licht af te nemen. Op kombergingsniveau is deze afname niet groter dan de meetonzekerheid. Door differentiatie van gedrag van verschillende deelgebieden en platen binnen het Pinkegat kunnen wel gebieden worden aangewezen waar een afname van plaatareaal plaatsvindt. Deze bevinden zich in gebieden waar de diepebodemdaling het sterkst is. De aanbeveling is om de vergelijking van de spijkermetingen met de gecorrigeerde meetreeks voor de platen ten zuiden van Ameland nader te onderzoeken.

## 5 Verklarende factoren

Een fysische interpretatie van de grilligheid van de gerapporteerde areaalontwikkelingen werd in Schrijvershof et al. (2018) en Van der Lugt et al. (2019) gezocht in een analyse van variabelen die een gedeelte van de variantie in het signaal kunnen verklaren. Voor indicatoren van stormachtigheid tussen twee observaties werd in Schrijvershof et al. (2018) geen verband gevonden met geconstateerde areaalverschillen. Van der Lugt et al. (2019) onderzocht een uitgebreide set aan formuleringen van indicatoren die meer of minder gevoelig zouden moeten zijn voor (extreme) windsnelheden. Zij constateerden dat voor geen enkele variant van de formulering van de indicator een duidelijk verband met gemeten areaalveranderingen af te leiden was. We denken nog altijd wel dat stormcondities het gemeten plaatareaal kunnen beïnvloeden, maar dat dit verband niet sterk genoeg is om buiten de meetonzekerheid uit te komen.

Naast indicatoren van meteocondities tussen twee metingen, is ook onderzocht of de heersende condities tijdens de inwinning het gerapporteerde areaal konden verklaren, en hieruit bleken wel sterkere verbanden naar voren te komen. Schrijvershof et al. (2018) concludeerden op basis van correlatieanalyse dat de meest verklarende indicator tijdens de metingen de laagwaterstand was. Dit verband werd door Van der Lugt et al. (2019) ook weer gevonden. Daarnaast bleek in Van der Lugt et al. (2019) ook de duur van het dalend tij te correleren aan het gerapporteerde plaatareaal. Deze correlaties waren voor beide kombergingsgebieden aanwezig maar niet significant.

In voorgaande analyse gebruikten we het plaatareaal boven NAP+0m als referentiehoogte voor de correlatie analyse. Dit jaar is besloten om zo dicht mogelijk bij het instandhoudingsdoel dat in de wet is vastgelegd: de referentie hoogte in de correlatie analyse wordt dus NAP-0.5m.

Onderzoeksvragen voor de analyse zijn:

- Veranderen de conclusies uit 2018 en 2019 met de medeneming van de 2019 opnamen?
- Blijven de conclusies in stand wanneer we de referentiehoogte aanpassen naar NAP-0.5m voor de consistentie?
- Hoe beïnvloedt de datacorrectie de conclusies voor verklarende factoren?

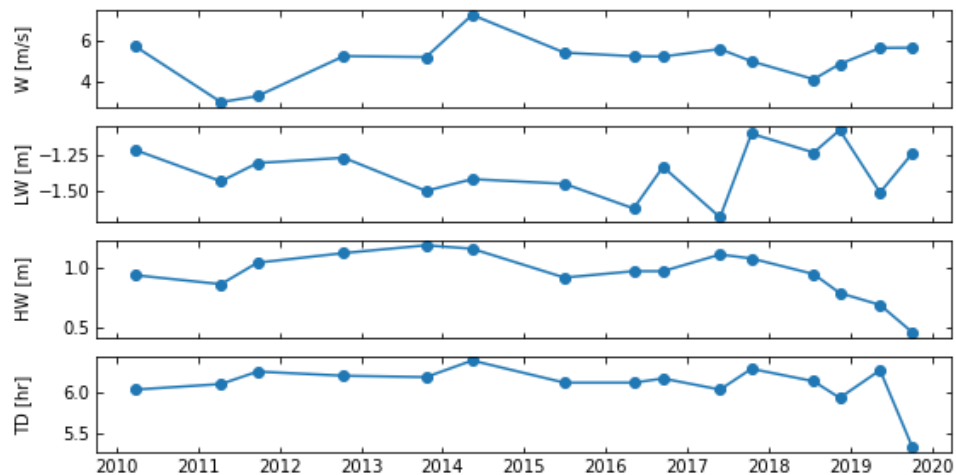
### 5.1 Invloed condities tijdens de inwinning

We onderzoeken of de correctie van de dataset de correlatieanalyse voor indicatoren voor omstandigheden tijdens de metingen beïnvloedt. Zie Tabel 5.1 voor de gehanteerde definities van de indicatoren. Indicator W voor windsnelheid is berekend uit de potentiële wind tijdreeksen van het KNMI voor het station Lauwersoog. De waterstandsindicatoren zijn berekend uit de historische waterstandsgegevens van Rijkswaterstaat, eveneens voor station Lauwersoog.

Tabel 5.1 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

De berekende tijdreeksen van indicatoren is geplott in Figuur 5.1.



Figuur 5.1 Tijdreeksen van indicatoren tijdens de metingen

Bij de interpretatie van berekende correlaties moet de lengte van de meetreeks in acht worden genomen. Met de toevoeging van de 2019 opnamen is de dataset nu 15 meetpunten lang (de najaarsopnamen van 2014 en 2015 worden niet meegenomen in de analyse, zie Van der Lugt et al. 2019). Een verband tussen een indicator en het gemeten signaal heeft een significantiegrens van ongeveer 0.5. Met andere woorden: de kans dat de correlatie tussen een indicator en het gemeten areaal voortkomt uit een signaal van volledig willekeurige trekkingen is kleiner dan 5% wanneer het verband een correlatiecoëfficiënt heeft groter dan 0.5. Dit is een iets lagere significantiegrens dan vorig jaar, maar er moeten nog een heel aantal metingen bij om ook 'zwakke' verbanden te kunnen onderscheiden: een significantiegrens van 0.2 is pas bereikt met 90 datapunten.

Voor de beantwoording van de drie gestelde onderzoeksvragen zijn in Tabel 5.2 de berekende Pearson correlatiecoëfficiënten getabuleerd voor alle combinaties van de tijdreeks 2010-2018, de tijdreeks 2010-2019, areaal boven NAP-0.5m en areaal boven NAP+0m, de originele datareeks en de datareeks met voorgestelde correctie. Op basis van deze tabel maken we de volgende observaties:

*Veranderen de conclusies uit 2018 en 2019 met de medeneming van de 2019 opnamen?*

- De conclusies uit de 2019 rapportage waren correlatie van TD voor Zoutkamperlaag meest verklarend, en LW meest verklarend voor Pinkegat. Wanneer de 2019 opnamen mee zijn genomen, is de correlatie met TD sterk afgenomen voor de Zoutkamperlaag. De correlatie met LW blijft in stand met medeneming van 2019 datapunten.
- Het meenemen van twee extra datapunten (die van 2019) leidt voor sommige indicatoren tot grote veranderingen in de berekende correlatie: zie bijvoorbeeld TD met de Zoutkamperlaag, of HW met de Zoutkamperlaag. Dit is terug te zien in zowel de gecorrigeerde als de originele dataset.

*Blijven de conclusies in stand wanneer we de referentiehoogte aanpassen naar NAP-0.5m voor de consistentie?*

- De correlaties berekend tussen indicatoren en areaal boven NAP-0.5 m en indicatoren en areaal boven NAP+0m zijn erg verschillend. De veranderingen in berekende correlatie met de twee referentiehoogten zijn veelal even groot als de geconstateerde correlaties zelf. Dit geeft niet veel vertrouwen in de voorspellende waarde van de indicatoren.
- Het argument zou aangedragen kunnen worden dat deze verschillen allemaal te wijten zijn aan achterblijvende plassen op het wad. Ter controle hierop is gekeken de correlatie van de Engelsmanplaat verandert ten gevolge van het gekozen referentieniveau. Bij de Engelsmanplaat verwachten we dat het effect van achterblijvende plassen minimaal is



omdat deze plaat tussen twee geulen ligt, ver weg van de wantijen en daarmee de afstroming dus goed is. De correlatie voor de data t/m 2018 verandert sterk door een wissel van de referentiehoogte:  $\rho(TD, A_{-0.5}) \sim 0.1$  terwijl  $\rho(TD, A_0) \sim -0.5$ . Met de data uit 2019 erbij zijn de berekende waarden van de correlatie weer anders maar wel gelijk voor beide referentiehoogten:  $\rho(TD, A_{-0.5}) \sim 0.0$  en ook  $\rho(TD, A_0) \sim 0.0$ . Ook bij de Engelsmanplaat zijn deze grote verschillen in berekende correlatie aanwezig. Daarmee zijn deze verschillen dus niet alleen aan achterblijvend water op het wad te wijten. De meetreeks is nog altijd kort en kleine variaties in signaal kunnen de correlaties dus behoorlijk beïnvloeden.

*Hoe beïnvloedt de datacorrectie de conclusies voor verklarende factoren?*

- De correctie van de data laat over het algemeen het teken van het verband in tact (correlaties die flink positief waren met de originele data zijn over het algemeen ook positief in de gecorrigeerde data en vice versa). De mate van correlatie verandert wel sterk, zie bijvoorbeeld de correlatie voor W, gemiddelde windsnelheid.
- De correctie van de data beïnvloedt de mate van correlatie van het plaatareaal met de laagwaterstand sterk. Omdat de correctie sterk is gebaseerd op droge punten (die op hard oppervlak), en maar in beperkte mate op de sedimentgridmetingen, is dit een onverwachte uitkomst.

Tabel 5.2 Pearson correlatiecoëfficiënten tussen gemeten areaal en meteo indicatoren tijdens de inwinning

Originele data		Friesche Zeegat		Pinkegat		Zoutkamperlaag	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
W	2019	0	0.04	0.15	0.12	-0.09	-0.05
	2020	-0.05	-0.05	0.07	0.04	-0.12	-0.13
HW	2019	-0.45	-0.02	-0.19	0.18	-0.53	-0.22
	2020	-0.08	0.3	0.13	0.36	-0.2	0.2
LW	2019	0.46	0.16	0.38	0.15	0.45	0.15
	2020	0.44	0.12	0.34	0.13	0.44	0.11
TD	2019	-0.47	-0.02	-0.27	0.02	-0.52	-0.06
	2020	-0.11	0.25	0.07	0.22	-0.2	0.25
Gecorrigeerde data		Friesche Zeegat		Pinkegat		Zoutkamperlaag	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
W	2019	-0.38	-0.24	0	0.04	-0.41	-0.58
	2020	-0.42	-0.3	-0.13	-0.06	-0.4	-0.56
HW	2019	-0.5	0.21	0.09	0.41	-0.58	-0.18
	2020	0.05	0.48	0.54	0.57	-0.29	0.18
LW	2019	0.07	-0.36	-0.13	-0.31	0.14	-0.28
	2020	0.03	-0.34	-0.1	-0.26	0.1	-0.34
TD	2019	-0.74	0.13	-0.01	0.25	-0.79	-0.09
	2020	-0.01	0.41	0.35	0.35	-0.25	0.36

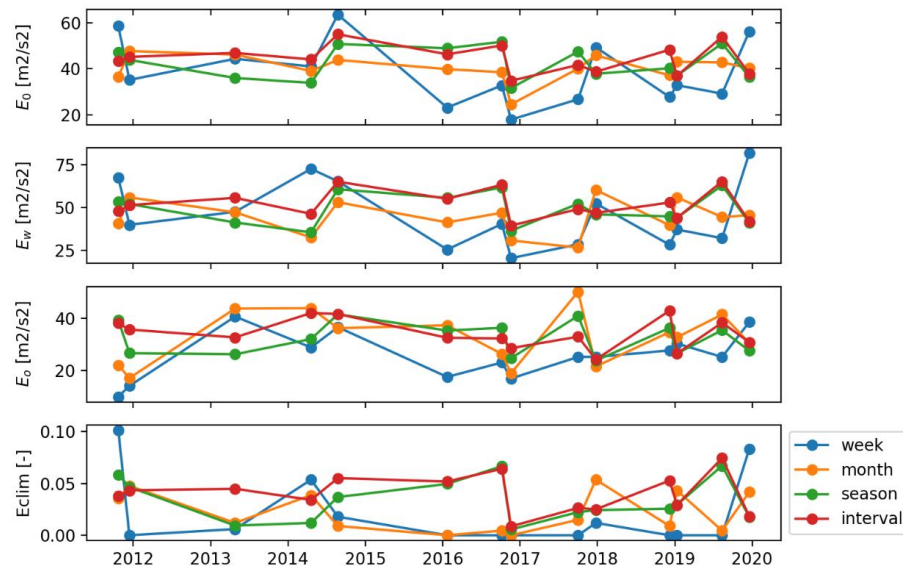
## 5.2 Invloed stormachtigheid tussen twee opnamen

We onderzoeken of de correctie van de dataset invloed heeft op de correlatieanalyse van gemeten areaalveranderingen met indicatoren voor stormachtigheid tussen twee opnamen. Tabel 5.3 geeft een overzicht van de definities van indicatoren. We stellen de indicatoren op over de hele periode tussen twee metingen, welke varieert tussen 5 maanden en een jaar, en ook over de

laatste 7, 28 en 112 dagen van het interval. Dit omdat we verwachten dat stormcondities in het einde van het interval meer invloed zullen hebben op de areaalveranderingen dan in de eerste dagen. Deze referentieperioden noemen we 'interval': hele periode tussen twee opeenvolgende metingen, 'seizoen': laatste 112 dagen van het interval, 'maand': laatste 28 dagen van het interval en 'week': laatste 7 dagen van het interval. Tijdreeksen voor elk van deze referentieperioden zijn geplott in Figuur 5.2. Indicator E1, E2, E0 en Eclim voor windsnelheid is berekend uit de potentiële wind tijdreeksen van het KNMI voor het station Lauwersoog.

Tabel 5.3 Indicatoren gedefinieerd ter verklaring van areaalveranderingen op basis van stormachtigheid tussen twee metingen.

Parameter	Definitie
<b>E1</b>	Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid binnen het gedefinieerde tijdsinterval [ $m^2/s^2$ ]
<b>Ew</b>	Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid van de westelijk georiënteerde wind binnen het gedefinieerde tijdsinterval [ $m^2/s^2$ ]
<b>Eo</b>	Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid van de oostelijk georiënteerde wind binnen het gedefinieerde tijdsinterval [ $m^2/s^2$ ]
<b>Eclim</b>	ratio van de tijd dat de referentiewindsnelheid voor 95% kwantiel is overschreden binnen het gedefinieerde tijdsinterval, gebaseerd op windklimaat 2010-2018 [-]



Figuur 5.2 Tijdreeksen van indicatoren tussen twee opeenvolgende metingen. Kleuren representeren tijdreeksen berekend over verschillende referentieperioden.

Met de toevoeging van de 2019 opnamen is de dataset van areaalveranderingen nu 14 meetpunten lang. Een verband tussen een indicator en het gemeten signaal heeft een significantiegrens van ongeveer 0.55. Met andere woorden: de kans dat de correlatie tussen een indicator en het gemeten areaal voortkomt uit een signaal van volledig willekeurige trekkingen is kleiner dan 5% wanneer het verband een correlatiecoëfficiënt heeft groter dan 0.55.

Voor de beantwoording van de drie gestelde onderzoeksvragen zijn voor alle referentieperioden de Pearson correlatiecoëfficiënten berekend voor alle combinaties van de tijdreeks 2010-2018, de tijdreeks 2010-2019, areaalverandering boven NAP-0.5m en areaalverandering boven NAP+0m, de originele datareeks en de datareeks met voorgestelde correctie. Deze resultaten zijn samengevat in Tabel 5.4, (interval), Tabel 5.5 (seizoen), Tabel 5.6 (maand) en Tabel 5.7 (week). Op basis van deze tabellen maken we de volgende observaties:

*Veranderen de conclusies uit 2018 en 2019 met de medeneming van de 2019 opnamen?*

- In de analyse van de ongecorrigeerde dataset verdubbelen of halveren de correlatiecoëfficiënten voor de meeste indicatoren op basis van de nieuwe twee meetpunten. In de gecorrigeerde dataset is de verandering veel kleiner, typische veranderingen zijn zo'n 10%.
- In Van der Lugt et al. (2019) werd geconcludeerd dat indicatoren berekend over een referentieperiode van een week tot een maand tot grotere correlaties met areaalveranderingen. Op basis van de ongecorrigeerde dataset blijft deze conclusie staan bij medeneming van 2019 opnamen.

*Blijven de conclusies in stand wanneer we de referentiehoogte aanpassen naar NAP-0.5m voor de consistentie?*

- De correlaties berekend bij referentiehoogte NAP+0m zijn sterker dan de correlaties berekend bij NAP-0.5m. Zowel op basis van de originele als de gecorrigeerde meetreeks is het teken van het verband consistent tussen de twee referentiehoogten. Bij NAP+0m is het geconstateerde verband sterker dan bij NAP-0.5m voor de referentieperioden maand, week en interval. Deze conclusie geldt niet voor de referentieperiode van een week.

*Hoe beïnvloedt de datacorrectie de conclusies voor verklarende factoren?*

- Correlaties berekend op basis van de gecorrigeerde meetreeks zijn volledig anders dan op basis van de originele meetreeks. Voor langere referentieperioden (van een seizoen of het hele interval) komen de correlaties boven de significantiegrens uit. Dit is in lijn met de hypothese voorgesteld in Van der Lugt et al. (2018): de systematische hoogteverschillen die aanwezig zijn in de originele meetreeks hebben een sterkere invloed op de data dan de stormachtigheid. Omdat we deze verbanden nu wel terugvinden in de gecorrigeerde meetreeks, werkt de correctie dus goed.
- In 2018 werd geconcludeerd dat indicatoren berekend over een referentieperiode van een week tot een maand sterker correleren met gemeten areaalveranderingen dan met een referentieperiode van een seizoen tot het gehele interval. Op basis van de gecorrigeerde data draait deze conclusie geheel om: correlaties voor het Pinkegat met E1, Ew en Eclim zijn significant op referentiehoogte NAP+0m voor het gehele interval tussen opnamen. Correlaties voor de Zoutkamperlaag met E1, Eo en Eclim zijn significant op referentiehoogte NAP+0m voor een referentieperiode van een seizoen. Voor de referentieperioden maand en week zijn er voor enkele indicatoren sterke correlaties berekend, maar dit lijken uitschieters. Voor de langere referentieperioden is het verband terug te vinden in alle varianten van de indicatoren, E1, Eclim en een richtingscomponent Eo of Ew.

Tabel 5.4 Pearson correlatiecoëfficiënten tussen gemeten areaalverandering en wind condities gebaseerd op het hele interval tussen opeenvolgende metingen

Originele data		Pinkegat		Zoutkamperlaag	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
E1	2019	-0.13	0.14	0.26	0.21
	2020	-0.26	-0.05	0.01	-0.14
Ew	2019	-0.15	0.2	0.22	0.25
	2020	-0.27	-0.01	-0.03	-0.14
Eo	2019	0.05	-0.03	0.29	0.07
	2020	-0.03	-0.1	0.16	-0.08
Eclim	2019	-0.17	0.08	0.33	0.35
	2020	-0.31	-0.14	-0.01	-0.13
Gecorrigeerde data		Pinkegat		Zoutkamperlaag	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
E1	2019	-0.58	-0.33	-0.01	-0.02
	2020	-0.55	-0.36	0.1	-0.07
Ew	2019	-0.7	-0.39	-0.04	0.13
	2020	-0.64	-0.4	0.09	0.04
Eo	2019	-0.03	-0.06	0.15	-0.23
	2020	-0.06	-0.1	0.19	-0.24
Eclim	2019	-0.56	-0.4	0.09	0.14
	2020	-0.51	-0.41	0.18	0.03

Tabel 5.5 Pearson correlatiecoëfficiënten tussen gemeten areaalverandering en wind condities gebaseerd op referentieperiode seizoen.

Originele data		Pinkegat		Zoutkamperlaag	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
E1	2019	-0.31	-0.22	0.21	0.17
	2020	-0.38	-0.31	0.01	-0.11
Ew	2019	-0.3	-0.16	0.22	0.18
	2020	-0.39	-0.29	-0.03	-0.15
Eo	2019	-0.07	-0.09	0.29	0.09
	2020	-0.1	-0.13	0.19	-0.02
Eclim	2019	-0.34	-0.45	0.25	0.1
	2020	-0.44	-0.53	-0.02	-0.22
Gecorrigeerde data		Pinkegat		Zoutkamperlaag	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
E1	2019	-0.39	-0.36	0.4	0.4
	2020	-0.4	-0.38	0.42	0.3
Ew	2019	-0.45	-0.39	0.31	0.32
	2020	-0.45	-0.41	0.33	0.2
Eo	2019	-0.2	-0.18	0.57	0.41
	2020	-0.21	-0.19	0.59	0.38
Eclim	2019	-0.2	-0.47	0.48	0.22
	2020	-0.24	-0.49	0.45	0.1

Tabel 5.6 Pearson correlatiecoëfficiënten tussen gemeten areaalverandering en wind condities gebaseerd op referentieperiode maand.

<b>Originele data</b>		<b>Pinkegat</b>		<b>Zoutkamperlaag</b>	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
<b>E1</b>	2019	0.11	0.12	0.38	0.45
	2020	0.05	0.06	0.25	0.27
<b>Ew</b>	2019	0	0.13	0.34	0.31
	2020	0	0.12	0.28	0.24
<b>Eo</b>	2019	0.26	0.34	0.1	0.26
	2020	0.13	0.21	-0.04	0.05
<b>Eclim</b>	2019	0.25	-0.3	0.39	0.15
	2020	0.29	-0.17	0.4	0.28
<b>Gecorrigeerde data</b>		<b>Pinkegat</b>		<b>Zoutkamperlaag</b>	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
<b>E1</b>	2019	-0.19	-0.32	-0.06	0.04
	2020	-0.2	-0.34	-0.06	0.01
<b>Ew</b>	2019	-0.28	-0.29	-0.19	-0.26
	2020	-0.28	-0.29	-0.19	-0.25
<b>Eo</b>	2019	0	0.15	0.14	0.54
	2020	-0.04	0.09	0.14	0.45
<b>Eclim</b>	2019	0.47	-0.32	0.18	-0.33
	2020	0.47	-0.24	0.05	-0.27

Tabel 5.7 Pearson correlatiecoëfficiënten tussen gemeten areaalverandering en wind condities gebaseerd op referentieperiode week.

<b>Originele data</b>		<b>Pinkegat</b>		<b>Zoutkamperlaag</b>	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
<b>E1</b>	2019	0.03	-0.07	0.33	-0.2
	2020	0.07	0	0.3	-0.02
<b>Ew</b>	2019	0.1	-0.27	0.34	-0.23
	2020	0.11	-0.15	0.26	0
<b>Eo</b>	2019	0.49	0.77	0.29	0.36
	2020	0.38	0.63	0.17	0.29
<b>Eclim</b>	2019	-0.11	-0.55	0.1	-0.53
	2020	-0.06	-0.38	0.07	-0.23
<b>Gecorrigeerde data</b>		<b>Pinkegat</b>		<b>Zoutkamperlaag</b>	
		> 0 m	> -0.5 m	> 0 m	> -0.5 m
<b>E1</b>	2019	-0.2	-0.42	0.3	-0.29
	2020	-0.16	-0.35	0.12	-0.27
<b>Ew</b>	2019	0.1	-0.49	0.33	-0.38
	2020	0.1	-0.38	0.06	-0.34
<b>Eo</b>	2019	-0.31	0.02	-0.26	0.07
	2020	-0.29	0	-0.38	0
<b>Eclim</b>	2019	0.3	-0.25	0.66	-0.16
	2020	0.26	-0.2	0.31	-0.18

## 5.3 Conclusies

De correctie van de meetreeks heeft een grote invloed op de conclusies die we kunnen trekken uit een analyse van verklarende factoren. Het verband van gemeten areaal met de laagwaterstand neemt af door de correctie en het verband met de hoogwaterstand neemt toe. Reden daartoe kan zijn dat de systematische hoogteverschillen die weg zijn genomen in de correctie de onderliggende oorzaak van de eerdere correlatie waren. Deze zouden dan ‘toevalligerwijs’ samen zijn gevallen met momenten dat de laagwaterstand of de duur van het dalend tij afweek. De inconsistentie van de correlatiecoëfficiënten voor heersende condities tussen de twee referentiehoogten kan op twee zaken wijzen: enerzijds is de meetreeks kort en kunnen kleine variaties in het signaal de correlaties dus beïnvloeden. Dit is ook terug te zien in de veranderlijkheid van de correlaties door toevoeging van de twee 2019 datapunten. Anderzijds denken we dat het areaal op NAP-0.5m gevoeliger is voor achterblijvende plassen op het wad dan de reeks van areaal op NAP+0m. Een nadere analyse van de Engelsmanplaat ontkracht deze uitleg.

De correctie van de meetreeks zorgt ervoor dat een verband tussen gemeten areaalveranderingen en stormachtigheid sterk naar voren komt: de correlaties voor het Pinkegat komen boven de significantiegrens uit. Deze correlaties zijn het sterkst wanneer indicatoren worden berekend over het hele interval tussen twee opnamen (Pinkegat) of de laatste 112 maanden van het interval (Zoutkamperlaag), en zijn sterker waar te nemen op NAP+0m dan op NAP-0.5m.

We bevelen aan om in volgende rapportages indicatoren voor areaalveranderingen tussen metingen te blijven monitoren en de invloed van de windrichting nader te onderzoeken.

## 6 Analyse lange-termijn trends

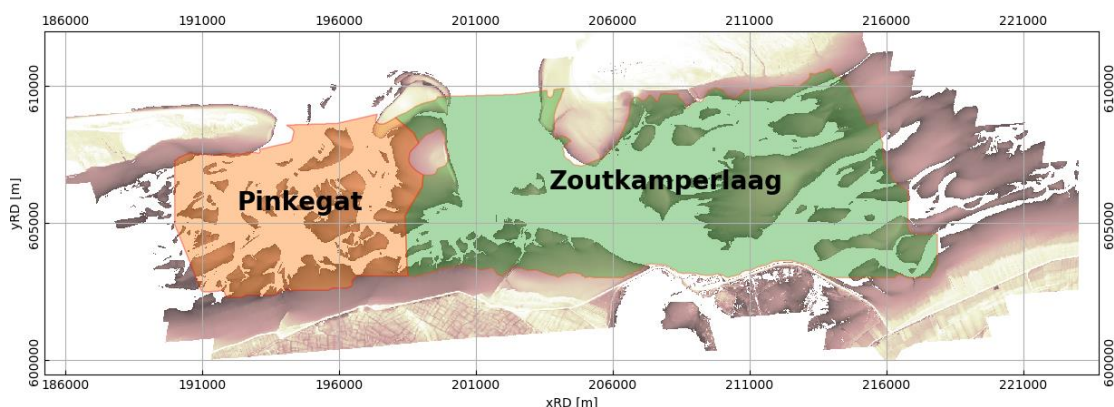
Naast de opnamen van het Friesche Zeegat die in opdracht van NAM sinds 2010 worden gemaakt, zijn er ook opnamen vanuit Rijkswaterstaat beschikbaar, de zogenoemde Vaklodingen. Hoewel de onzekerheid die gepaard gaat met Vaklodingen vele malen groter is dan met de NAM LiDAR datareeks wordt bereikt, is het waardevol om resultaten op basis van de twee datasets te vergelijken. In voorgaande rapportage werden hypsometrie en tijdreeksen voor een aantal deelgebieden besproken. Hier beperken we ons tot een vergelijking op kombergingsgebiedsschaal, omdat de conclusies met betrekking tot overeenstemming van de meetreeksen niet varieerde tussen de deelgebieden.

### 6.1 Methode

In Van der Lugt et al. (2019) is een methode voorgesteld om de twee datareeksen met elkaar te vergelijken, en deze wordt dit jaar weer gehanteerd. Deze methode wordt hier samengevat.

Afgelopen jaar bleek dat trends zoals gerapporteerd in Elias et al. (2012), Nederhoff et al. (2017), Wang et al. (2018) kunnen worden gereproduceerd, ook wanneer alleen Vaklodingen data wordt bekeken, en deze niet wordt aangevuld (zoals in de genoemde studies wel het geval was door middel van ruimtelijke interpolatie of tijdsinterpolatie tussen Vaklodingen en Jarkus). Voor de vergelijking met de NAM LiDAR dataset worden de Vaklodingen alleen geanalyseerd in het verticale interval NAP-0.5 tot NAP+2 m.

In de meeste jaren waren de Vaklodingen niet vlakdekkend richting de eiland- en vastelandsranden toe. Er is een omhullende polygoon gedefinieerd waarin in alle jaren vaklodingen data beschikbaar is, en deze omhullende is gebruikt voor de deelgebiedsdefinities van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Dit voorkomt dat er bathymetrie moet worden ge-extrapolereerd naar de domeinranden toe. De data binnen deze bijgesneden polygoonen is dan wel in alle jaren vlakdekkend.



*Figuur 6.1 De bijgesneden polygoonen voor de analyse van langetermijntrends. Bijsnijding heeft plaatsgevonden op basis van vlakdekking van de Vaklodingen reeks.*

Uit de periode 1927-1985 zijn de data gedigitaliseerd van papieren contourkaarten. Voor de opnamen na 1985 is de data digitaal beschikbaar in vergridde vorm, daarmee op hogere resolutie en is er meer informatie over de inwinning. Omdat de fluctuaties in de resultaten van voor 1985 een orde groter bleken dan uit de periode daarna, is er dit jaar voor gekozen om alleen te rapporteren over een vergelijking 1985-nu. De eerdere opnamen voegen niets toe aan de

vergelijking van de datareeksen, maar wekken wel vragen op. Voor de vaklodingen 1985 – nu kunnen we beter inschatten wat voor nauwkeurigheid we toe moeten schrijven aan de opnamen. Vaklodingen zijn een samenstelling van single-beam en multi-beam sonar en LiDAR data. Hierdoor is de inherente onzekerheid groter dan van de LiDAR data reeks. Voor de verdere analyse wordt voor vaklodingen een onzekerheid van  $\sigma = 10 \text{ cm}$  aangehouden.

Ten opzichte van beschikbare data van vorig jaar is nu de Vaklodingen van het Friesche Zeegat voor 2019 beschikbaar gekomen. In deze Vaklodingen zit de RWS LiDAR opname van het Friesche Zeegat verwerkt. De 2012 LiDAR opname van RWS zit verwerkt in de 2012 Vaklodingen.

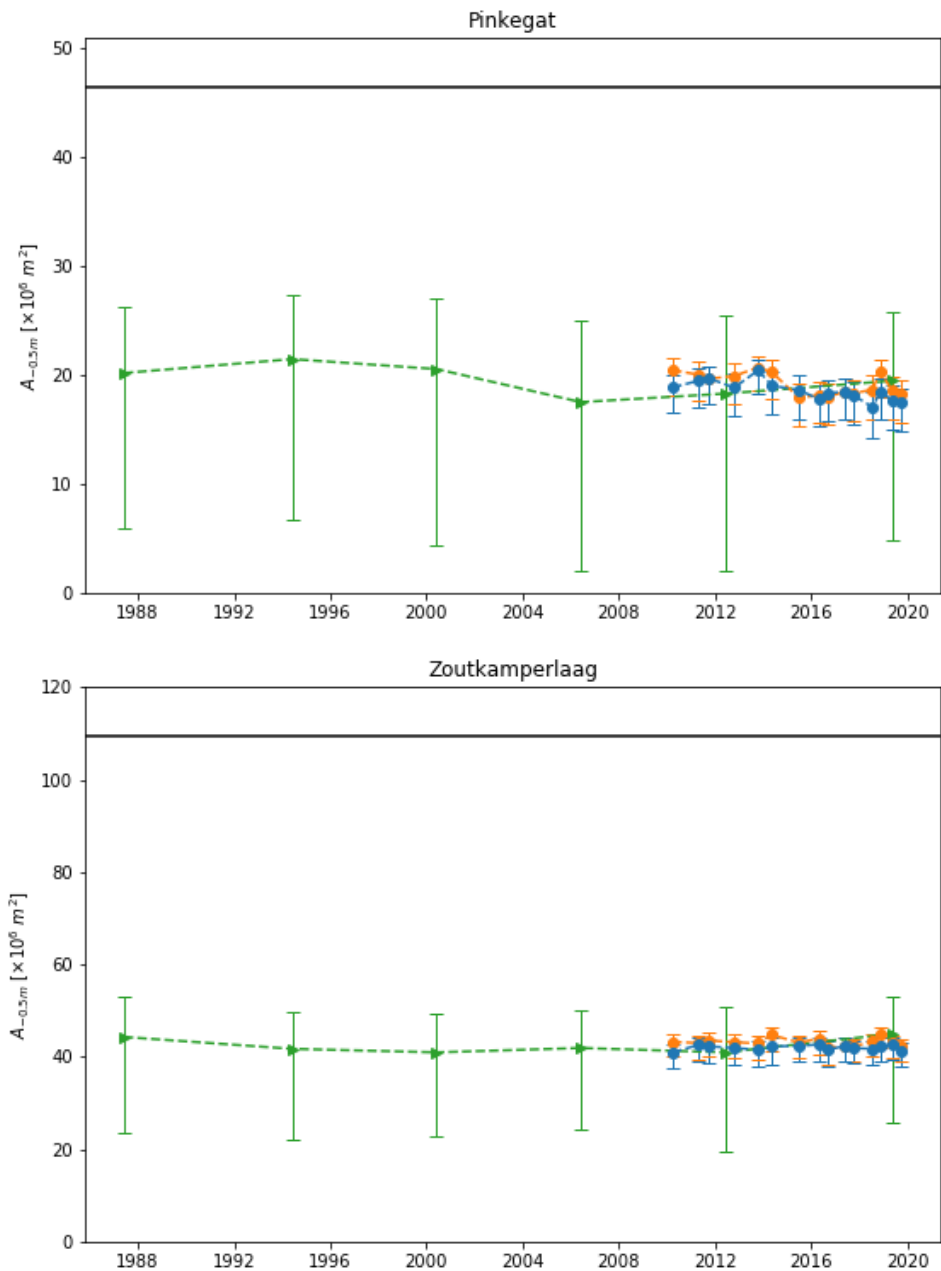
## 6.2 Aansluiting datasets

Figuur 6.2 toont de vergelijking van areaalontwikkeling op basis van de RWS Vaklodingen dataset en de NAM LiDAR data voor de periode 1987-nu. Figuur 6.3 geeft een uitsnede van deze areaalontwikkeling weer van de monitoringsperiode. Er zijn twee RWS opnamen die binnen de monitoringsperiode vallen; een opname in 2012 en een opname in 2019. De aansluiting van de 2012 opname van RWS op de NAM data was in de originele NAM dataset al behoorlijk, maar de correctie van de NAM data verbetert deze match nog verder. Dit geldt voor beide kombergingsgebieden. De vergelijking tussen 2019 areaal berekend uit Vaklodingen wijkt iets meer af van de NAM datareeks dan het 2012 areaal, voor beide kombergingsgebieden. De correctie van de NAM data vergroot de afstand tot Vaklodingen observaties iets. Deze afstand is nog altijd niet groot, want voor beide jaren en in beide kombergingsgebieden is de afstand van de RWS datapunten vergelijkbaar met de onzekerheid geassocieerd met de NAM dataset.

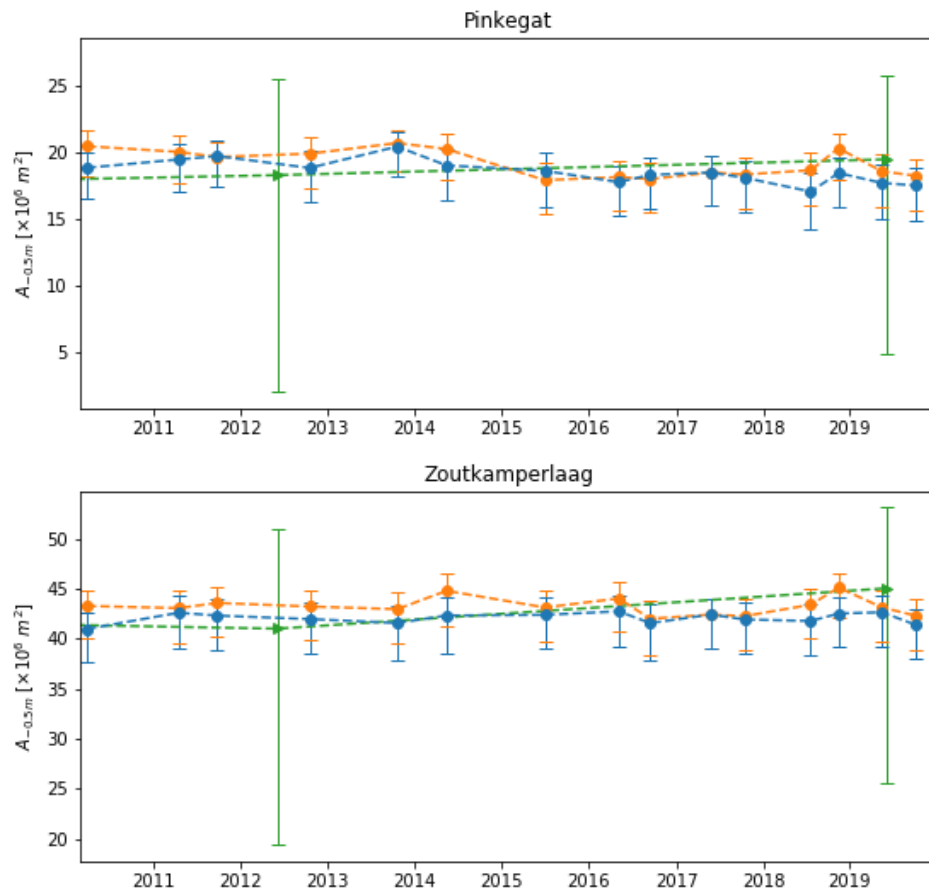
Voor de Zoutkamperlaag is in beide datasets geen ontwikkeling van plaatareaal waar te nemen. De resultaten zijn geheel in lijn met elkaar. Voor het Pinkegat spreken de Vaklodingen een mogelijke trend in de NAM opnamen tegen: het areaal op NAP-0.5m in 2019 ligt hoger dan in 2012, maar wel binnen de onzekerheidsmarges. Naast inherente verschillen in de opwerking van LiDAR beelden door verschillende meetdiensten, kan dit ook veroorzaakt zijn door een ander inwinningsmoment.

De variabiliteit in plaatareaalontwikkeling boven NAP-0.5m in het Pinkegat bleek groter te zijn dan in de Zoutkamperlaag uit de NAM data. In de RWS dataset is dit onderscheid in variabiliteit ook te maken, zij het dan op een langere termijn.





Figuur 6.2 Vergelijking van areaalontwikkeling op NAP-0.5 m tussen de Vakkodgingen (groen), de originele NAM LiDAR data (oranje), en de gecorrigeerde NAM LiDAR data (blauw) voor het Pinkegat (boven) en de Zoutkamperlaag (onder). In zwart het totale oppervlakte van de controlepolygoon..



Figuur 6.3 Uitsnede van Figuur 6.2, ingezoomd op de periode van de monitoringsperiode

### 6.3 Conclusies

Op de schaal waarop overeenstemming tussen de RWS en de NAM dataset mag worden verwacht, sluiten de datasets goed op elkaar aan. De voorgestelde correctie op de data verbetert deze aansluiting wel voor de vergelijking van observaties in 2012, maar niet voor 2019. Omdat de Vaklodingen datareeks in ruwe vorm is gebruikt en een grotere onzekerheidsmarge heeft dan de NAM dataset, zegt dit niets over de geschiktheid van de correctie van de NAM datareeks.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

## 7.1 Conclusies

De in Hoofdstuk 1 geformuleerde onderzoeksvragen kunnen als volgt beantwoord worden:

- *Hoe passen de twee opnamen uit 2019 in rest van de LiDAR meetreeks?*  
Zonder correctie vallen beide 2019 opnamen lager uit dan de najaarsopname uit 2018, zowel voor het Pinkegat als de Zoutkamperlaag. Met inachtneming van alle datapunten, blijft het plaatareaal in de Zoutkamperlaag constant, en laat het Pinkegat een lichte afname zien. Deze afname valt binnen de foutenmarge van de meetmethode.
- *Helpt een correctie van de dataset op basis van de geconstateerde systematische verschillen bij de interpretatie van de meetreeks?*  
De voorgestelde correctie beïnvloedt niet de conclusies die zijn te trekken op basis van de tijdsgemiddelde of ruimtelijk geïntegreerde beschouwingen van de meetreeks. Wel verklaart de correctie de in Van der Lugt et al. (2019) geconstateerde sprong in het gemeten plaatareaal op NAP-0.5m voor het Pinkegat tussen de opnamen van 2014 en 2015. Daarnaast is de grilligheid van het signaal afgenomen; zo is bijvoorbeeld het areaal boven NAP-0.5m van opname 2018b beter in lijn met voorgaande opnamen. Fluctuaties in het gemeten plaatareaal zijn niet verminderd door de correctie, maar wel gelijkmatiger over de tijdreeks verdeeld.

De interpretatie van de hypsometrische curven is wel eenduidiger geworden door de voorgestelde correctie. Binnen het Pinkegat zijn op basis van de gecorrigeerde meetreeks gebieden aan te wijzen waar de plaathoogte over de monitoringsperiode vrij monotoon is afgenomen, alsook één gebied met sterke plaatopbouw. Of de hoogteafname van de deelgebieden significant van invloed is op het plaatareaal van het kombergingsgebied, is door de fluctuaties in de tijdreeksanalyse (nog) niet met zekerheid te zeggen.

- *Helpt de correctie van de dataset op basis van de geconstateerde systematische verschillen de analyse van verklarende factoren voor fluctuaties in gemeten areaal?*  
Correlatieanalyse van areaal met heersende condities tijdens de inwinning mét en zonder correctie van de data leidt tot verschillende conclusies. De eerder geconstateerde verbanden met de laagwaterstand en de duur van het dalend tij zijn niet te constateren als de meetreeks wordt gecorrigeerd. Reden daartoe kan zijn dat de systematische hoogteverschillen die zijn verwijderd bij de correctie de onderliggende oorzaak van de eerdere correlatie waren.  
Correlatieanalyse van areaalverandering met windcondities tussen opeenvolgende metingen op basis van de gecorrigeerde meetreeks levert een sterk verband op: stormachtige perioden houden verband met een afname van areaal in Pinkegat en een toename van areaal in de Zoutkamperlaag. Op basis van de originele meetreeks viel dit verband weg tegen de systematische hoogteverschillen die geconstateerd waren.
- *Hoe verhoudt de NAM meetreeks zich tot de Rijkswaterstaat meetreeks, welke uitgebreid is met een 2019 opname van het Friesche Zeegat?*  
Op de schaal waarop overeenstemming tussen de RWS en de NAM dataset mag worden verwacht, sluiten de datasets goed op elkaar aan. De voorgestelde correctie op de data verbetert deze aansluiting wel voor de vergelijking van observaties in 2012, maar niet voor 2019. Uit de nabijheid van de RWS en NAM datapunten kan niet worden beoordeeld

of de voorgestelde correctie de dataset verbetert omdat de Vaklodingen datareeks een grotere onzekerheidsmarge heeft dan de NAM dataset.

## 7.2 Aanbevelingen

De correctie van de meetreeks maakt de interpretatie van de hypsometrie eenduidiger en geeft een herleidbaar verband tussen areaalveranderingen en windcondities tussen opeenvolgende metingen. Omdat daarnaast uit de NAM analyse blijkt dat de meetfouten na correctie meer normaal verdeeld zijn, is het onze aanbeveling om de datacorrectie toe te voegen aan het standaard opwerkprotocol van de LiDAR opnamen.

Omdat de correlatieanalyse van areaalveranderingen met windcondities van opeenvolgende metingen nu tot interpreteerbare resultaten leidt, bevelen we aan om deze analyse in een volgende rapportage (weer) een grotere rol te geven.

De analyse van twee deelgebieden ten zuiden van Ameland-Oost liet zien dat de hypsometrie op basis van de correctie een hoogteontwikkeling beschrijft die op de oostelijke plaat in lijn is met de spijkermetingen. Het verdient de aanbeveling om de schijnbare inconsistentie tussen spijkermetingen en de hypsometrie gebaseerd op de gecorrigeerde meetreeks van de plaat onder de Oerderduinen verder uit te zoeken.

## 8 Referenties

**Elias, E., Bruens, A.** (2013). *Beheerbibliotheek Ameland. Feiten & cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004.*

**Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F., Wang, Z.B. & De Ronde, J.** (2012). *Netherlands Journal of Geosciences (91-3), p. 293-310, Morphodynamic development and sediment budget of the Dutch Wadden Sea over the last century.*

**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.*

**Terratec** (2019a). *Project report Waddenzee – 1st acquisition for 2019.*

**Terratec** (2019b). *Project report Waddenzee – 2<sup>nd</sup> acquisition for 2019.*

**Van der Lugt, M.A., Visser, M., & Van den Boogaard, H.** (2019). *Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2018). Rapport 11203620-002-ZKS-0003*

**Wang, Z.B., Elias, E.P.L., Van der Spek, A.J.F. & Lodder, Q.J.** (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.*

## A Overzicht vluchtgegevens

Tabel A.1 Overzicht van meetdiensten, opname data en specificaties van de opnamen in de meetreeks.

LiDAR referentie	Meetdienst en referentie	Merk en type scanner	Data van opnamen	Uren van opname		Vlieglijnen	Weerscondities	Opmerkingen
				Start	Eind			
2010 (voorjaar)	Fugro Fugro Geospatial B.V. (2010)	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 Fugro Geospatial B.V. (2011)	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 Fugro Geospatial B.V. (2011a)	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 Fugro Geospatial B.V. (2012)	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 Fugro Geospatial B.V. (2013)	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 Fugro Geospatial B.V. (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 getijdenster Vlieghoogte 440 m AGL

2014 (najaar)	Fugro <i>Fugro Geospatial B.V. (2014b)</i>	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 Geospatial B.V. (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 (2016a)</i>	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 (2016b)</i>	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 (2016)</i>	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 <i>Aerodata (2017)</i>	Riegl LMS-780	27-5-2017 28-5-2017	16:27 17:39	20:02 19:58	1-21;33 1; 22-32	Onbekend	Vlieghoogte 460 m AGL
2017 (najaar)	Aerodata <i>Aerodata (2017)</i>	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
2019 (voorjaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	15-05-2019	10:30	13:08	1-23	Bevredigend	Vlieghoogte 1500 m AGL
2019 (najaar)	Terratec AS	Riegl VQ-1560i	07-10-2019	07:38	10:01	1-23	Bevredigend	Vlieghoogte 1500 m AGL

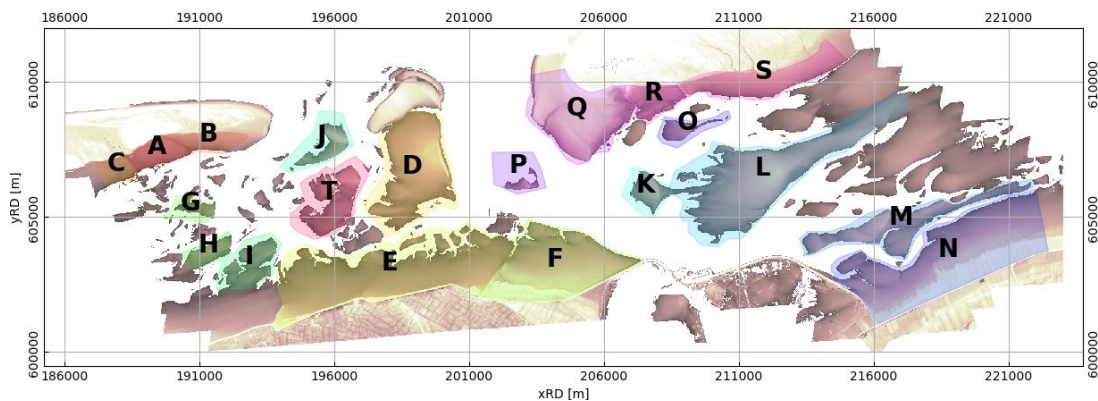
*\*Geregistreeerde eindtijd is de starttijd van de vlieglijn. Duur van een vlieglijn is gemiddeld ongeveer 20 minuten*

*\*\*Geregistreeerde 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.*

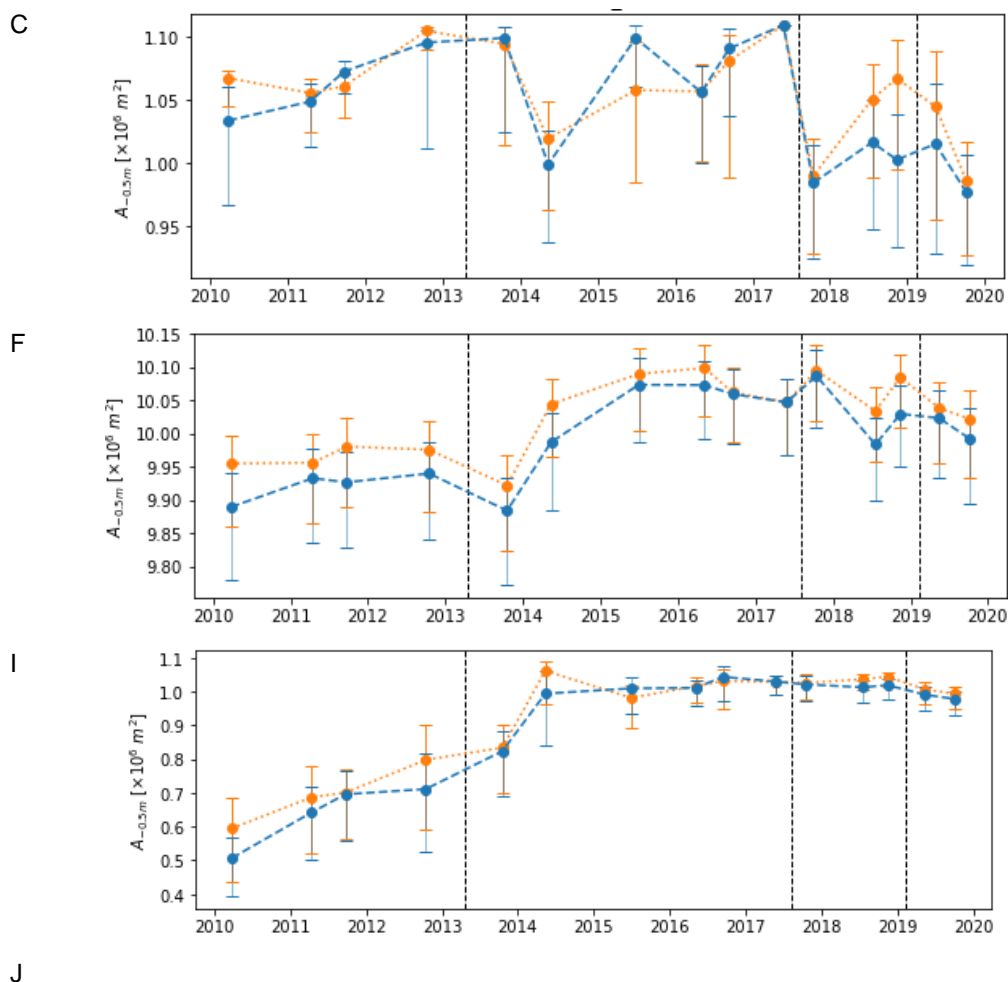


## B Analyse individuele platen

De hoofdtekst beschrijft een tijdreeksanalyse en analyse van hypsometrie voor de belangrijkste deelgebieden van het Friesche Zeegat. In deze Appendix zijn de resterende tijdreeksen en hypsometrische curven opgenomen ter referentie.

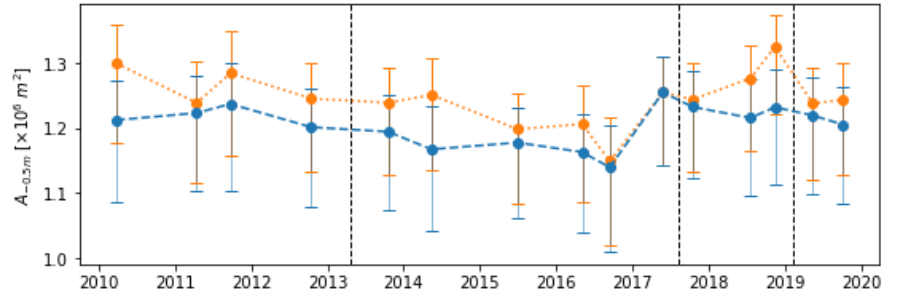


Figuur B.1 Overzicht van (delen van) platen die individueel zijn bestudeerd.

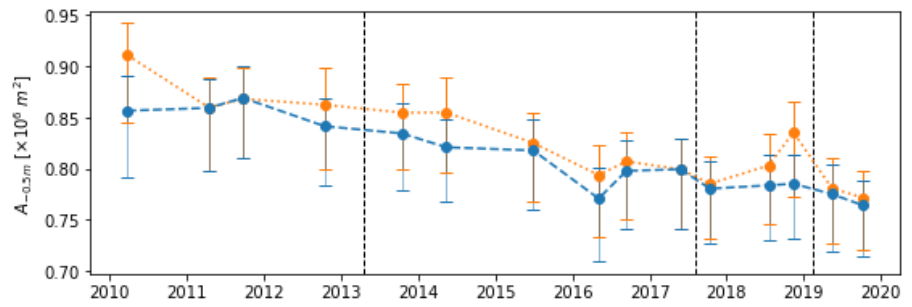




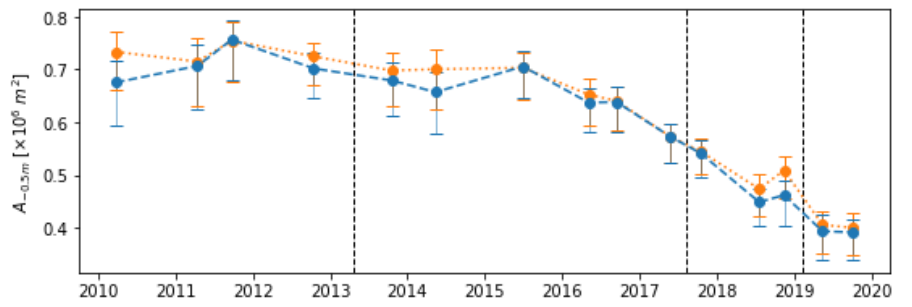
K



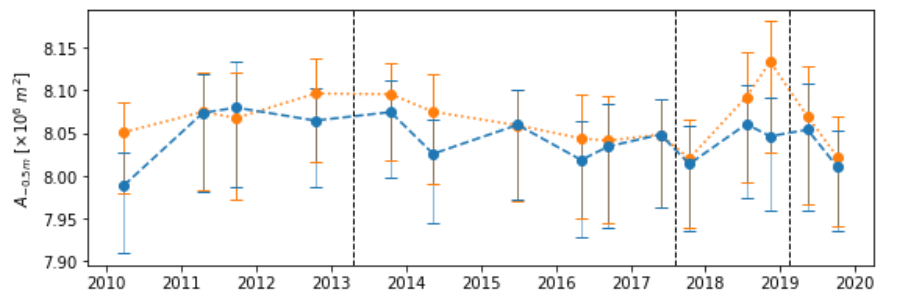
O

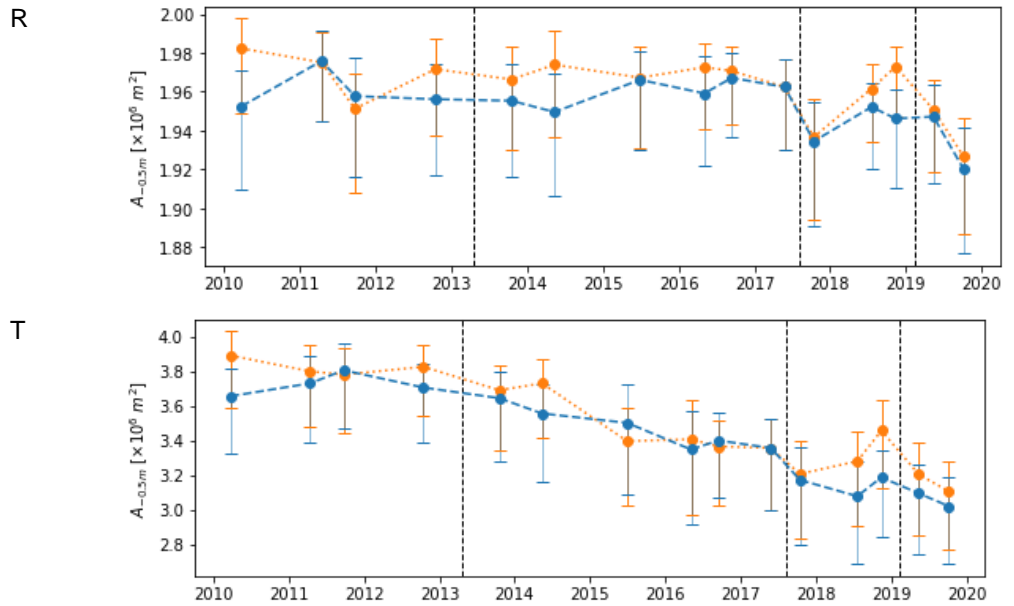


P

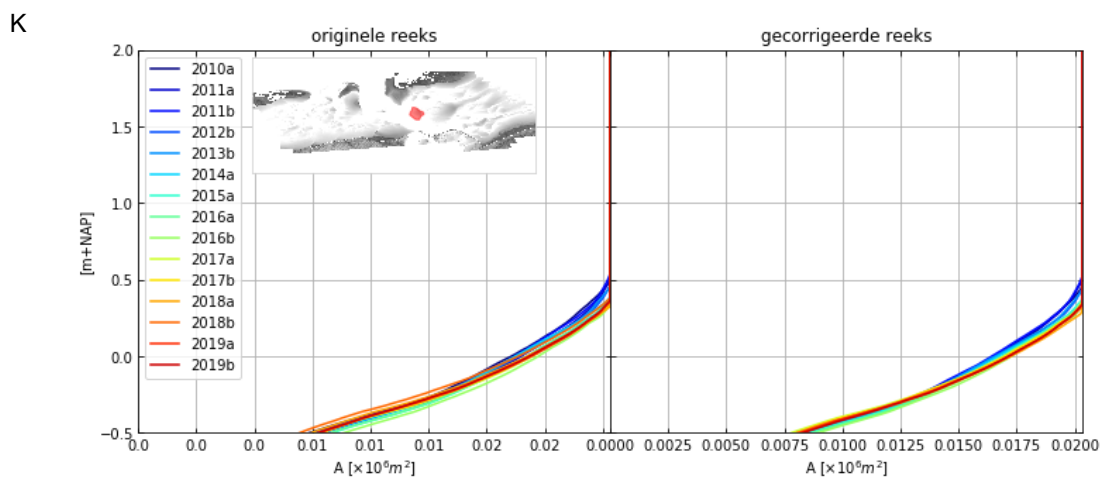
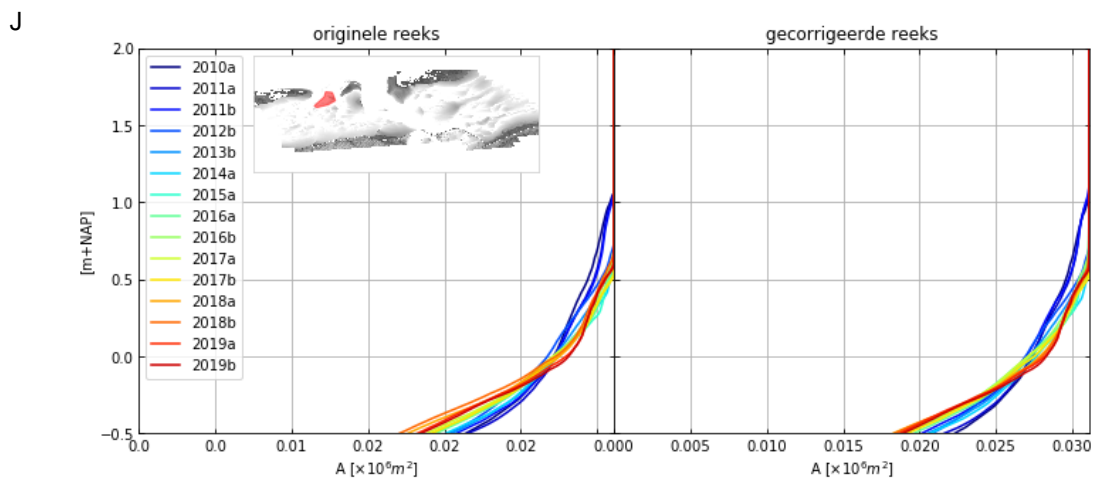


Q

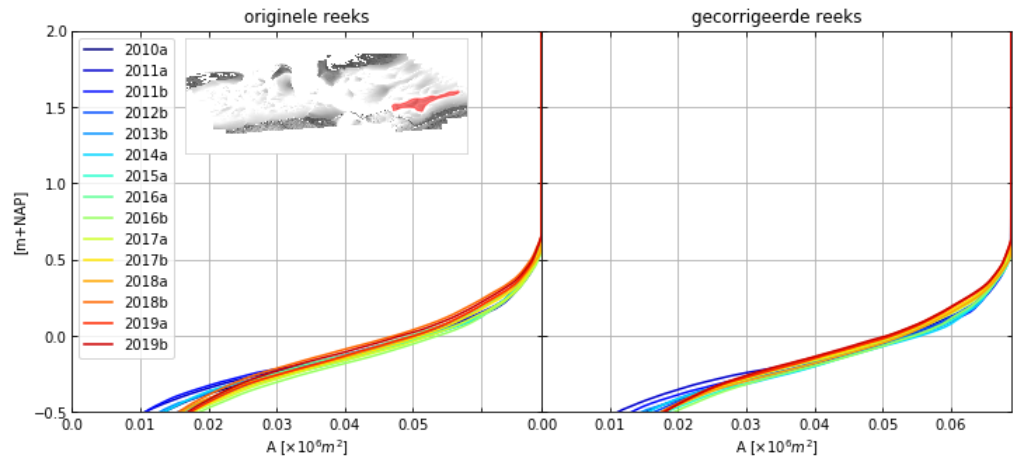




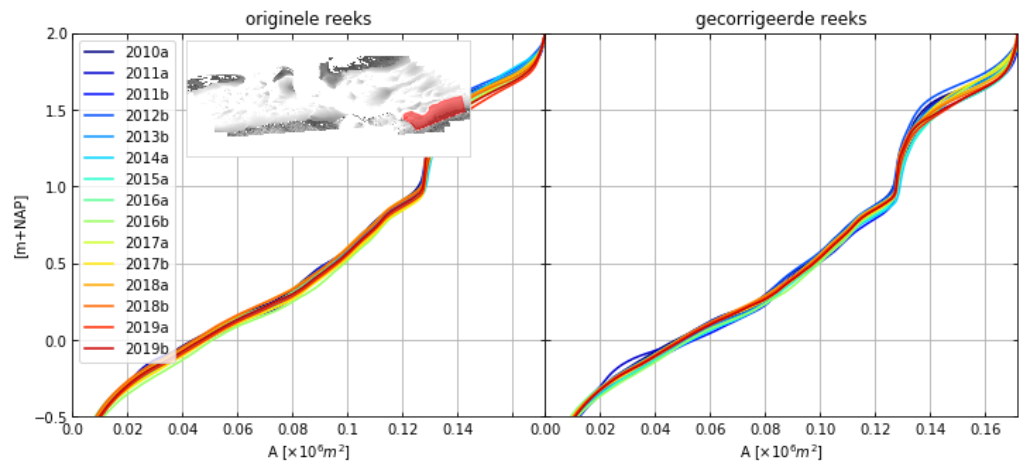
Figuur B.2 Tijdreeksen van plaatareaal boven NAP-0.5m voor platen die in de hoofdttekst niet besproken zijn. Voor locatie van de platen zie Figuur B.1 . De onzekerheidsbanden tonen effect van onzekerheidsmarge van 3 cm. De oranje punten, lijn en onzekerheidsbanden tonen de originele dataset, de blauwe punten, lijn en onzekerheidsbanden de gecorrigeerde dataset.



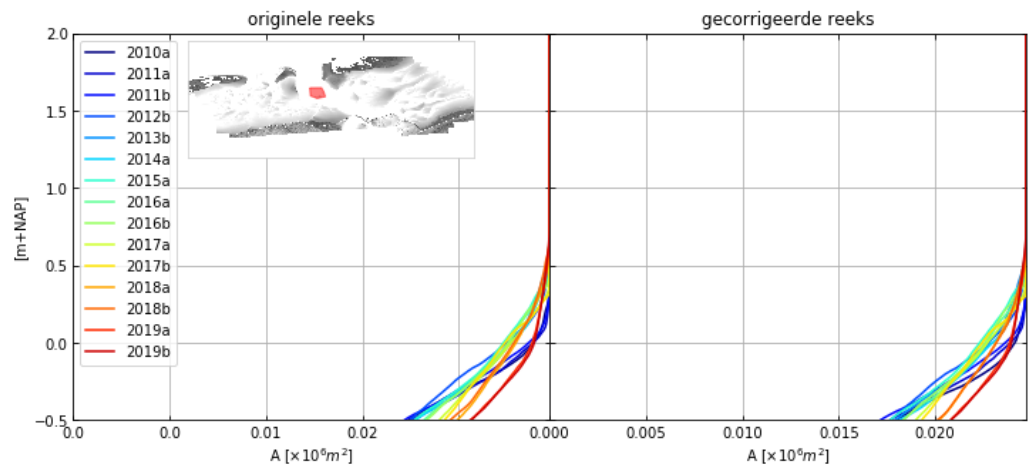
M



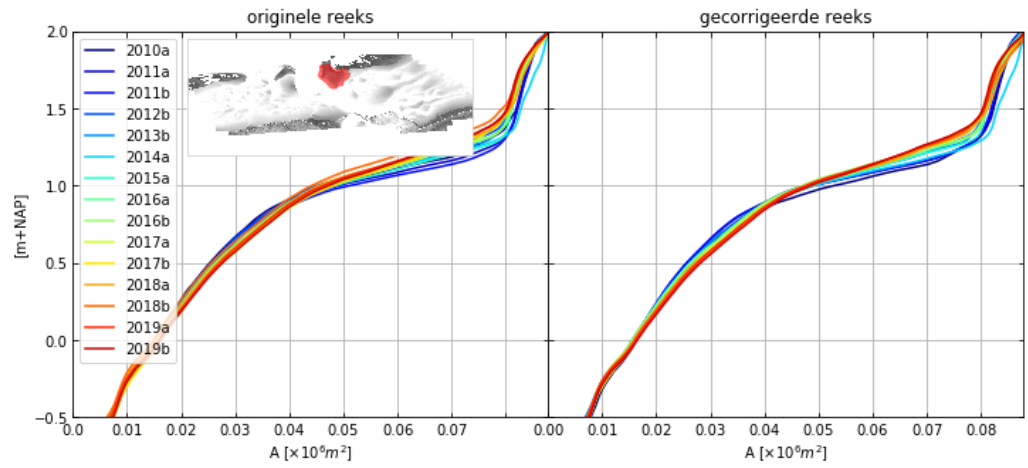
N



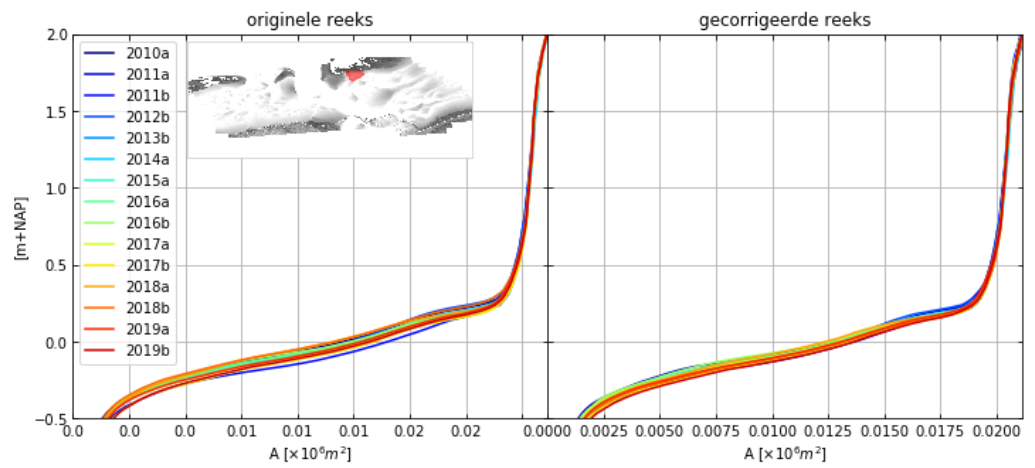
P



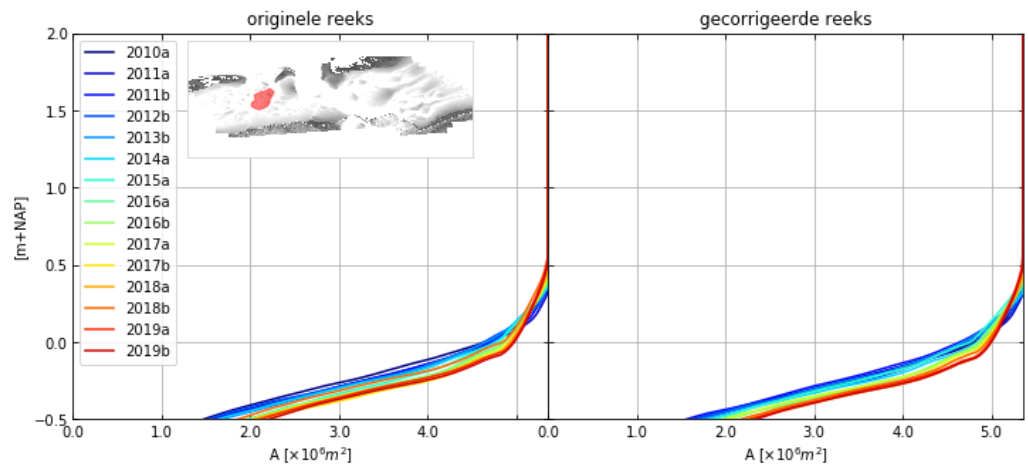
Q



R



T



Figuur B.3 Hypsometrische curven voor platen die individueel zijn bestudeerd, maar niet in de hoofdtekst zijn besproken. Op basis van originele data (links) en gecorrigeerde data (rechts).

## C NAM rapportage datareeks correctie

In de beoordeling Evaluatie monitoringsprogramma 2013-2019 adviseert de Auditcommissie om te onderzoeken of de foutenmarge in de bepaling van de wadplaathoogtes door middel van LiDAR metingen kan worden verkleind, om de trends in de wadplaathoogtes beter te kunnen interpreteren.

Deze bijlage geeft een toelichting van de berekening van correctie parameters om residuele systematische effecten in de LiDAR hoogtes te minimaliseren, op basis van de LiDAR hoogtes op harde oppervlaktes (zoals wegen) en de hoogtemetingen (waterpassingen) die op wadplaten nabij peilmerkclusters worden uitgevoerd. Dit zijn de zogenaamde sedimentgrids. De berekende correctie parameters worden geëvalueerd op de Ground Control Point grids, waarbij tevens InSAR wordt gebruikt om voor de opgetreden bodemdaling te corrigeren.

### C.1 Het gebruik van harde oppervlaktes en sedimentgrids voor de berekening van residuele systematische verschillen

In (Van der Lugt et al., 2019) wordt beschreven dat ondanks dat de LiDAR datasets door de meetdiensten worden ingepast op de Ground Control Point grids (GCPs), er residuele systematische verschillen bestaan op harde oppervlaktes (zoals wegen). Deze residuele systematische verschillen worden gekwantificeerd door middel van 'shifts' (één constant verschil) en 'tilts' (verschillen in Oost-West en Noord-Zuid richting in de vorm van een kanteling). In het onderhavige rapport is verder aandacht besteed aan de residuele verschillen, en worden naast harde topografie (zoals wegen) ook de sedimentgrids in de Waddenzee gebruikt.

De sedimentgrids in de Waddenzee zijn grids van 7x5 punten in de nabijheid van de GPS campagne punten. Zij worden door middel van waterpassing ingemeten voor de betreffende GPS meetpunten in een campagne. De sedimentgrids zijn dus alleen beschikbaar voor de LiDAR surveys in het voorjaar. De meetprecisie van de punten in de sedimentgrids is in de orde van 2-3 mm (1-sigma), volgend uit de combinatie van post-processing van GPS campagne metingen en lokale hoogteverschillen uit de waterpassingen. Op basis van deze metingen kunnen de sedimentgrids gecorrigeerd worden voor de hoogteverschillen tussen twee LiDAR surveys (veroorzaakt door bodemdaling en natuurlijke sedimentatieprocessen), en kunnen de resulterende hoogtes gebruikt worden voor het schatten van residuele systematische verschillen tussen de LiDAR surveys.

Het gebruik van de sedimentgrids, naast de harde oppervlaktes op de eilanden en het vasteland, heeft als voordeel dat de meetpunten die worden gebruikt voor het bepalen van de residuele systematische verschillen, beter ruimtelijk verdeeld zijn. De sedimentgrids zijn echter alleen in de voorjaar surveys gemeten, en alleen voor de betreffende GPS punten in de campagne. Daarom is niet gekozen voor het bepalen van de correcties tussen opeenvolgende surveys (Van der Lugt et al., 2019 - Liu), maar ten opzichte van één referentie survey. Voor de harde oppervlaktes zijn bovendien alleen punten ruim buiten de bodemdalingscontour van 2 cm geselecteerd (zie Figuur C.1).

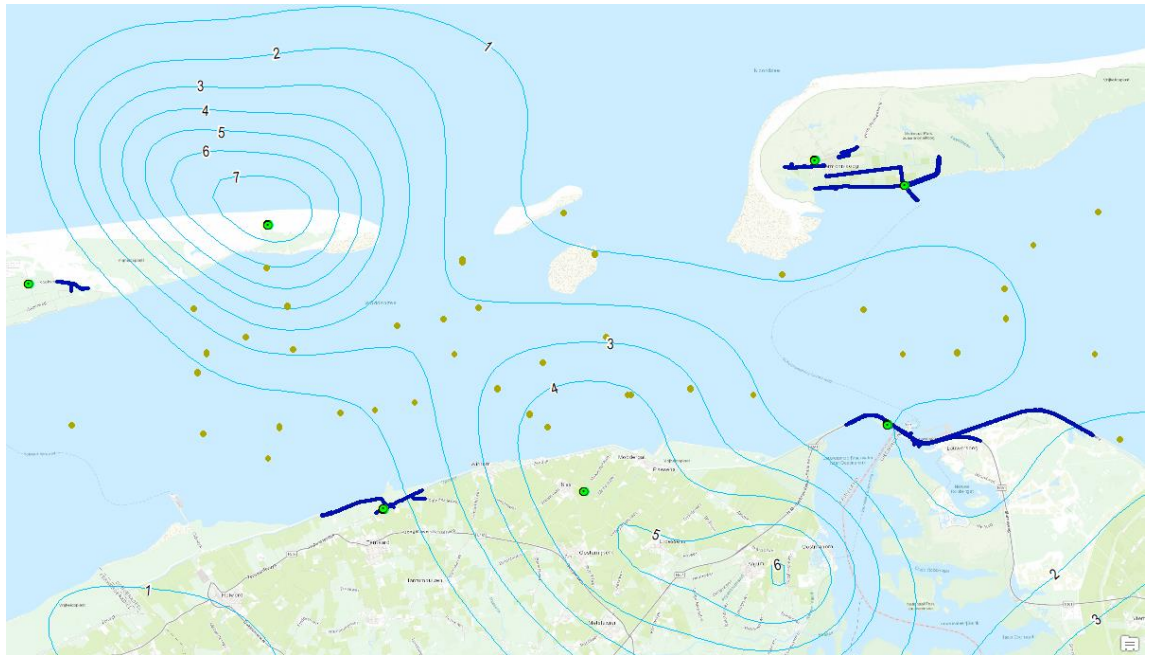
De referentie survey is gekozen op basis van de volgende criteria:

- De survey moet een groot aantal sedimentgrids bevatten (dit beperkt de keuze tot 2015a, 2017a, of 2018a).
- De relatieve correcties ten opzichte van andere surveys zijn klein.

Dit heeft geresulteerd in 2017a als referentie survey. Naast bovenstaande karakteristieken, was er tijdens deze survey een zeer lage laagwaterstand.

De correctie  $\epsilon$  van een survey op tijdstip  $t$  wordt geformuleerd als (zie paragraaf 2.3):

$$\epsilon(t) = Y(t) - Y_{2017a}$$



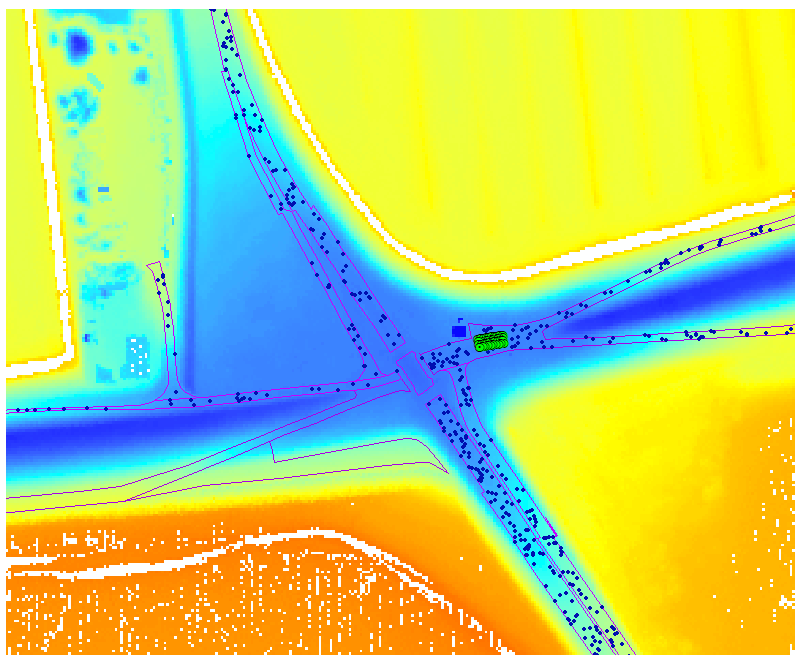
*Figuur C.1 Ligging harde oppervlaktes (donkerblauw) en sedimentgrids (bruingeel). De groene cirkels zijn de Ground Control Point grids. De contouren geven de bodemdaling (cm) in de periode 2006-2018 uit de Meet- en Regelcyclus 2018. De harde oppervlaktes buiten het bodemdalingsgebied op Ameland zijn niet in alle surveys opgenomen.*

De shift en tilt worden integraal geschat als een lineair vlak:  $\epsilon(x, y, t) = a(t) \cdot x + b(t) \cdot c(t)$ , waarbij  $\epsilon$  een vector van hoogteverschillen is ten opzichte van de referentie survey (in meters);  $x$  en  $y$  vectoren met coördinaten in het Rijksdriehoeksstelsel (in kilometer); en  $a$ ,  $b$ , en  $c$  de parameters van het lineaire vlak.

De correctie parameters zijn bepaald op basis van de Deltares grids met 1 meter resolutie. Alvorens de correctie parameters te berekenen, zijn mogelijke geometrische anomalieën beoordeeld. Daarom zijn spotchecks uitgevoerd door te vergelijken met de Basiskaart Grootchalige Topografie (BGT) en luchtfoto's. Hiertoe is eerst gezorgd dat de LiDAR surveys, de BGT en de luchtfoto's in hetzelfde coördinaat referentie systeem staan (Rijksdriehoeksstelsel, Amersfoort / RD New, EPSG 28992).

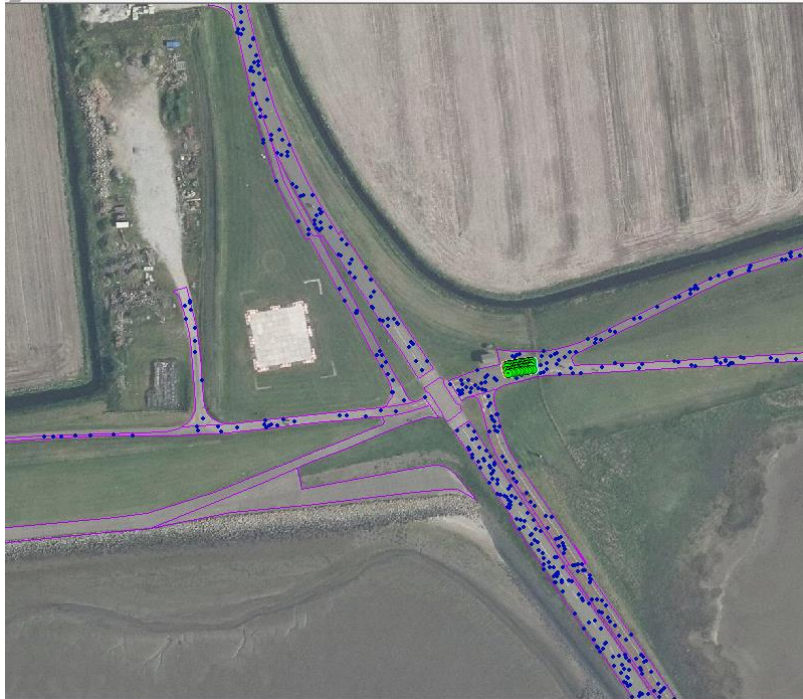
Tabel C.1 Berekende correctie parameters  $a$ ,  $b$  en  $c$  ten opzichte van de referentie survey 2017a.

Survey	$a$	$b$	$c$
2010a	-0.0002	0.0024	-1.3900
2011a	-0.0002	-0.0031	1.9488
2011b	0.0027	-0.0112	6.2233
2012b	-0.0003	0.0009	-0.4705
2013b	0.0014	-0.0020	0.9735
2014a	0.0008	-0.0009	0.4376
2015a	0.0024	-0.0033	1.5232
2015b	0.0014	-0.0026	1.3075
2016a	0.0011	-0.0007	0.2266
2016b	0.0009	0.0005	-0.4862
2017a	0.0000	0.0000	0.0000
2017b	0.0001	-0.0005	0.3010
2018a	0.0000	-0.0037	2.2884
2018b	-0.0001	0.0022	-1.2534
2019a	-0.0005	-0.0013	0.9368
2019b	0.0003	-0.0028	1.6460



Figuur C.2 Overlay ter bevestiging van de horizontale ligging van de punten op de harde oppervlaktes (donkerblauw) ten opzichte van de wegdelen uit de Basiskaart Grootschalige Topografie. De groene cirkels behoren tot één van de Ground Control Point grids.

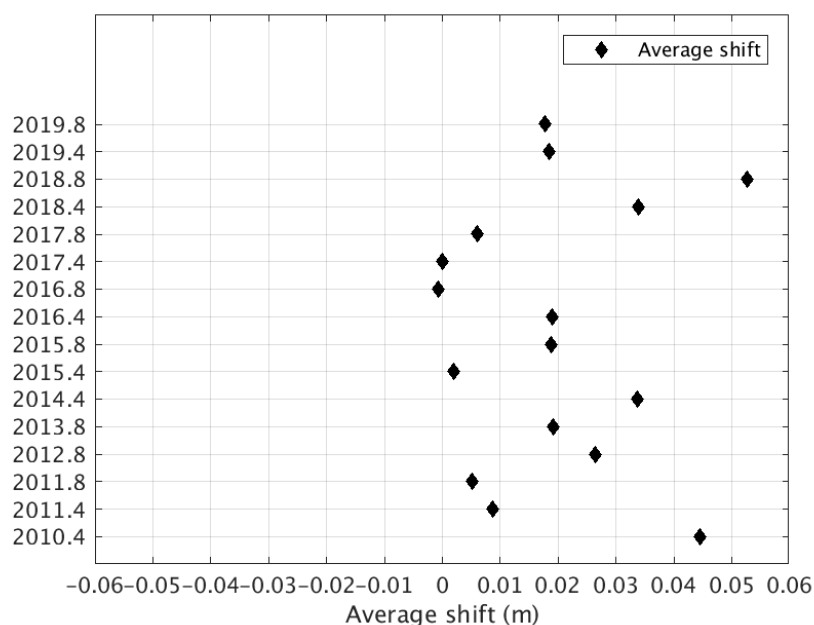




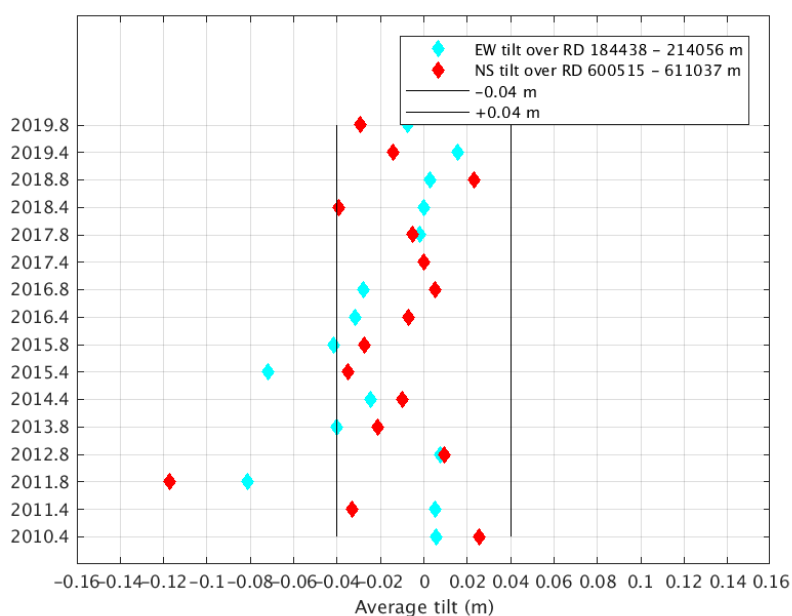
*Figuur C.3 Overlay ter bevestiging van de horizontale ligging van de punten op de harde oppervlaktes (donkerblauw) ten opzichte van de wegdelen uit de Basiskaart Grootschalige Topografie en de luchtfoto's. De groene cirkels behoren tot één van de Ground Control Point grids.*

Door middel van kleinste kwadraten schatting zijn de correctie parameters uit de hoogteverschillen van de harde oppervlaktes en de sedimentgrids bepaald. Daarbij worden hoogteverschillen groter dan 20 cm beschouwd als uitschieters.

De berekende parameters staan in Tabel C.1. Om de parameters inzichtelijk te maken, zijn ook de shifts (Figuur C.4) en tilts (Figuur C.5) in Oost-West en Noord-Zuid richting berekend. Wat opvalt, is dat de shifts allemaal positief zijn (tussen 0 en 5 cm). Echter, voor alternatieve referentie surveys waarin veel sedimentgrids gemeten zijn (2015a of 2018a), zouden de shifts ook overwegend dezelfde richting uit zijn geweest (voor 2015a positief, voor 2018a negatief). De tilts laten een verdeling zien rondom 0, waarbij het merendeel tussen -4 en +4 cm zit, over 30 km in Oost-West richting, en 10 km in Noord-Zuid richting. Dit betekent dat de berekende correcties voor een groot deel binnen de meetnauwkeurigheid van LiDAR vallen. Echter, als naar de verdeling van hoogteverschillen in de histogrammen en de ruimtelijk visualisatie van de correcties wordt gekeken, is er een duidelijk effect. De histogrammen verschuiven richting een spreiding rondom 0, en zijn in een aantal gevallen ook smaller (zie Figuur C.6 tot en met Figuur C.19).



Figuur C.4 Berekende constante verschuiving ('shift') ten opzichte van de referentie survey 2017a. De shifts liggen tussen de 0 en 5 cm.



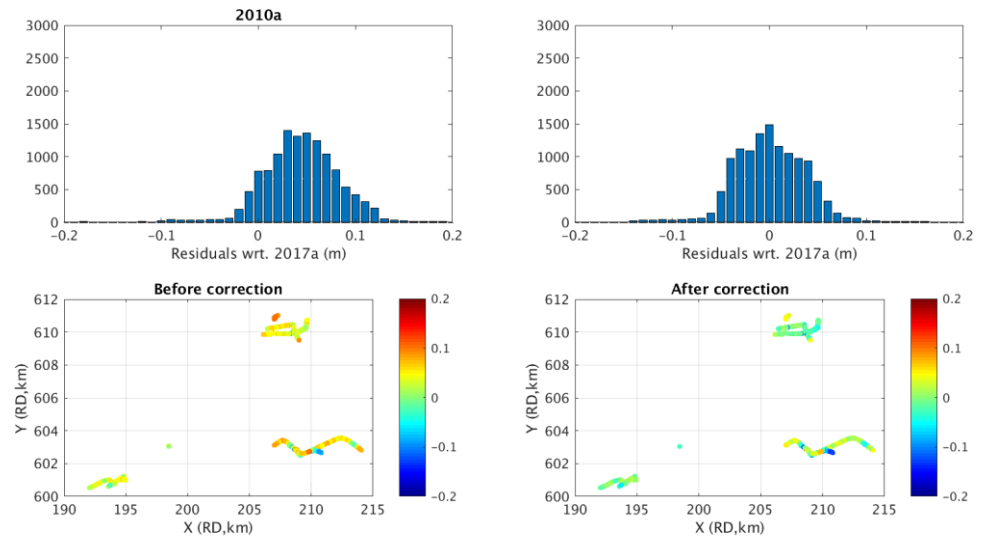
Figuur C.5 Geschatte tilt in Oost-West (over ca. 30 km) en Noord-Zuid (over ca. 10 km) richting op basis van de correctie parameters. De geschatte tilts liggen vrijwel allemaal in het bereik -4 tot 4 cm.

Tabel C.2 geeft een overzicht van de parameters van de histogrammen van de gecorrigeerde hoogteverschillen ten opzichte van survey 2017a. Zowel de standaardafwijking, als de 16% en 84% percentielen (overeenkomend met  $1\sigma$  voor de normale verdeling) zijn aangegeven. De standaardafwijking wordt naar verwachting sterker beïnvloed dan de percentielen, door de conservatieve grens van 20 centimeter voor uitschieters, die nog zijn meegenomen als waarnemingen in de berekening van de correctie parameters. De standaardafwijkingen van de hoogteverschillen liggen in de orde van 2-4 cm voor de harde topografie en de sedimentgrids. De percentielen geven aan dat de hoogteverschillen op de harde oppervlaktes en sedimentgrids, na correctie evenwichtig zijn verdeeld rondom 0. Uit Tabel C.2 is ook op te maken dat de meeste surveys in de beginjaren een lagere nauwkeurigheid hebben dan de surveys in de afgelopen

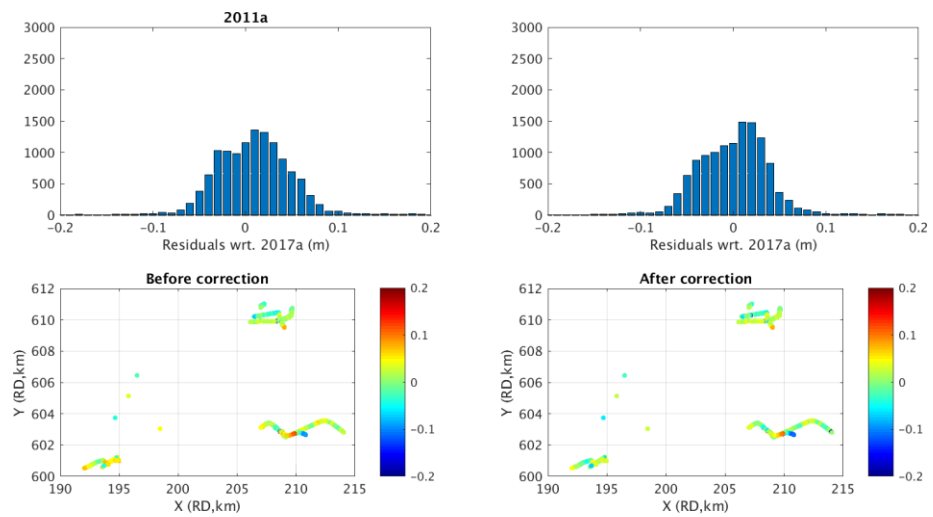
jaren. De laatste twee kolommen geven de percentielen aan bij -3 en +3 cm. De percentielen van de hoogteverschillen ten opzichte van 2017a voor de laatste drie surveys geven een consistent beeld van respectievelijk de 6% en 93% percentielen voor -3 en + 3 cm.

*Tabel C.2 Overzicht parameters histogrammen gecorrigeerde hoogteverschillen ten opzichte van survey 2017a. Zowel de standaardafwijking als de 16% en 84% percentielen (overeenkomend met  $1\sigma$  voor de normale verdeling) zijn aangegeven. De standaardafwijkingen van de hoogteverschillen liggen in de orde van 2-4 cm voor de harde topografie en de sedimentgrids. De laatste twee kolommen geven de percentielen aan bij -3 en +3 cm.*

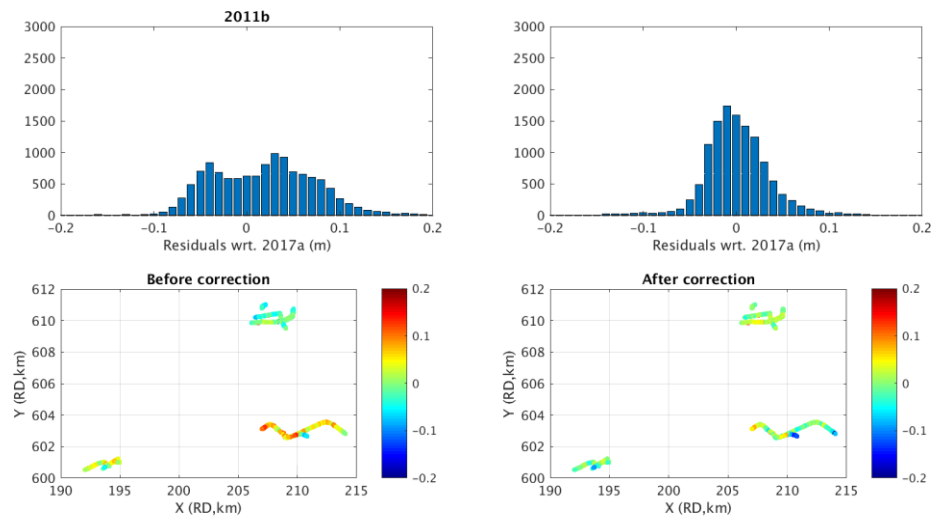
Survey	$\sigma$ (cm)	16% percentiel (cm)	84% percentiel (cm)	percentiel (%) -3 cm	percentiel (%) +3 cm
2010a	4	-3.5	3.8	20	78
2011a	3.9	-3.8	3.3	22	81
2011b	3.7	-2.8	3	14	84
2012b	4.2	-4.4	3.6	25	79
2013b	2.8	-2	1.8	7	92
2014a	3.3	-2.2	2.1	11	91
2015a	2.8	-1.9	1.7	8	94
2015b	3.2	-2.3	2.1	10	91
2016a	2.7	-1.5	1.4	5	94
2016b	3.9	-2.8	2.5	15	89
2017b	3.6	-2.1	1.5	9	92
2018a	3.2	-1.9	1.9	6	91
2018b	3.2	-1.8	1.5	6	93
2019a	3.4	-1.7	1.3	6	93
2019b	3.3	-1.8	1.5	6	93



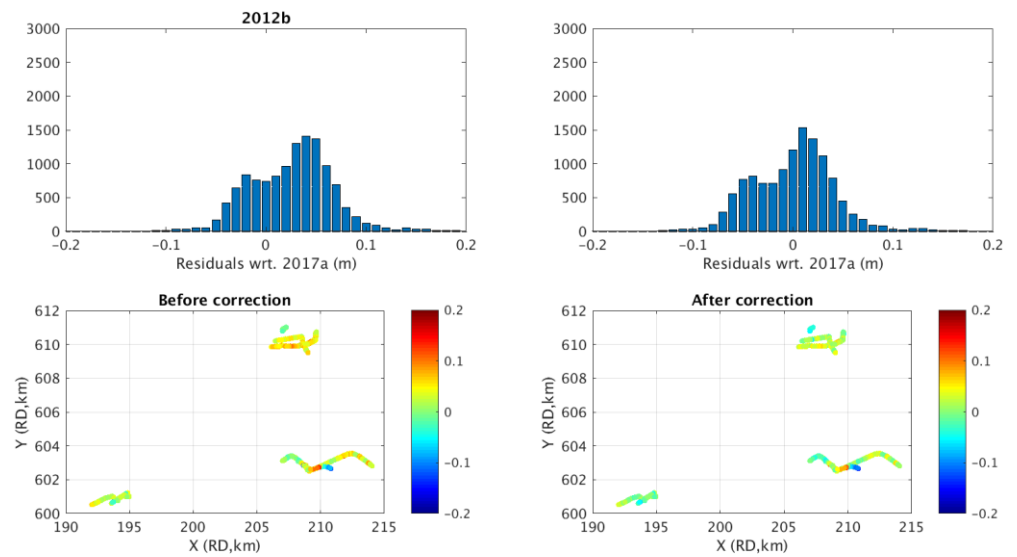
Figuur C.6 Residuen hoogteverschillen survey 2010a ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.



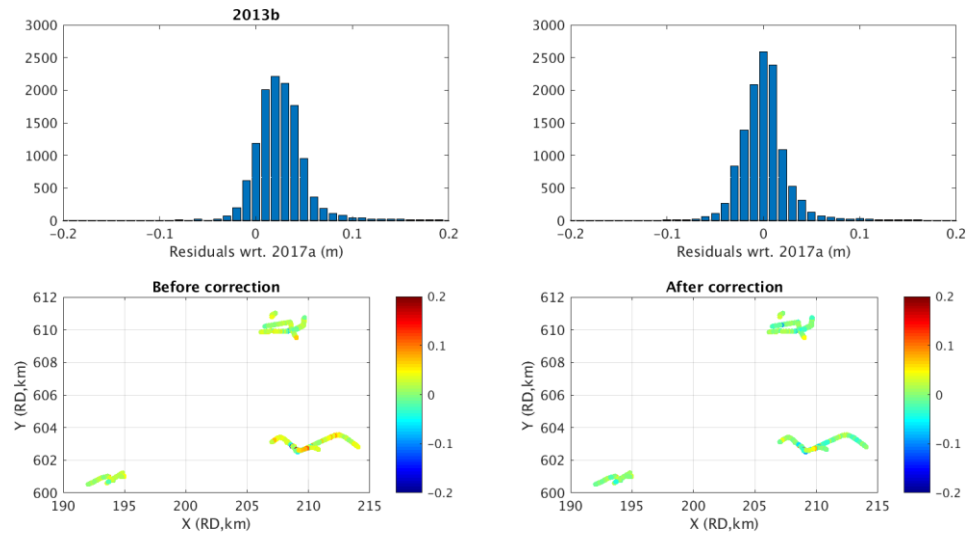
Figuur C.7 Residuen hoogteverschillen survey 2011a ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.



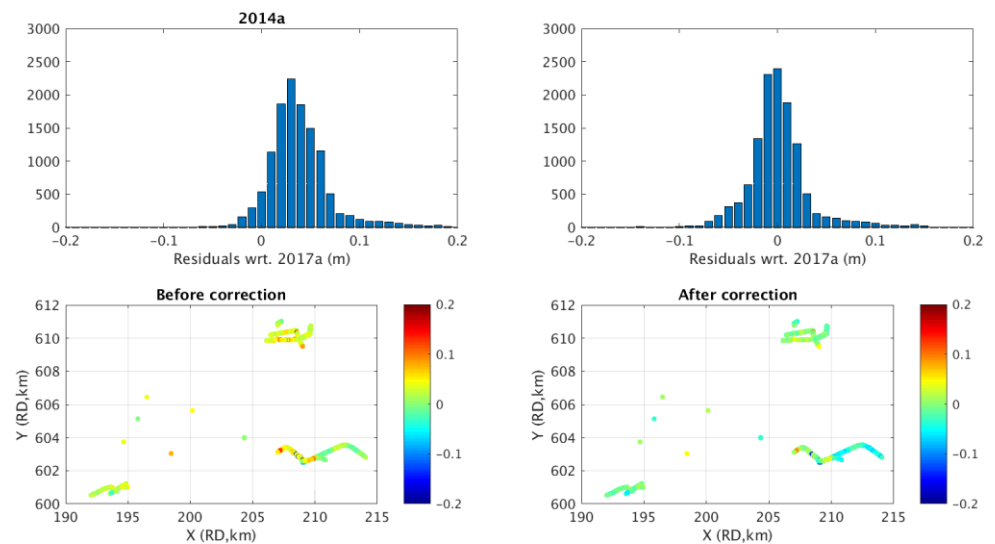
*Figuur C.8 Residuen hoogteverschillen survey 2011b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.*



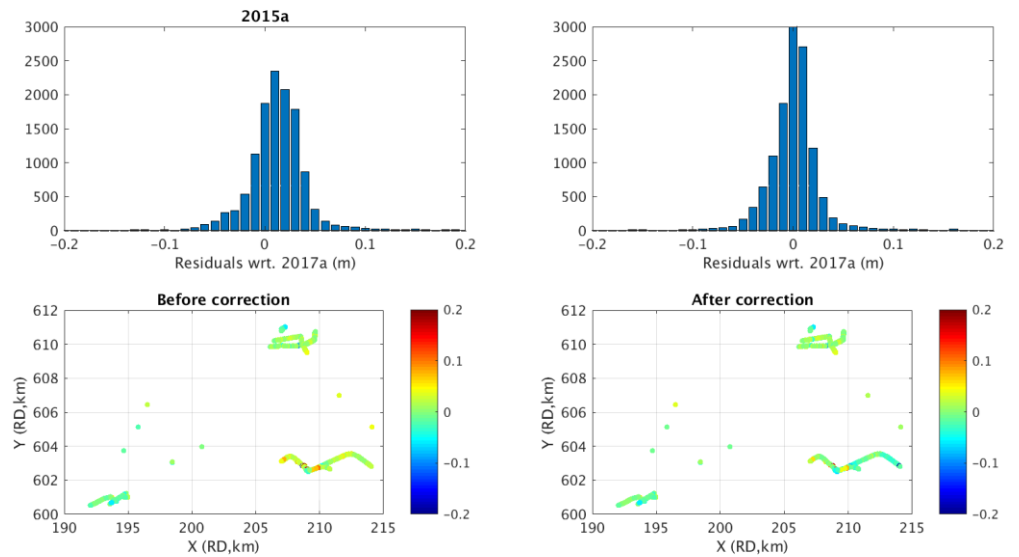
*Figuur C.9 Residuen hoogteverschillen survey 2012b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.*



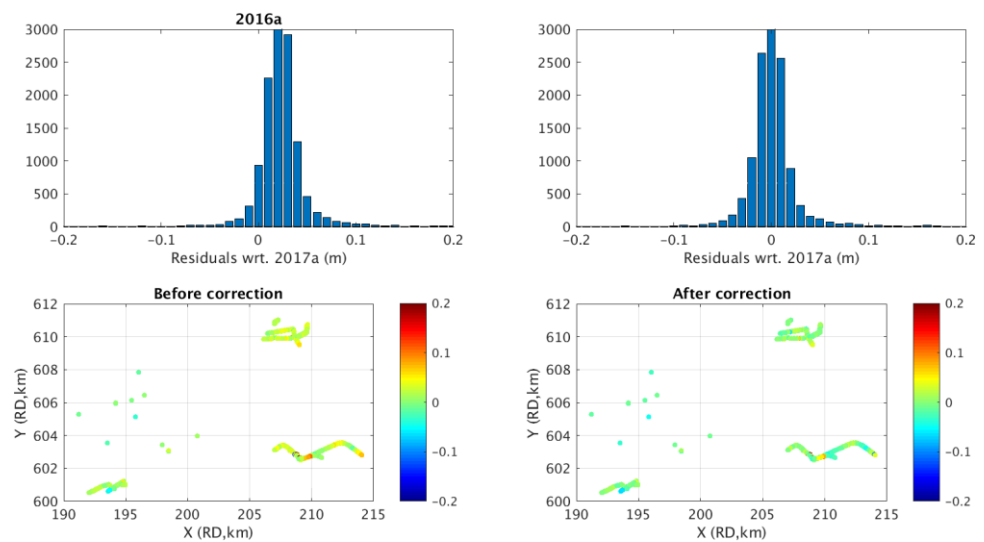
Figuur C.10 Residuen hoogteverschillen survey 2013b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.



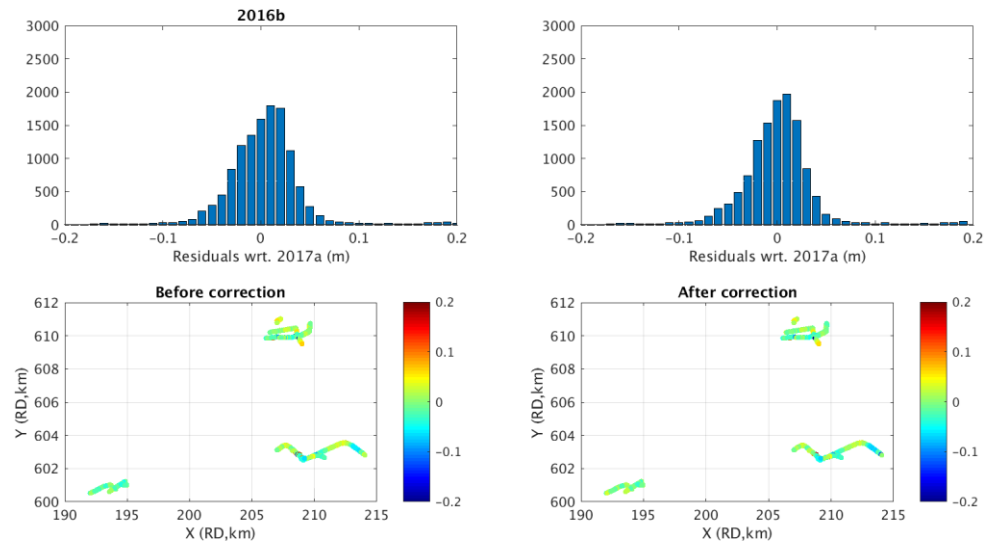
Figuur C.11 Residuen hoogteverschillen survey 2014a ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.



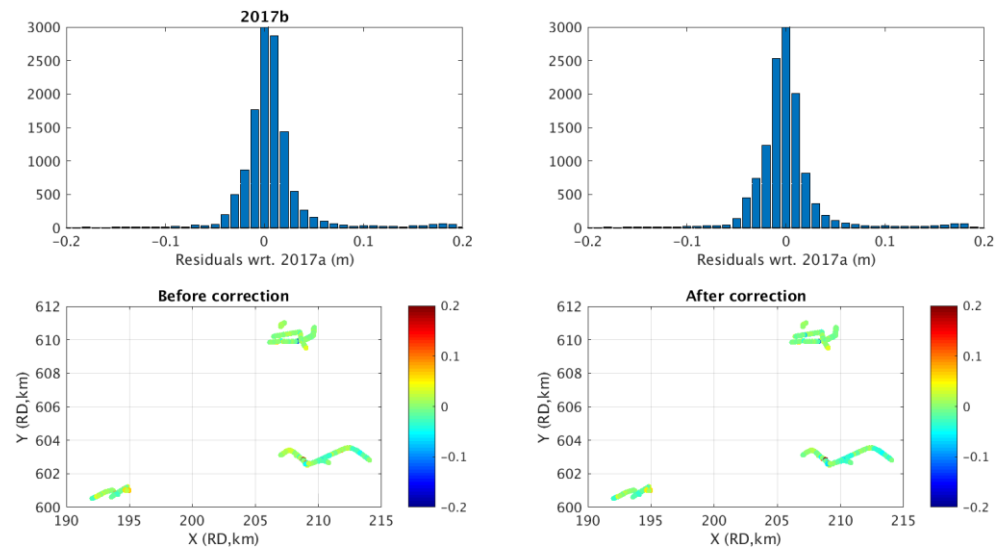
Figuur C.12 Residuen hoogteverschillen survey 2015a ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.



Figuur C.13 Residuen hoogteverschillen survey 2016a ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.

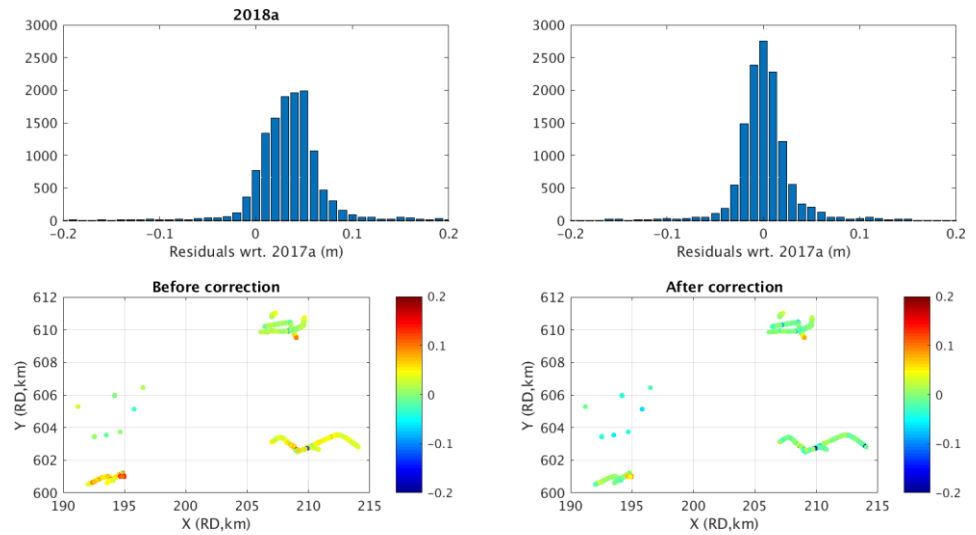


Figuur C.14 Residuen hoogteverschillen survey 2016b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.

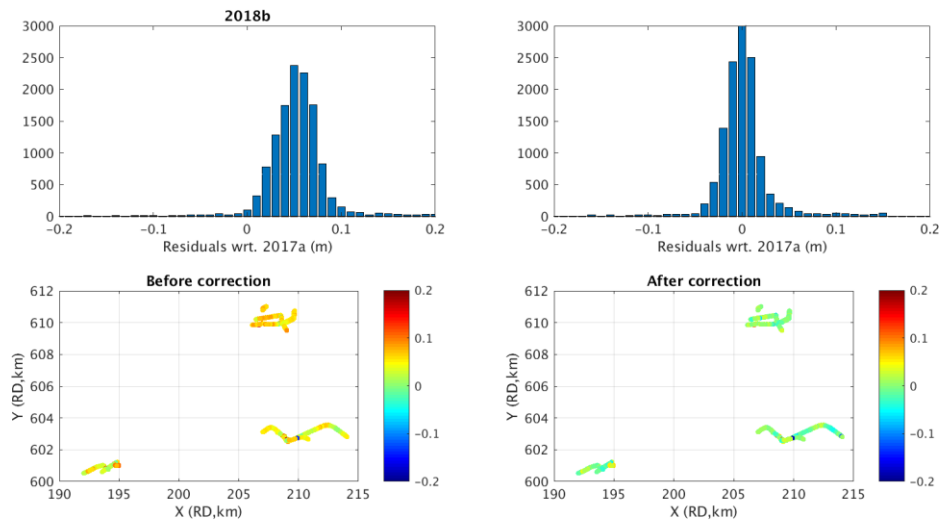


Figuur C.15 Residuen hoogteverschillen survey 2017b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.

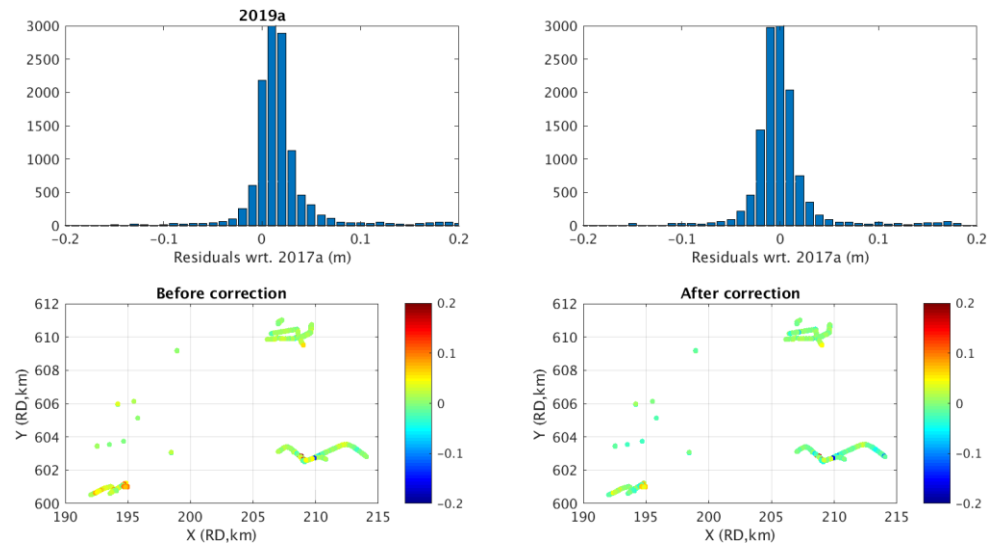




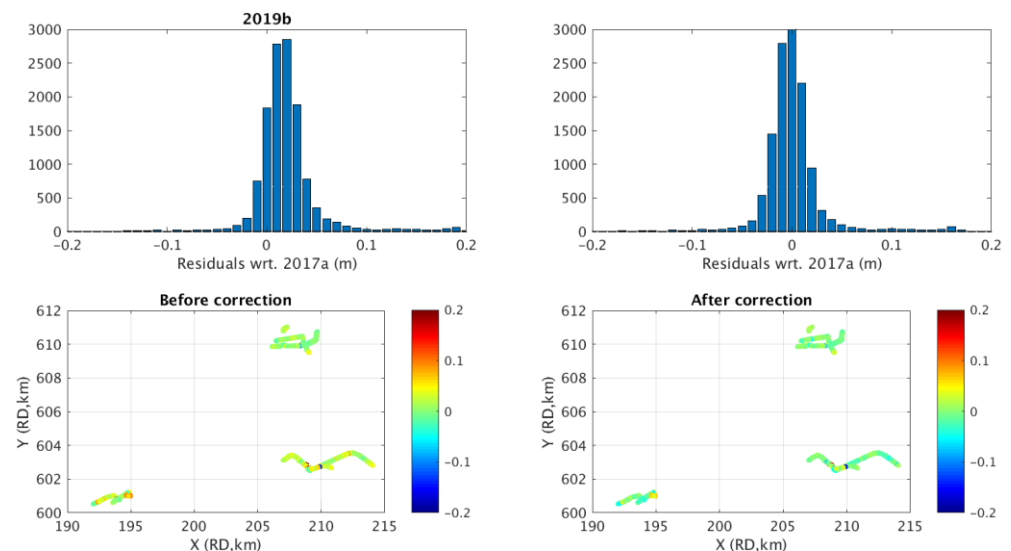
Figuur C.16 Residuen hoogteverschillen survey 2018a ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.



Figuur C.17 Residuen hoogteverschillen survey 2018b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.



Figuur C.18 Residuen hoogteverschillen survey 2019a ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.



Figuur C.19 Residuen hoogteverschillen survey 2019b ten opzichte van 2017a, voor (links) en na (rechts) correctie.

## C.2 Evaluatie op de Ground Control Point grids

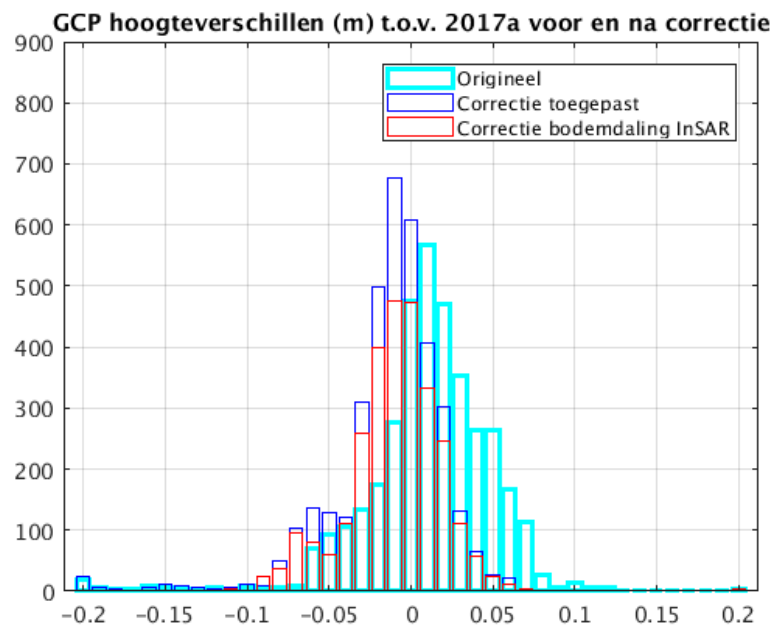
De LiDAR datasets zijn door de meetdiensten ingepast op de Ground Control Points grids (GCPs). Figuur C.20 toont in lichtblauw het histogram van alle hoogteverschillen van alle surveys ten opzichte van de referentie survey 2017a voor alle GCPs. De GCP hoogteverschillen liggen visueel al goed verdeeld rondom 0 binnen  $\pm 5$  cm, maar na toepassing van de correctie parameters vindt er nog een verschuiving richting 0 en versmalling van het histogram plaats. Een aantal van de GCPs ligt in gebieden onderhevig aan bodemdaling. Daarom is tevens nog een correctie uitgevoerd op basis van de mediane tijdserie van alle InSAR meetpunten in een radius van 500 meter van de GCPs. Figuur C.21 tot en met Figuur C.26 tonen de bodemdaling tijdseries op basis van geodetische metingen (waterpassen, InSAR, en GPS (voor GCP1)). De bodemdaling van de verschillende meettechnieken komt overeen binnen de meetnauwkeurigheid. Vanwege de

grote temporele dichtheid, is de mediane InSAR tijdserie geschikt om de bodemdaling ten tijde van de LiDAR surveys te bepalen.

De correctie van de hoogteverschillen op basis van de gemeten bodemdaling geeft slechts een marginale verandering. Dit is te verwachten, aangezien de bodemdaling in de nabijheid van de meeste GCPs binnen 1 of enkele centimeters ligt in de periode 2010-2019. Tabel C.3 toont de standaardafwijking en de 16% en 84% percentielen van de hoogteverschillen op de GCPs ten opzichte van de referentie survey 2017a. Hoogteverschillen groter dan 20 cm zijn hierbij als uitschieters beschouwd. Met een standaardafwijking van 2.8 cm, en 16% en 84% percentielen van -3.3 cm en 1.5 cm na correctie, zijn de resultaten soortgelijk als in Tabel C.2 voor de harde oppervlaktes en sedimentgrids.

Geconcludeerd kan worden, dat de inpassing op GCPs goed is uitgevoerd. Echter, de hoeveelheid en ruimtelijke spreiding van andere harde oppervlaktes en sedimentgrids kunnen worden gebruikt om een additionele verbetering uit te voeren in het minimaliseren van residuele systematische afwijkingen.

De in deze bijlage beschreven procedure kan in het vervolg standaard worden toegepast. Hierdoor wordt de foutenmarge in de LiDAR data verkleind, en kunnen trends in de wadplaat hoogtes beter worden geanalyseerd.



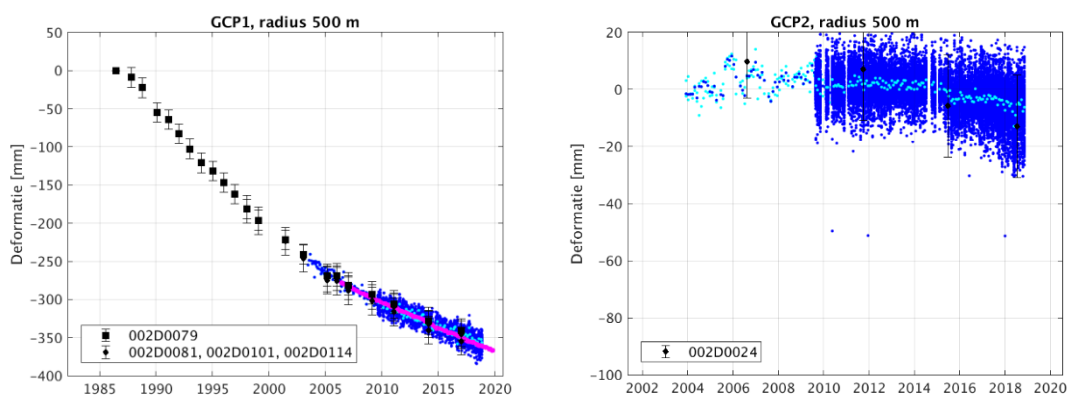
*Figuur C.20 Histogrammen van de hoogteverschillen (m) van alle GCP gridpunten van alle surveys ten opzichte van de referentie survey 2017a. Lichtblauw: GCP hoogteverschillen originele surveys; donkerblauw: na toepassing van de correctie parameters; rood: na correctie van de bodemdaling op basis van de mediane InSAR tijdserie van alle InSAR meetpunten binnen 500 radius van de GCP grids. Het rode histogram is kleiner, omdat er voor 2019 geen InSAR metingen beschikbaar waren.*

Tabel C.3 Standaardafwijking en 16% en 84% percentielen van de GCP hoogteverschillen ten opzichte van de referentie survey 2017a: origineel, na toepassing van de correctie parameters, en inclusief correctie voor de bodemdaling op basis van InSAR.

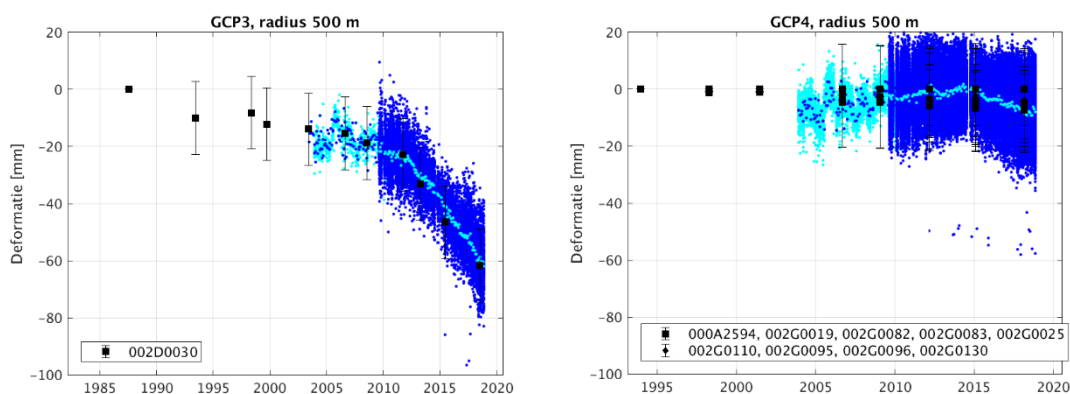
	$\sigma$ (cm)	16% percentiel (cm)	84% percentiel (cm)
Origineel	3.8	-1.9	4.5
Correctie toegepast	3.2	-3.6	1.4
Incl. correctie bodemdaling InSAR	2.8	-3.3	1.5



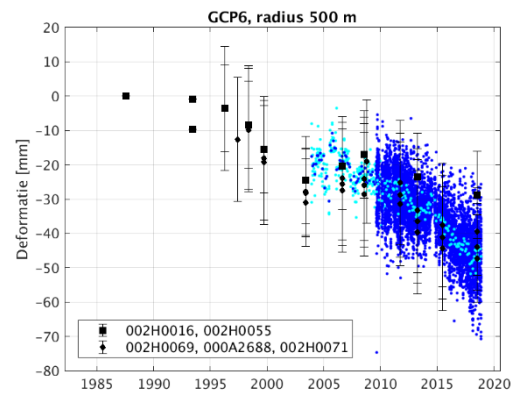
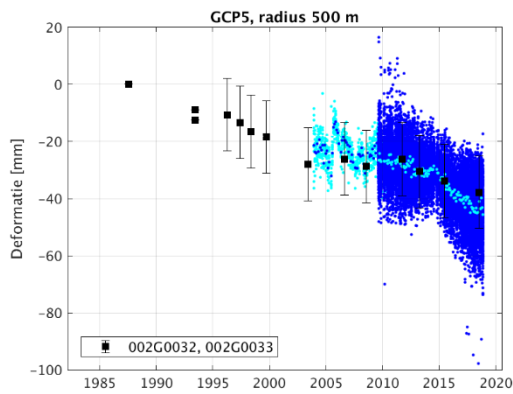
Figuur C.21 Overzichtkaart van de Ground Control Point grids (GCPs).



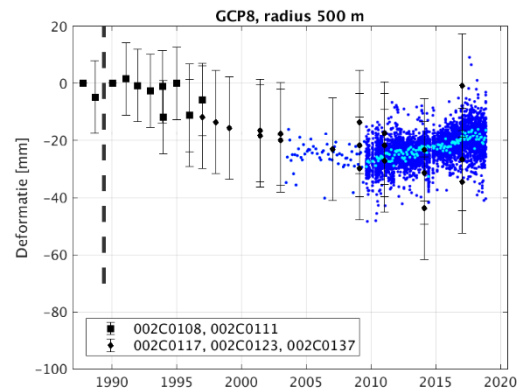
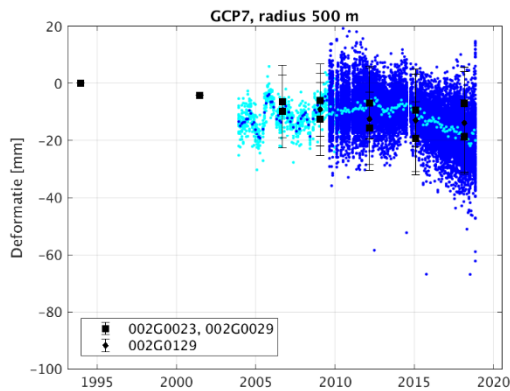
Figuur C.22 Tijdsreeks bodemdaling (mm) meetpunten binnen 500 m radius van GCP1 (links) en GCP2 (rechts). Zwart: tijdsreeks waterpaspeilmerken. Blauw: tijdsreeks InSAR meetpunten. Cyaan: mediaan van de InSAR tijdsreeks. Paars: GPS tijdsreeks.



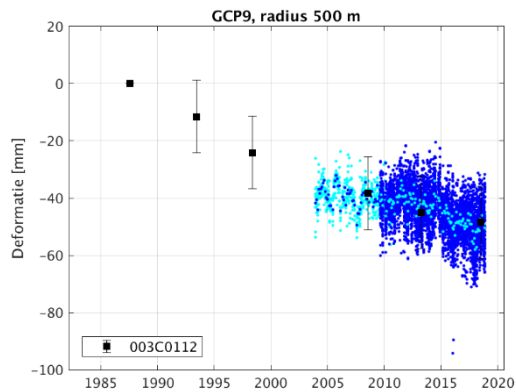
Figuur C.23 Tijdsreeks bodemdaling (mm) meetpunten binnen 500 m radius van GCP3 (links) en GCP4 (rechts). Zwart: tijdsreeks waterpaspeilmerken. Blauw: tijdsreeks InSAR meetpunten. Cyaan: mediaan van de InSAR tijdsreeks.



Figuur C.24 Tijdsreeis bodemdaling (mm) meetpunten binnen 500 m radius van GCP5 (links) en GCP6 (rechts). Zwart: tijdsreeis waterpaspeilmerken. Blauw: tijdsreeis InSAR meetpunten. Cyaan: mediaan van de InSAR tijdsreeis.



Figuur C.25 Tijdsreeis bodemdaling (mm) meetpunten binnen 500 m radius van GCP7 (links) en GCP8 (rechts). Zwart: tijdsreeis waterpaspeilmerken. Blauw: tijdsreeis InSAR meetpunten. Cyaan: mediaan van de InSAR tijdsreeis.



Figuur C.26 Tijdsreeis bodemdaling (mm) meetpunten binnen 500 m radius van GCP9. Zwart: tijdsreeis waterpaspeilmerken. Blauw: tijdsreeis InSAR meetpunten. Cyaan: mediaan van de InSAR tijdsreeis.