

**Analyse LiDAR data voor het  
Friesche Zeegat (2010-2017)**

**Monitoring effect bodemdaling door gaswinning**





# **Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2017)**

**Monitoring effect bodemdaling door gaswinning**

Reinier Schrijvershof  
Henk van den Boogaard  
Martijn Visser

11202013-000





**Titel**

Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2017)

|  |                |                       |                 |
|--|----------------|-----------------------|-----------------|
| <b>Opdrachtgever</b>                   | <b>Project</b> | <b>Kenmerk</b>        | <b>Pagina's</b> |
| Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. | 11202013-000   | 11202013-000-ZKS-0002 | 88              |

**Trefwoorden**




LiDAR, Waddenzee, Friesche Zeegat, bodemdaling, morfologie

**Samenvatting**

Jaarlijks wordt er een morfologische analyse van de wadplaten in het Friesche Zeegat uitgevoerd aan de hand van LiDAR data welke verzameld wordt in het kader van de monitoring van de effecten van bodemdaling in het Friesche Zeegat (kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag). Het doel van de morfologische analyse is onderzoeken of het areaal droogvallend wad sinds de start van de meetcampagne (2010) is veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning.

De morfologische analyse van dit jaar toont aan dat er een afname in droogvallend wad waar te nemen is in beide kombergingsgebieden. Deze afname is niet geleidelijk verdeeld over de gehele meetreeks maar is geconcentreerd in korte perioden. Deze korte termijn fluctuaties zijn van dezelfde orde-grootte als de totale afname over de gehele meetreeks.

Een analyse naar het effect van omgevingsfactoren op de metingen duidt aan dat het gemeten areaal sterk beïnvloedt wordt door de hoeveelheid water op de platen. De relatie tussen de toename in areaal en de laagwaterstand is benaderd door middel van lineaire regressie en het gemeten areaal is hiervoor gecorrigeerd. Een correlatie-analyse tussen het gemeten areaal (gecorrigeerd en niet gecorrigeerd) en bodemdaling duidt aan dat er geen correlatie is.

| Versie | Datum     | Auteur                | Paraaf  | Review          | Paraaf   | Goedkeuring     | Paraaf  |
|--------|-----------|-----------------------|---|-----------------|--|-----------------|---|
| 1      | mrt. 2018 | Reinier Schrijvershof |   | Ad van der Spek |  | Frank Hoozemans |   |
| 2      | mei. 2017 | Reinier Schrijvershof |  | Zheng Bing Wang |  | Frank Hoozemans |  |

**Status**

definitief



## Inhoud

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Inleiding</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1 Achtergrond en aanleiding                                 | 1         |
| 1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen                          | 3         |
| 1.3 Aanpak van de analyse                                     | 3         |
| 1.4 Leeswijzer  | 4         |
| <b>2 Beschrijving en verwerking van de LiDAR data</b>         | <b>7</b>  |
| 2.1 Algemeen  | 7         |
| 2.2 Beschrijving nieuwe data                                  | 7         |
| 2.3 Levering data   | 8         |
| 2.4 Dataverwerking  | 9         |
| 2.5 Digitale hoogtekarten en dekking                          | 11        |
| <b>3 Analyse bodemhoogteverandering</b>                       | <b>17</b> |
| 3.1 Inleiding   | 17        |
| 3.2 Bodemhoogteverschillen                                    | 18        |
| 3.2.1 Verdeling verschillen                                   | 18        |
| 3.2.2 Erosie- sedimentatiekaarten                             | 21        |
| 3.3 Trends in bodemhoogteverandering                          | 25        |
| <b>4 Analyse hypsometrie</b>                                  | <b>29</b> |
| 4.1 Inleiding   | 29        |
| 4.2 Kombergingsgebieden                                       | 29        |
| 4.3 Deelgebieden  | 34        |
| 4.4 Morfologische entiteiten                                  | 38        |
| <b>5 Analyse naar de verklaring van gemeten veranderingen</b> | <b>43</b> |
| 5.1 Inleiding   | 43        |
| 5.2 Morfologische veranderingen                               | 44        |
| 5.3 Definitie indicatoren                                     | 45        |
| 5.4 Meetgegevens  | 46        |
| 5.5 Analyse indicatoren                                       | 53        |
| 5.5.1 Indicatoren omstandigheden tijdens de metingen          | 53        |
| 5.5.2 Indicatoren morfodynamische veranderingen               | 57        |
| 5.6 Regressie-analyse   | 60        |
| 5.6.1 Regressie met $LW_1$                                    | 60        |
| 5.6.2 Regressie met $E_w$                                     | 63        |
| 5.6.3 Regressie met bodemdaling                               | 65        |
| <b>6 Discussie</b>  | <b>68</b> |
| <b>7 Conclusies en aanbevelingen</b>                          | <b>69</b> |
| 7.1 Conclusies  | 69        |
| 7.2 Aanbevelingen   | 70        |

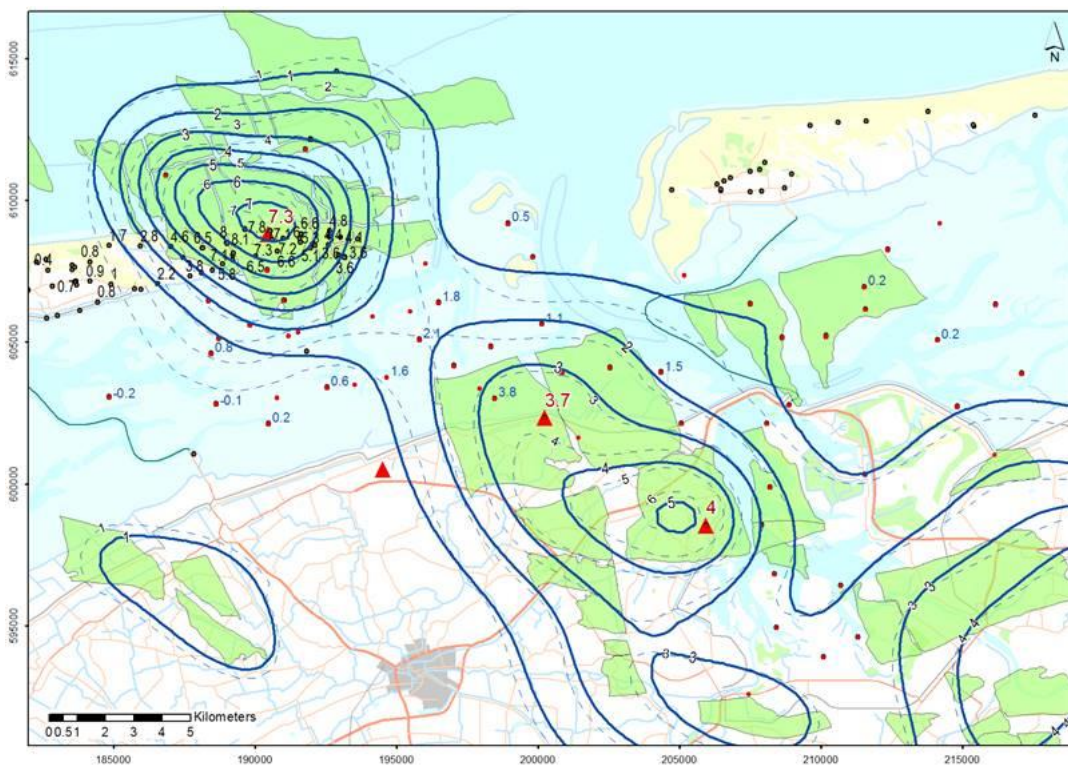
## Bijlage(n)

|  |            |
|--|------------|
| <b>Referenties</b>                                     | <b>71</b>  |
| <b>A Digitale hoogtekarten</b>                         | <b>A-1</b> |
| <b>B Dataverwerkingsmethoden</b>                       | <b>B-1</b> |
| B.1 Inleiding  | B-1        |
| B.2 Verwerkingsmethoden                                | B-2        |
| B.2.1 Rechtstreeks aggregeren naar 10x10m grid         | B-2        |
| B.2.2 Mediaan of het gemiddelde                        | B-4        |
| B.2.3 Met en zonder drempelwaarde                      | B-7        |
| B.3 Conclusies   | B-8        |
| <b>C Correlatiefiguren omgevingsfactoren en areaal</b> | <b>C-1</b> |

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond en aanleiding

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het waddegebied en de aangrenzende Noordzee. Gaswinning vindt plaats bij Ameland sinds 1986 en de drie gaswinningvelden in de Waddenzee (Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen) worden sinds 2007 geëxploiteerd. Het onttrekken van gas in deze velden zorgt voor bodemdaling binnen het waddegebied. De bodemdaling is enkele millimeters per jaar, dit is aangegeven in Figuur 1.1.



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

Het oppervlak van de wadplaten in het waddegebied hoeft echter niet in hetzelfde tempo mee te zakken met de diepe bodemdaling zoals aangegeven in Figuur 1.1. Als gevolg van relatieve zeespiegelstijging (stijging van de zeespiegel ten opzichte van de lokale bodemhoogte) ontstaat er bergingscapaciteit in de kombergingsgebieden. Het ontstaan van de bergingscapaciteit zorgt voor een vraag naar sediment waardoor er (versnelde) sedimentatie op de platen plaatsvindt. Het 'meegroeien' van de platen met de relatieve zeespiegelstijging is dus afhankelijk van de vraag naar sediment en het aanbod van sediment dat beschikbaar is voor sedimentatie.

Om te onderzoeken of de bodemdaling als gevolg van gaswinning de ontwikkeling van de wadplaten beïnvloedt is er bij de uitgave van de vergunningen voor exploitatie van de aardgasvelden een monitoringsverplichting opgenomen. Deze verplichting wordt vervuld door middel van het monitoringprogramma van de NAM. Doel van dit programma is om vast te

stellen of de gaswinning effect heeft op de abiotiek (morfologie) en de biotiek. In het voorliggende rapport wordt het effect op de abiotiek geëvalueerd aan de hand van morfologische veranderingen van de wadplaten in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag.

Tot en met 2009 werd in opdracht van de NAM de morfologische ontwikkeling (verandering van de vorm) van de wadplaten in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag gemonitord aan de hand van luchtfoto's. Het oppervlak droogvallende wadplaten werd geanalyseerd aan de hand van deze luchtfoto's. Sinds 2010 worden er LiDAR survey's uitgevoerd om ook de hoogte van de wadplaten te monitoren. Deltares voert jaarlijks een morfologische analyse uit aan de hand van de verzamelde LiDAR datasets (Tabel 1.1).

De hoogte van de wadplaten is veranderlijk als gevolg van de natuurlijke cycli van erosie (afvoer van sediment) en sedimentatie (afzetting van sediment) en als gevolg van geulmigratie (verplaatsing van geulen) en stormen. Deze processen die de bodemhoogte beïnvloeden vinden plaats op verschillende ruimtelijke en over verschillende tijdschalen. Om de bodemveranderingen die optreden als gevolg van deze processen te kunnen onderscheiden van bodemveranderingen die het gevolg zijn van niet-autonome bodemdaling dient een lange tijdreeks beschouwd te worden. Dit is omdat de structurele veranderingen in bodemhoogte anders gedomineerd worden door de variatie als gevolg van natuurlijke processen.

Door de analyse van de LiDAR data door te zetten, en zo een langere tijdreeks te beschouwen, kunnen grotere veranderingen in wadplaathoogte vastgesteld worden. Zo kunnen de veranderingen die groter zijn dan de nauwkeurigheid van de meetdata herkend worden en kunnen de trends in ontwikkeling van de wadplaten die het gevolg zijn van natuurlijke processen mogelijk onderscheiden worden van trends die het gevolg zijn van bodemdaling.

Tabel 1.1 Overzicht van alle LiDAR opnamen en analyserapportages van het Friesche Zeegat.

| LiDAR referentie | Data van opnamen                           | Referentie                    |
|------------------|--|-------------------------------|
| 2010 (voorjaar)  | 25-04-2010, 26-04-2010, 28-04-2010         | Wang et al. (2010)            |
| 2011 (voorjaar)  | 14-04-2011, 15-04-2011, 16-04-2011         | Cronin en Wang (2012)         |
| 2011 (najaar)    | 24-9-2011, 25-9-2011, 26-9-2011, 27-9-2011 |                               |
| 2012 (najaar)    | 15-10-2012, 16-10-2012, 26-10-2012         | Elias et al. (2013)           |
| 2013 (najaar)    | 18-10-2013, 19-10-2013, 20-10-2013         | Arentz en Vroom (2014)        |
| 2014 (voorjaar)  | 13-05-2014, 14-05-2014, 15-05-2014         | Vroom en Beekhuizen (2015)    |
| 2014 (najaar)    | 21-09-2014, 22-09-2014, 23-09-2014         |                               |
| 2015 (zomer)     | 30-06-2015, 1-7-2015                       | Schrijvershof en Vroom (2016) |
| 2015 (najaar)    | 26-10-2015, 8-11-2016, 23-11-2015          | Schrijvershof et al. (2017)   |
| 2016 (voorjaar)  | 5-5-2016, 6-5-2016                         |                               |
| 2016 (najaar)    | 14-9-2016, 15-9-2016, 16-9-2016            |                               |
| 2017 (voorjaar)  | 27-5-2017, 28-5-2017                       | Huidige rapportage            |
| 2017 (najaar)    | 15-10-2017, 17-10-2017, 18-10-2017         |                               |



## 1.2 Doelstelling en onderzoeksvragen

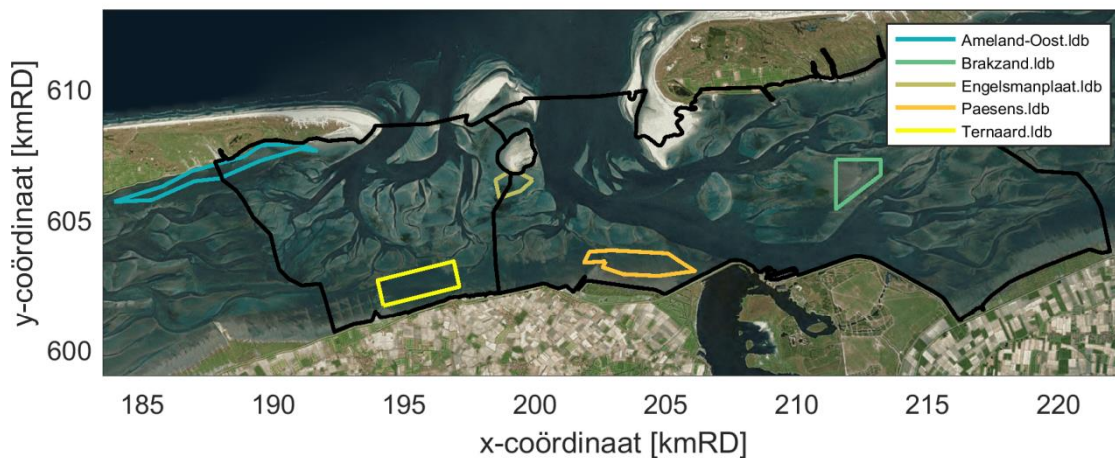
De doelstelling van de studie is: *'Onderzoeken of het areaal droogvallend wad in het Friesche Zeegat (kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag) sinds de start van de LiDAR metingen is veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning'*. De onderzoeksvragen die hier uit volgen zijn:

1. Welke morfologische veranderingen in het Friesche Zeegat zijn te detecteren aan de hand van de meetgegevens?
2. Is er een verandering in morfologie van het wad? En zo ja;
  - a. Wat zijn de mogelijke oorzaken van deze veranderingen?
  - b. Wat zijn de consequenties?
  - c. Zijn de veranderingen te relateren aan bodemdaling door gaswinning?

## 1.3 Aanpak van de analyse

De morfologische analyse wordt uitgevoerd aan de hand van de meetgegevens die beschikbaar zijn van het projectgebied (zie Figuur 1.2), vanaf 2010 tot en met 2017. Voor de recent beschikbaar gekomen meetgegevens (voor- en najaar 2017) wordt er een overzicht gegeven van het inwinnen van de data. De meetgegevens (LiDAR punten) zijn vervolgens verwerkt door deze te aggregeren (vergriden) tot punten op een regelmatig rooster met cellen van 10x10 m. Dit jaar is deze verwerkingsstap opnieuw uitgevoerd voor alle datasets om een consequente verwerkingsprocedure te kunnen waarborgen en er zijn daarnaast ook enkele verbeterpunten doorgevoerd. Het resultaat van de verwerking wordt getoond als digitale hoogtbeelden (DEMs). Als laatste verwerkingsstap wordt een interpolatie (driehoeksinterpolatie) uitgevoerd om een waarde toe te kennen aan de roostercellen die geen waarde hebben (gaten in de datasets). Deze stap levert een aparte dataset op.

De morfologische analyse bestaat uit drie onderdelen. De eerste twee onderdelen zijn gericht op het detecteren van verandering van de morfologie van de wadplaten aan de hand van de beschikbare meetgegevens. In het eerste onderdeel wordt verandering in de bodemhoogte geanalyseerd door middel van verschillen tussen datasets en trends in bodemhoogte berekend over de gehele duur van de dataset. Deze analyse wordt uitgevoerd aan de hand van de originele datasets (waar punten zonder data in aanwezig zijn). In het tweede onderdeel wordt er een analyse uitgevoerd van de hypsometrie van de kombergingsgebieden, door middel van hypsometrische curven en areaalberekeningen boven een vast referentievlak. Om een goede vergelijking tussen de hypsometrie van meerdere datasets mogelijk te maken is het belangrijk dat elke dataset volledig is voor het gehele projectgebied, deze analyse wordt daarom uitgevoerd met de geïnterpoleerde datasets. Het derde onderdeel van de analyse is gericht op het verklaren van de waarnemingen die volgen uit de eerste en tweede stap van de analyse. Door middel van een correlatie-analyse van omgevingsindicatoren en de LiDAR data worden causale verbanden tussen de gemeten veranderingen en deze indicatoren gezocht.

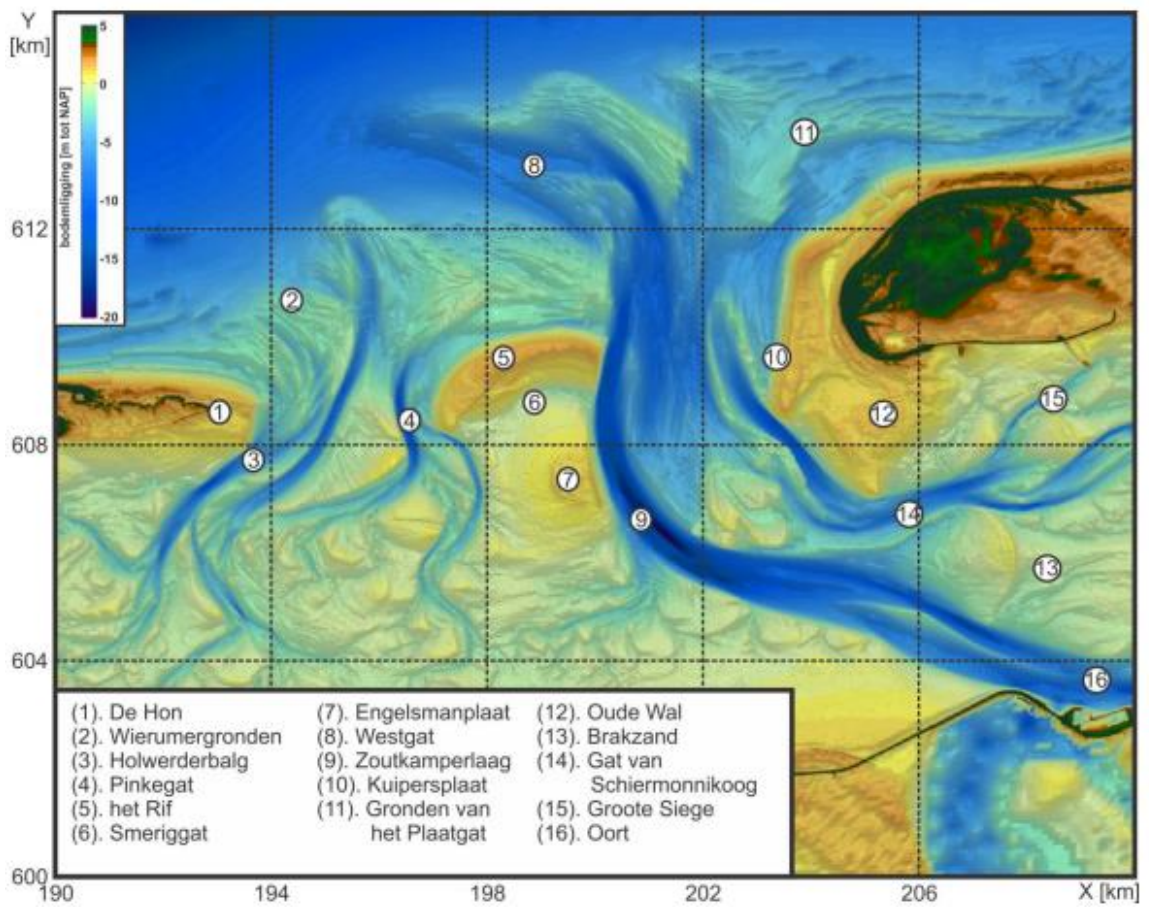


Figuur 1.2 Ligging van de polygonen van het projectgebied, kombergingsgebied Pinkegat (west) en Zoutkamperlaag (oost) en de vijf kleinere deelgebieden (zie legenda).

#### 1.4 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt een beschrijving gegeven van de verwerking van de meetgegevens. Het resultaat van de verwerking (digitale hoogtebeelden) is het startpunt voor de morfologische analyse (Hoofdstuk 3, 4). In het eerste gedeelte van de morfologische analyse (Hoofdstuk 3) wordt de verandering in gemeten bodemniveau getoond en besproken. Het tweede deel van de morfologische analyse (Hoofdstuk 4) behandelt de hypsometrie (verdeling van het areaal over de hoogte) van het projectgebied. In Hoofdstuk 5 wordt vervolgens een analyse beschreven naar de verklaring van de gemeten veranderingen. Conclusies van het onderzoek en aanbevelingen voor vervolgstudie worden gegeven in Hoofdstuk 6.

In de rapportage wordt veelvuldig verwezen naar specifieke morfologische eenheden aan de hand van de naamgeving van deze eenheden, in Figuur 1.3 is daarom een overzichtskaart opgenomen met de locaties en benaming van de belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat.



Figuur 1.3 Benaming van de belangrijkste geulen en platen in het Friesche Zeegat (uit: Elias en Bruens, 2013).



## 2 Beschrijving en verwerking van de LiDAR data

### 2.1 Algemeen

LiDAR (Light Detection And Ranging) is een technologie die de afstand tot een object of oppervlak berekent met:

1. het tijdsverschil tussen het uitzenden en ontvangen van een laserpuls,
2. de hoek waaronder de laserpuls wordt uitgezonden,
3. de absolute locatie van de sensor die de laserpuls ontvangt.

De mate waarin een oppervlak gedetecteerd kan worden hangt af van de reflectie van het te detecteren oppervlak. De reflectie wordt beïnvloed door het oppervlak zelf, de weersomstandigheden en de positie van de lasersensor ten opzichte van het oppervlak. De kwaliteit van de LiDAR metingen is daarom afhankelijk van meerdere factoren.

Het oppervlak beïnvloedt de mate van reflectie vanwege de ruwheid en de samenstelling van het oppervlak. De ruwheid bepaalt de mate van verstrooiing van een uitgezonden laserpuls. Zeer ruwe oppervlakken zorgen voor zo veel verstrooiing dat er minder reflectie door de sensor wordt opgevangen. Daarbij kunnen schaduwefecten er voor zorgen dat gedeelten van het oppervlak niet gedetecteerd worden. Aan de andere kant wordt een laserpuls door een spiegelglad oppervlak enkel onder een rechte hoek weerkaatst (speculaire reflectie), waardoor het oppervlak alleen gedetecteerd kan worden wanneer de sensor zich recht boven het oppervlak bevindt. De samenstelling van het oppervlak beïnvloedt de reflectie doordat de mate van absorptie en reflectie verschilt voor verschillende materialen.

De weersomstandigheden beïnvloeden de reflectie doordat waterdruppels in de atmosfeer de laserpuls absorberen. De laserpuls die het oppervlak bereikt is daardoor minder sterk waardoor de reflectie ook minder sterk is. Het detecteren van de bodem wordt daardoor bemoeilijkt wanneer er regen, bewolking of mist aanwezig is.

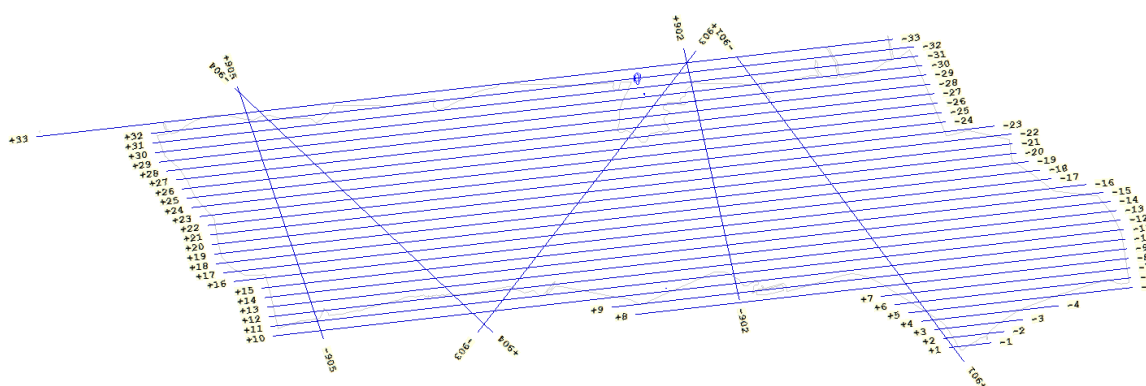
De positie van de sensor ten opzichte van het te detecteren oppervlak is van invloed op de reflectie doordat er meer reflectie van de uitgezonden laserpuls wordt ontvangen wanneer deze recht onder de sensor wordt uitgezonden dan wanneer dit onder een grotere hoek gebeurt. De kwaliteit van de LiDAR data is afhankelijk van de puntendichtheid en de nauwkeurigheid van het meetinstrument.

### 2.2 Beschrijving nieuwe data

In het voorjaar en het najaar van 2017 zijn er survey's uitgevoerd waarbij er LiDAR data verzameld is van het projectgebied. In deze paragraaf worden de nieuwe datasets besproken voor zover dit relevant is voor de morfologische analyse (vluchtgegevens, vliegtijden t.o.v. getijdenster). De oudere datasets zijn behandeld in de voorgaande analyserapporten (zie Tabel 1.1 voor een overzicht).

De LiDAR opname van het voorjaar van 2017 is uitgevoerd door Aerodata op 27 en 28 mei 2017. Een gedetailleerde beschrijving van het inwinnen en verwerken van deze dataset staat beschreven in Aerodata (2017a). In Figuur 2.1 zijn de geplande vlieglijnen weergegeven, met een nummerindicatie. De vlieglijnen 1-21 (zuidelijke gedeelte) en 33 zijn op 27 mei ingevlogen, de vlieglijnen 1 en 22-32 (noordelijke gedeelte) zijn op 29 mei ingevlogen. De cross-lijnen die worden gebruikt om de vliegbanen ten opzichte van elkaar te corrigeren zijn

beide dagen allemaal ingevlogen. Bij de planning van de vliegtijden is rekening gehouden met de voorspelde waterstand bij vier getijmeetstations verspreid over het projectgebied. Alle vlieglijnen zijn ingewonnen bij een waterstand die lager was dan de drempelwaarde van NAP -0,70 m bij de getijmeetstations Schiermonnikoog, Lauwersoog en Nes. De vlieglijnen 1-5 (zuidoost) zijn ingevlogen bij een waterstand die alleen bij getijmeetstation Holwerd boven NAP -0,70 m was. Zowel de meetstations Nes als Holwerd zijn gelegen in het getijdebekken van Ameland waardoor er een faseverschil is tussen de getijcurves van deze stations en de stations die het getijdebekken van het Friesche Zeegat gelegen zijn. Een waterstand die iets boven NAP -0,70 m is bij station Holwerd is voor het inwinnen van de data geen probleem, zeker niet aangezien op dat moment de vlieglijnen in het zuidoostelijke gedeelte van het projectgebied zijn ingewonnen.



Figuur 2.1 Planning schema van de vlieglijnen (Aerodata, 2017).

De LiDAR opname van het najaar van 2017 is ook uitgevoerd door Aerodata, op 15, 17 en 18 oktober 2017. Een gedetailleerde beschrijving van het inwinnen en verwerken van deze dataset staat beschreven in Aerodata (2017b). De geplande vlieglijnen zijn gelijk aan de planning van de survey in het voorjaar (Figuur 2.1). De vlieglijnen zijn als volgt ingewonnen: 1-16 op 15 oktober, 22-33 op 17 oktober en 17-21 op 18 oktober. Iedere cross-lijn is op elke dag ingevlogen. Voor de planning van de vliegtijden is dit keer alleen gekeken naar de getijmeetstations Schiermonnikoog, Lauwersoog en Nes. Alle vlieglijnen zijn ingewonnen terwijl de waterstand op deze meetstations beneden het peil NAP -0,70 m was.

### 2.3 Levering data

De LiDAR data van de survey's van voor- en najaar 2017 zijn beide in het zelfde dataformaat opgeleverd aan Deltares:

1. Gegeorefereerde LiDAR punten per vlieglijn;
2. Gegeorefereerde LiDAR punten ingedeeld per tegel (kaartblad van 500x500 m);
3. Digitaal hoogtemodel (DEM) op een rooster van 1x1 m, ingedeeld per tegel;
4. De kaartbladindex als shapefile;
5. De werkelijk gevlogen vlieglijnen (omhullende van de puntenwolken), opgedeeld in vlieglijnen en geleverd als shapefile;
6. Multispectrale beelden, ingedeeld per tegel.

Hoewel de data in verwerkte vorm is opgeleverd (digitaal hoogtemodel op een rooster van 1x1 m) heeft Deltares dit jaar de gehele meetreeks (2010 t/m 2017) opnieuw verwerkt van de ruwe data (LAS-files). De verwerking wordt in de volgende paragraaf besproken.



## 2.4 Dataverwerking

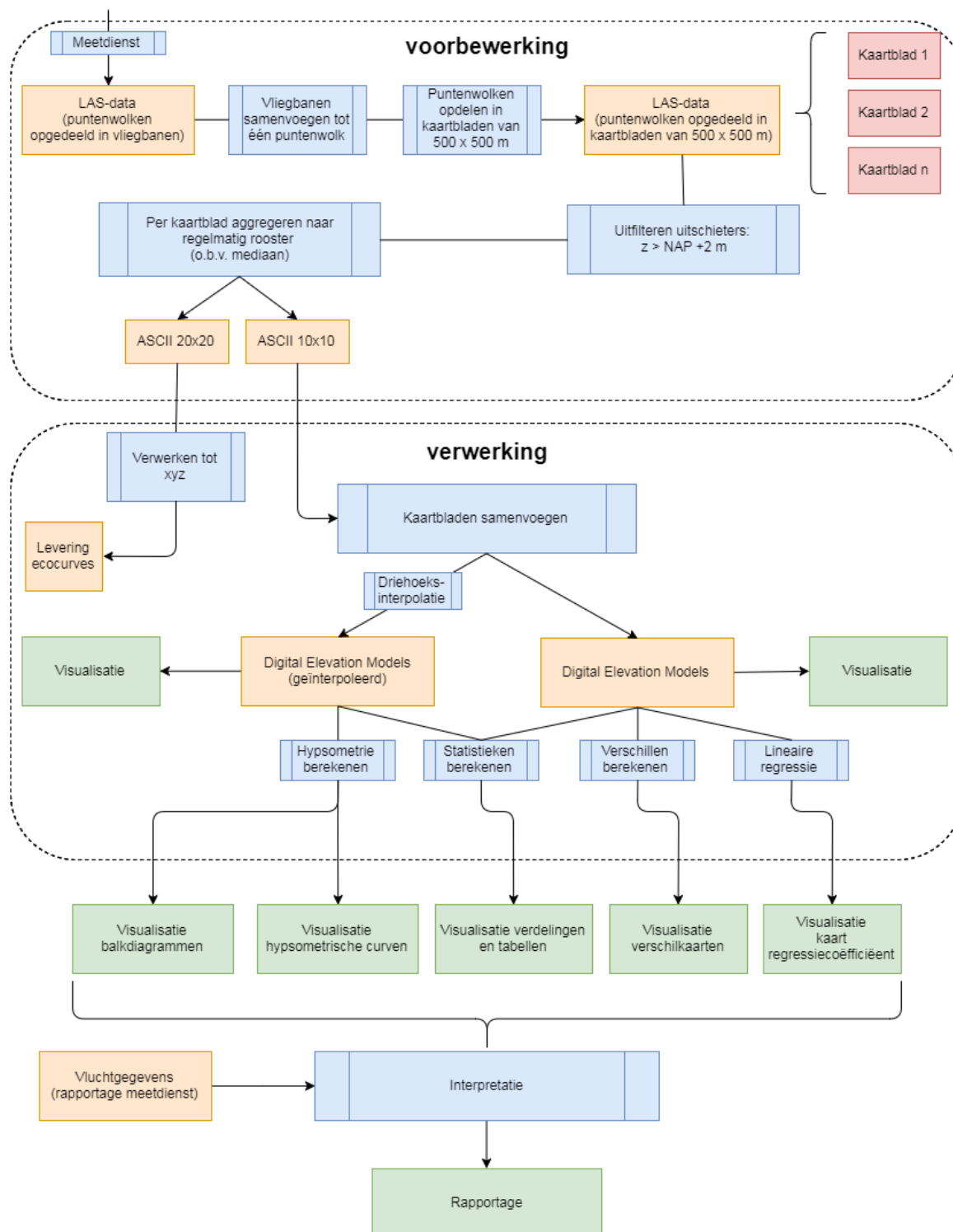
De LiDAR data wordt opgeslagen als LAS-punten (.LAS bestanden). Deze bestanden bevatten puntenwolken waar voor ieder punt x,y,z coördinaten bekend zijn als ook meta-informatie als vluchtlijn, tijd, returnnummer, intensiteit en scan-hoek. De LAS-puntenwolken moeten verwerkt worden tot punten op een regelmatig rooster (grid) zodat er een digitaal hoogtemodel (DEM) geconstrueerd kan worden. De digitale hoogtemodellen van verschillende LiDAR opnamen kunnen dan onderling vergeleken worden.

De datasets die vanaf 2010 tot en met 2015 verzameld werden door de meetdienst (Fugro, Eurosense) zijn verwerkt van LAS-punten naar een rooster van 1x1m. Tijdens de morfologische analyse die uitgevoerd is in 2017 (Schrijvershof et al., 2017) werd een gedeelte van de datasets niet aangeleverd als grid maar enkel als LAS-bestanden. Deltares heeft de datasets Najaar 2015, Voorjaar 2016 en Najaar 2016 toen verwerkt van LAS-punten tot grid van 1x1m roostercellen. De basis van de morfologische analyse is altijd gevormd door deze 1x1m grids die vervolgens geaggregeerd werden naar een rooster van 10x10m. De jaarlijkse morfologische analyse wordt uitgevoerd aan de hand van de 10x10m grids.

Voorheen werd de data opgewerkt van LAS-punten naar grid door de meetdienst (welke twee keer is gewisseld) en later door Deltares. Daardoor is het mogelijk dat de datasets niet op exact eenzelfde wijze zijn verwerkt. Tijdens de analyse van dit jaar is er daarom voor gekozen om de verwerking van alle LiDAR data opnieuw uit te voeren, op een consistente wijze vanaf de ruwe data. De ruwe data wordt gevormd door de LAS-punten die al wel een correctie zijn ondergaan die door de meetdienst is uitgevoerd. Deze correcties omvatten het kantelen van de individuele vliegbanen ten opzichte van elkaar, en het integraal corrigeren van de hoogte van de gehele puntenwolk aan de hand van de Ground Control Points (vanaf nu GCP's).

Omdat de verwerking is uitgevoerd voor alle datasets gaf dit ook de mogelijkheid enkele aanpassingen in de verwerkingsprocedure door te voeren die zorgen voor een verbetering van het resultaat (de digitale hoogtemodellen). Omdat een aanpassing in de verwerking effect kan hebben op de resultaten van de morfologische analyse is het belangrijk deze effecten te kennen. In Appendix B is er daarom een analyse beschreven naar de invloed van de keuzes in verwerkingsmethode op het resultaat.

De precieze stappen van dataverwerking, -nabewerking en analyse zijn samengevat om het proces van begin tot eind duidelijk en overzichtelijk weer te geven. Hiervoor is er een proceskaart opgesteld, weergegeven in Figuur 2.2.



Figuur 2.2 Proceskaart voor de voorbereiding, verwerking en analyse van de LiDAR data.

## 2.5 Digitale hoogtekarten en dekking

Het resultaat van de dataverwerking zijn datasets met x,y,z waarden op een rooster van 10x10 m cellen. In Figuur 2.3 zijn de verwerkte datasets gevisualiseerd als digitale hoogtebeelden voor alle LiDAR opnamen. In Appendix A zijn de kaarten getoond waarbij de datapunten < NAP -0,5 m zijn uitgefilterd. De belangrijkste reden om de kaartbeelden te tonen is om aan te geven dat de verwerkingsprocedure correcte datasets heeft opgeleverd. Daarnaast zijn er echter ook enkele belangrijke kenmerken van de datasets die aan de hand van deze kaarten inzichtelijk worden. Deze kenmerken zijn in voorgaande analyserapporten uitgebreid besproken en worden hier daarom alleen puntsgewijs aangegeven:

- Tijdens de dataverwerking zijn alle punten met een bodemniveau > NAP +2m verwijderd. Gebieden boven dit bodemniveau bevatten dus geen data, dit is bijvoorbeeld duidelijk te zien aan de duingebieden van Ameland en Schiermonnikoog.
- De vier oudste datasets bevatten relatief veel gaten (geen waarde voor de 10x10 m cellen), dit komt doordat er geen LiDAR punten binnen deze roostercellen gelegen zijn. De dichtheid van de puntenwolk is lager aan de randen van de vliegbanen, daardoor zijn de vliegbanen te herkennen in deze datasets. Vanaf 2013 is de puntendichtheid verbeterd door het gebruik van een ander type meetinstrument, de data in te winnen bij een lagere vlieghoogte en de vliegbanen meer te laten overlappen.
- Het valt op dat er lichtere stroken waar zijn te nemen binnen één dataset. Dit komt doordat het projectgebied in meerdere dagen wordt ingemeten en de hoogte van de waterspiegel in de geulen dus variabel is binnen één dataset.
- In de kaartbeelden van de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015 zijn er, in tegenstelling tot andere datasets, geen getijgeulen waar te nemen in het zuidwestelijke stuk van het projectgebied (Wierumerwad; kweldergebied bij Ternaard). Dit komt doordat enkele vliegbanen tijdens deze survey buiten het getijvenster gevlogen zijn en de hoogte van de waterspiegel daardoor op het moment van inwinnen boven het niveau NAP -0,70 m was. Het hoogtebeeld geeft hier dus niet de hoogte van de wadplaten maar van de waterspiegel, deze twee datasets worden daarom niet gebruikt voor de morfologische analyse.

De digitale hoogtebeelden van de nieuwe datasets (voor- en najaar 2017) geven een correcte weergave van de wadplaten in het projectgebied. Deze datasets kunnen dus gebruikt worden om de morfologische analyse over een langere periode door te trekken.

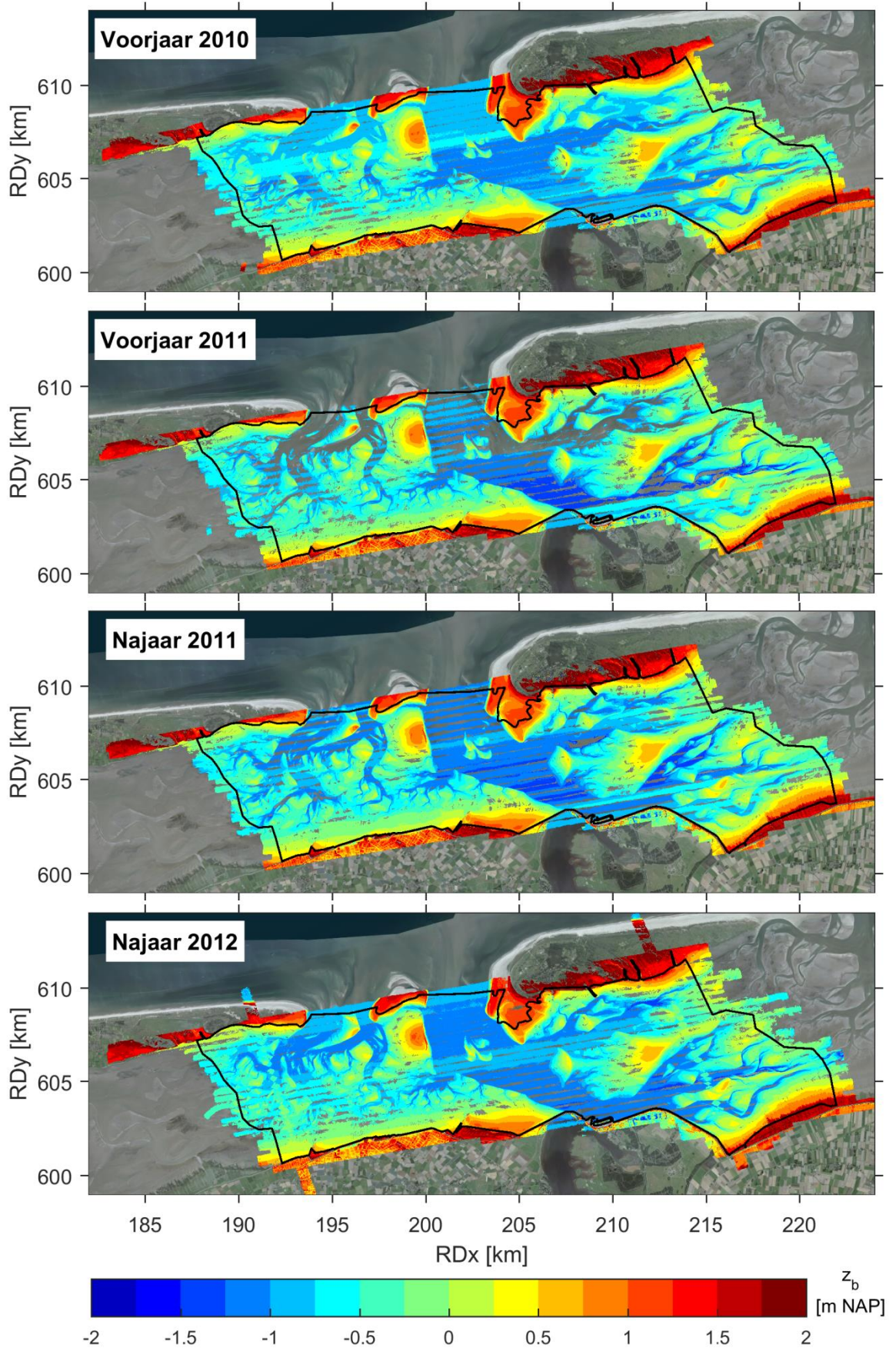
Het percentage van de 10x10 m roostercellen dat een waarde heeft gekregen tijdens de verwerking kan berekend worden. Dit is voor alle datasets weergegeven in de tweede kolom van Tabel 2.1. Uit de tabel komt duidelijk naar voren dat de dekking sinds 2013 aanzienlijk verbeterd is. In de derde kolom staat aangegeven welk percentage van de cellen een waarde heeft nadat alle punten met een waarde < NAP -0,5 m verwijderd zijn. Dit percentage geeft een indicatie welk gedeelte van het projectgebied uit wadplaat boven het peil NAP -0,5 m bestaat, dit is iets meer dan 50%. De vierde kolom geeft voor de geïnterpoleerde datasets het percentage cellen boven NAP -0,5 m. Voor de recentere datasets (sinds 2013) is dit percentage vrijwel gelijk aan het percentage van de originele datasets (zie ook de laatste kolom). Voor de oudere datasets (2010 -2012) is het verschil relatief groot. Dit betekent dat voor een groter gebied de waarde van cellen niet direct is gebaseerd op data gemeten in dat gebied, maar door middel van interpolatie van nabijgelegen roostercellen. Deze geïnterpoleerde datasets zijn daardoor minder betrouwbaar dan de recentere geïnterpoleerde datasets.

Het percentage cellen binnen het projectgebied dat voor iedere LiDAR opname een waarde heeft is eveneens berekend, dit is 70,18%. Deze waarde is na filtering van de punten onder

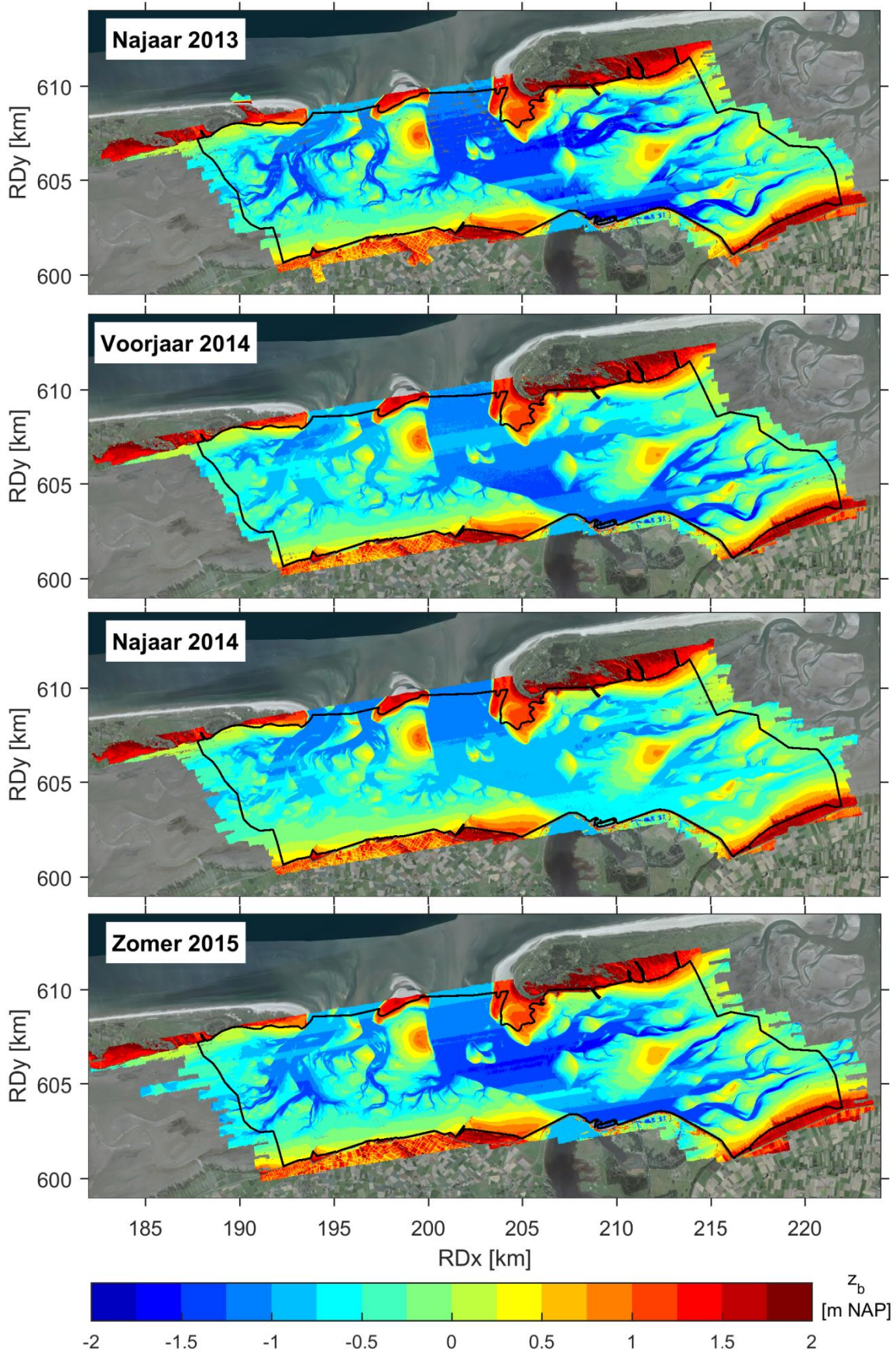
NAP -0,5 m 37,16%. Het percentage wadplaat boven NAP -0,5 m in het projectgebied is ongeveer 50% (zie kolom 3 in Tabel 2.1), voor ongeveer driekwart (37%/50%) van het areaal wadplaat boven dit referentievlak is er dus een waarde bekend voor de gehele meetreeks.

Tabel 2.1 Percentage cellen met waarden binnen de gecombineerde polygoon van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag, zowel voor als na filtering van bodemhoogtepunten < NAP -0,5 m.

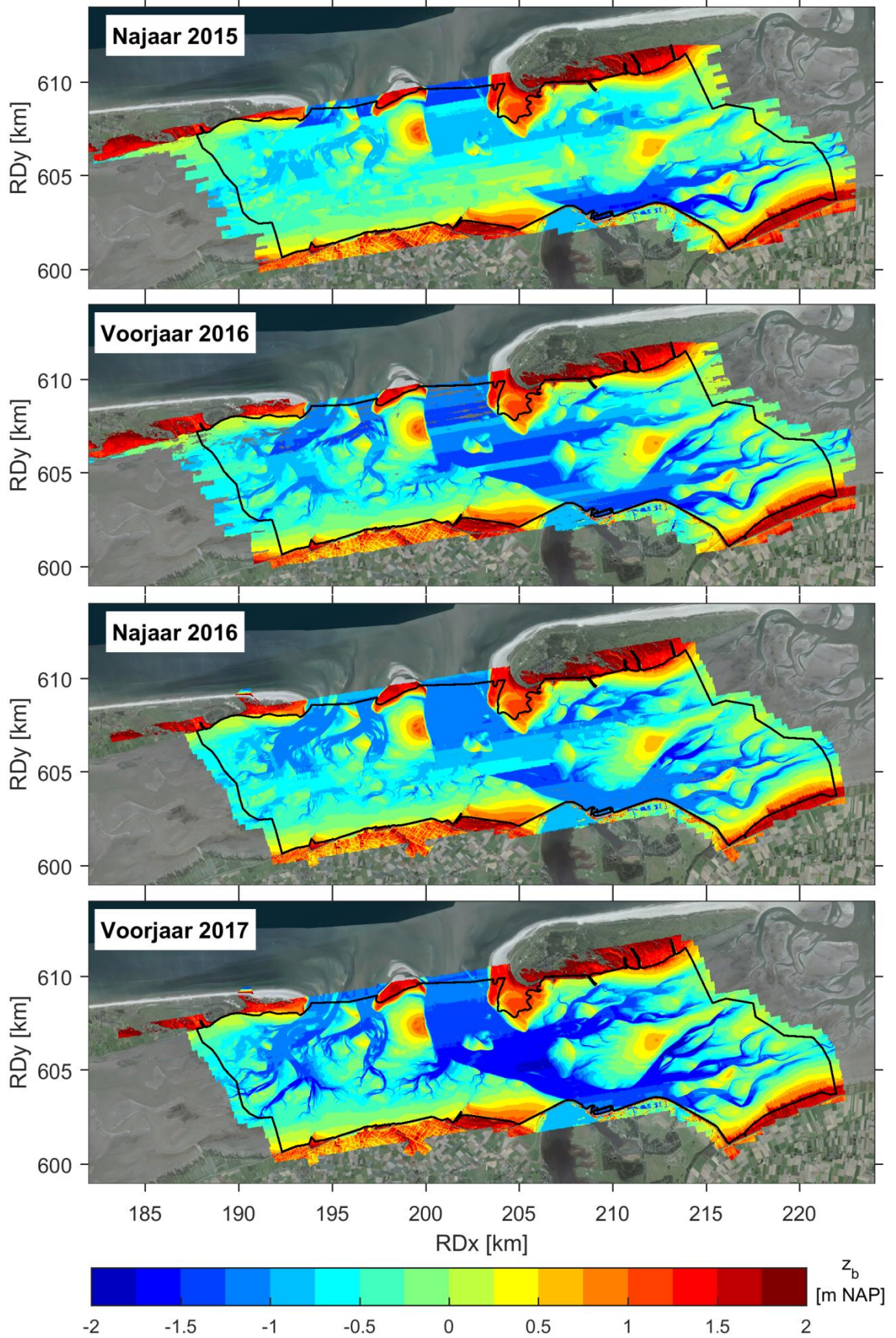
| LiDAR opname  | Dekking [%] |  |  | Verskil dekking [%]<br>Verskil<br>geïnterpoleerd – niet<br>geïnterpoleerd |
|---------------|-------------|--|--|---|
|               | In polygoon | In polygoon<br>(z <sub>b</sub> > NAP -0,5 m) | In polygoon<br>(z <sub>b</sub> > NAP -0,5 m)<br>Geïnterpoleerd |   |
| Voorjaar 2010 | 92,82       | 50,39  | 53,37  | 2,98  |
| Voorjaar 2011 | 80,37       | 50,08  | 53,27  | 3,19  |
| Najaar 2011   | 90,42       | 50,75  | 53,18  | 2,44  |
| Najaar 2012   | 91,86       | 50,52  | 53,59  | 3,06  |
| Najaar 2013   | 98,42       | 52,94  | 53,34  | 0,40  |
| Voorjaar 2014 | 99,76       | 53,72  | 53,92  | 0,20  |
| Najaar 2014   | 99,83       | 56,45  | 56,58  | 0,13  |
| Zomer 2015    | 99,82       | 51,44  | 51,59  | 0,15  |
| Najaar 2015   | 99,86       | 63,19  | 63,30  | 0,10  |
| Voorjaar 2016 | 98,28       | 51,93  | 52,21  | 0,28  |
| Najaar 2016   | 99,67       | 51,05  | 51,13  | 0,08  |
| Voorjaar 2017 | 99,91       | 51,48  | 51,22  | 0,26  |
| Najaar 2017   | 99,88       | 51,14  | 51,22  | 0,08  |

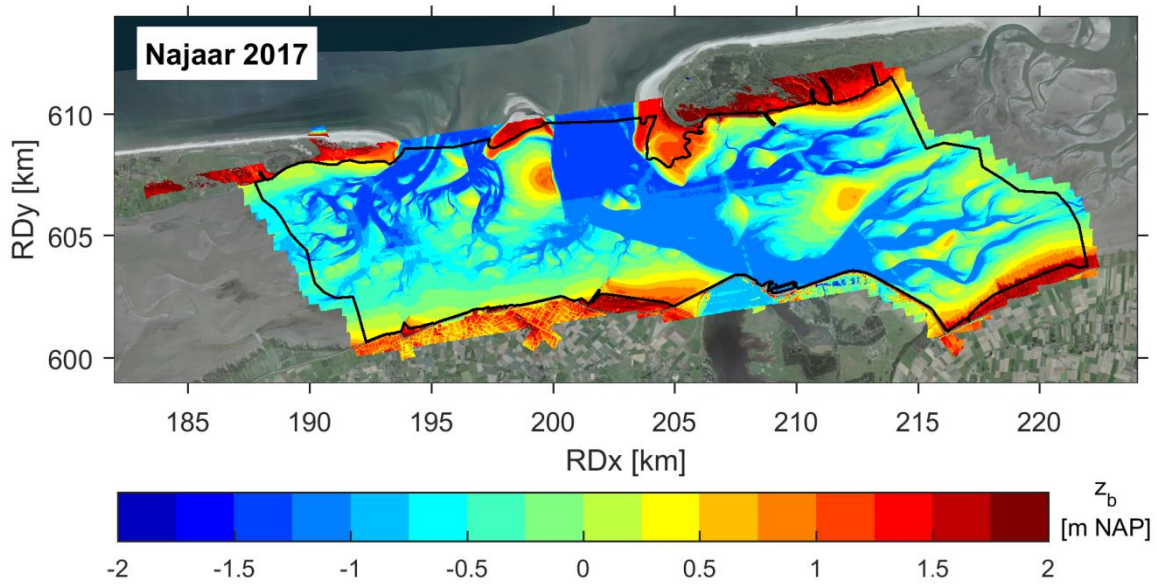












Figuur 2.3 Digitaal hoogtebeeld van alle LiDAR opnamen.

### 3 Analyse bodemhoogteverandering

#### 3.1 Inleiding

De digitale hoogtebeelden (Figuur 2.3) kunnen van elkaar afgetrokken worden waardoor datasets van verschilpunten ontstaan. Deze verschillen kunnen positief (bodemverhoging) of negatief (bodemverlaging) zijn. De verschillen die op deze manier worden berekend kunnen veroorzaakt worden door:

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

In dit hoofdstuk worden de verschillen weergegeven en wordt geanalyseerd of er trends te ontdekken zijn in de gemeten veranderingen. In Hoofdstuk 5 wordt een analyse uitgevoerd naar de verklaring van de gemeten veranderingen. In dat hoofdstuk wordt, wanneer mogelijk, aangegeven of er een correlatie bestaat tussen bovengenoemde factoren en het gemeten verschil in morfologie van de wadplaten.

Voor dit onderdeel van de morfologische analyse wordt de dataset gebruikt waarbij de geen-data-punten niet zijn opgevuld met behulp van interpolatie.

### 3.2 Bodemhoogteverschillen

De digitale hoogtebeelden kunnen onderling allemaal van elkaar afgetrokken worden en zo kunnen datasets van verschilpunten gemaakt worden. Voor de morfologische analyse wordt er gezocht naar verandering over een zo lang mogelijke periode. Verschillen veroorzaakt door bodemdaling worden namelijk steeds groter en zijn over een langere periode daarom beter te detecteren in de data. De metingen worden sinds 2010 uitgevoerd, het is dus logisch om de verschillen ten opzichte van deze eerste dataset te berekenen. In Tabel 2.1 en Figuur 2.3 is echter aangetoond dat deze dataset veel punten heeft waarop geen data bekend is. Verschillen berekenen ten opzichte van deze dataset zou dus veel punten opleveren zonder data. Om dit probleem te overkomen worden de verschillen berekend met de meest recente correcte dataset. Dit is de dataset van de survey van het najaar van 2017.

#### 3.2.1 Verdeling verschillen

De verdeling van de verschillen van de datasets kan worden samengevat aan de hand van de beschrijvende statistische parameters. In Figuur 3.1 zijn deze parameters gevisualiseerd als boxplots van iedere verschildataset van de survey van Najaar 2017 minus alle voorgaande datasets. Daarbij is gedifferentieerd in datapunten die binnen de polygonen van het kombergingsgebied Pinkegat en de Zoutkamperlaag gelegen zijn (zie Figuur 1.2). Een gemiddeld (mediaan) bodemhoogteverschil dat kleiner is dan 0 betekent dat de gemiddelde (mediane) bodemligging in de opname van het najaar van 2017 lager gelegen is dan in een voorgaande opname.

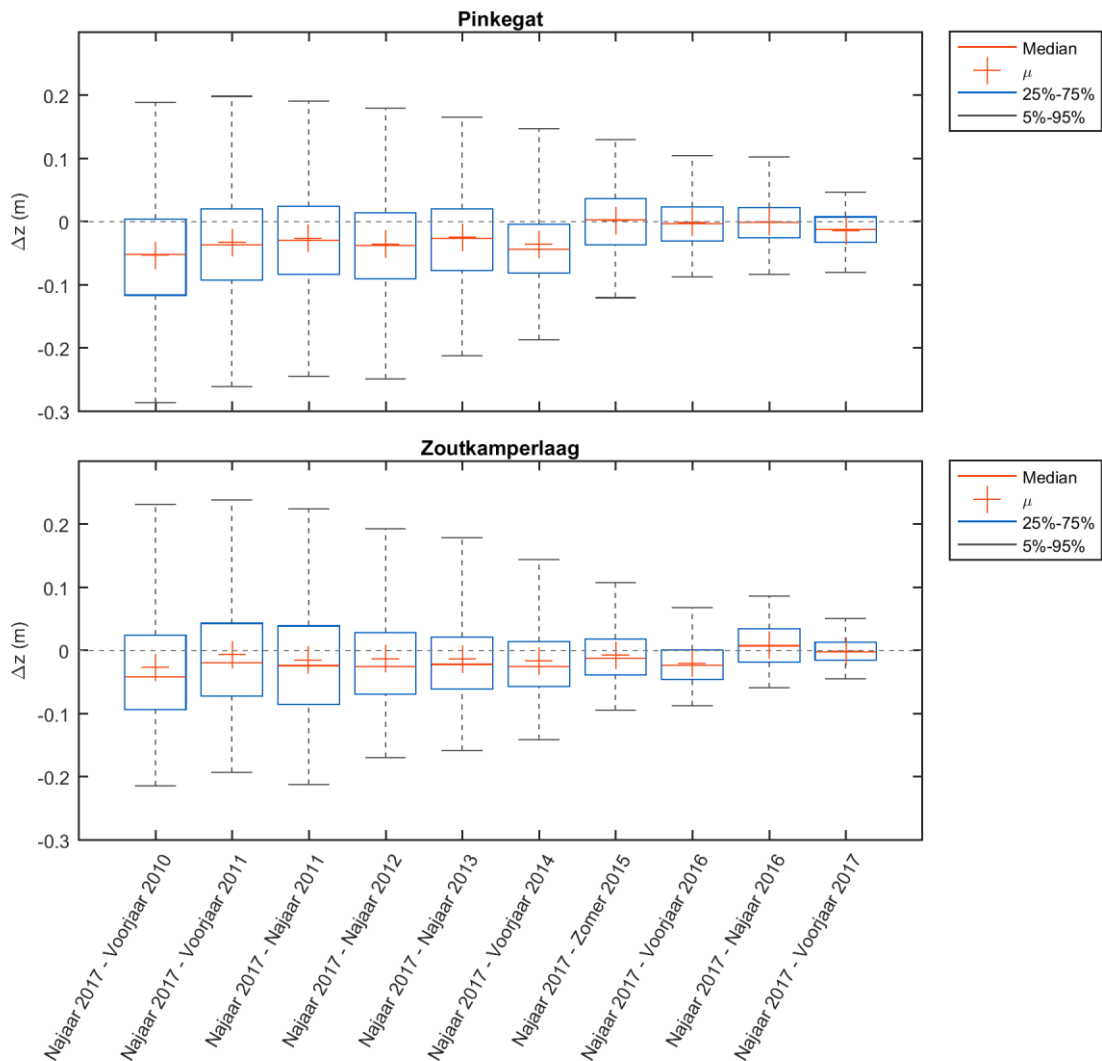
Figuur 3.1 toont dat de spreiding in de verschillen steeds groter wordt naarmate de tijdreeks langer wordt. Dit is te verwachten aangezien er over een langere periode meer morfologische verandering optreedt. Zowel in het Pinkegat als in de Zoutkamperlaag is de toename in spreiding ongeveer gelijk.

De gemiddelde en mediane bodemhoogte is in de survey's van 2010 t/m voorjaar 2014 hoger gelegen dan in het najaar van 2017 (het verschil van de bodemligging is kleiner dan 0). Dit is zowel het geval in het kombergingsgebied van het Pinkegat als van de Zoutkamperlaag. Het gemiddeld bodemniveau schommelt rond dezelfde waarde in deze periode maar daarna is er in het Pinkegat een duidelijke sprong waar te nemen in het gemiddeld bodemniveau (van Voorjaar 2014 naar Zomer 2015). Deze sprong deelt de dataset op in een gedeelte van 2010 t/m 2014, en vanaf 2015 t/m 2017. Deze sprong in het bodemniveau is ook waargenomen aan de hand van de hypsometrische curven tijdens een eerdere analyse (Schrijvershof en Vroom, 2016) maar werd toen nog toegeschreven aan de (on)nauwkeurigheid van de meetgegevens. In de Zoutkamperlaag is er in deze periode ook éénzelfde fluctuatie in de gemiddelde bodemligging waar te nemen maar deze is minder groot, dit komt deels doordat het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag veel groter is dan het Pinkegat.

De grote fluctuaties in het bodemniveau zijn verder uitgelicht door op eenzelfde wijze de beschrijvende statistische parameters te visualiseren van opeenvolgende datasets (Figuur 3.2). De figuur laat zien dat er vaker grote fluctuaties tussen datasets zijn waar te nemen. De fluctuatie van 2014 naar 2015 in het Pinkegat is echter wel uitzonderlijk groot (~5 cm). In de periode daarna (Voorjaar 2016) is er vervolgens weer een grote (~5 cm) gemiddelde bodemverhoging waar te nemen. De figuur laat eveneens zien dat fluctuaties tussen survey's nagenoeg gelijk zijn voor beide kombergingsgebieden. De beide kombergingsgebieden reageren dus op eenzelfde wijze op de oorzaak (of oorzaken) van deze fluctuaties.

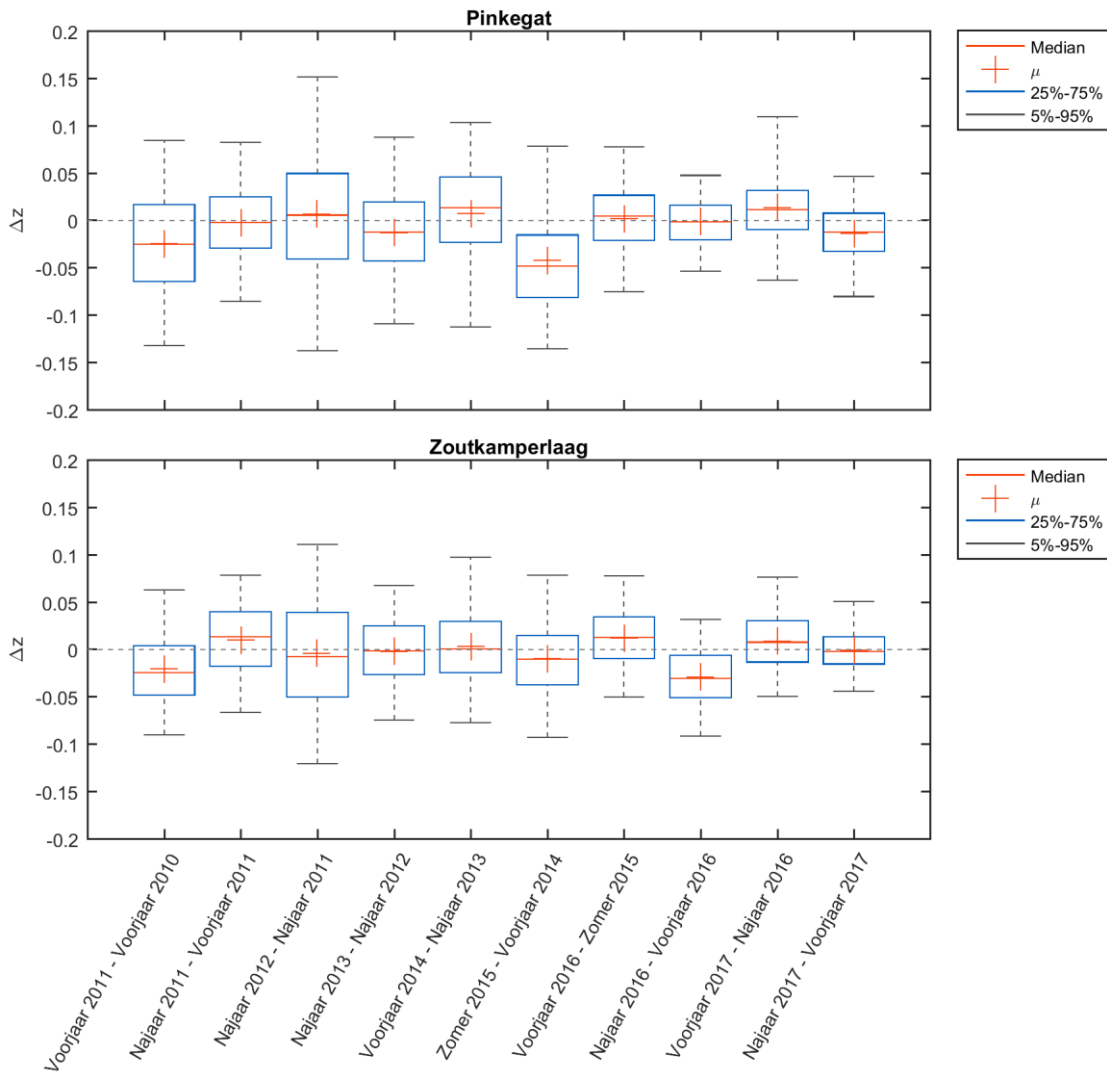
De visualisatie van de beschrijvende statistische parameters geeft een eerste indicatie van de ontwikkelingsrichting van het gemiddeld bodemniveau van de kombergingsgebieden. Het is

aan de hand van dergelijke analyses niet mogelijk aan te geven waar deze zich (ruimtelijk) bevinden in de dataset. Hiervoor is een ruimtelijke analyse van de bodemveranderingen nodig.



Figuur 3.1 Boxplots van de bodemhoogteverschillen van alle LiDAR opnamen met de laatste opname van Najaar 2017, gedifferentieerd voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.





Figuur 3.2 Boxplots van de bodemhoogteverschillen van alle opeenvolgende LiDAR opnamen, gedifferentieerd voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag.



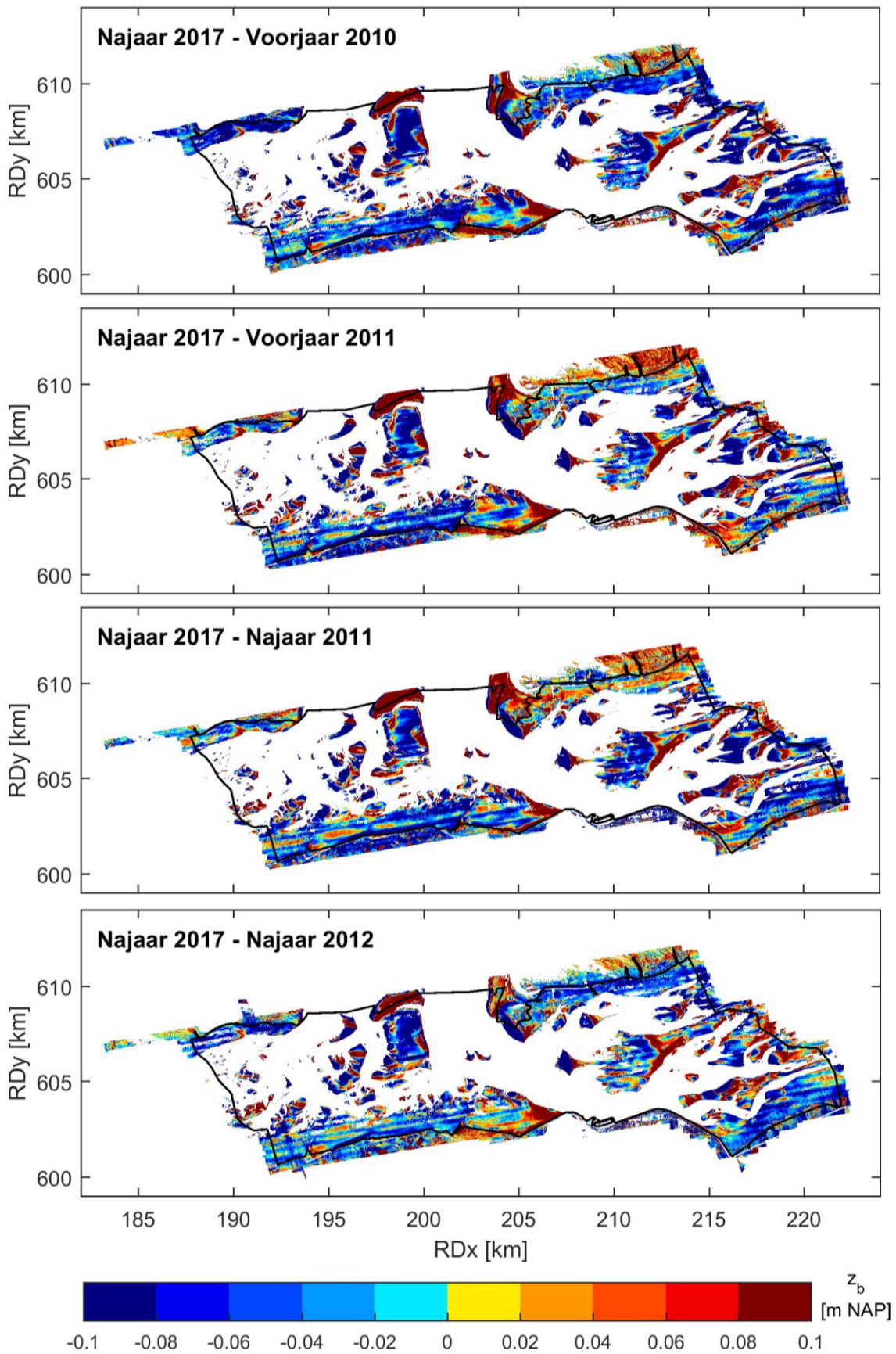
### 3.2.2 Erosie- sedimentatiekaarten

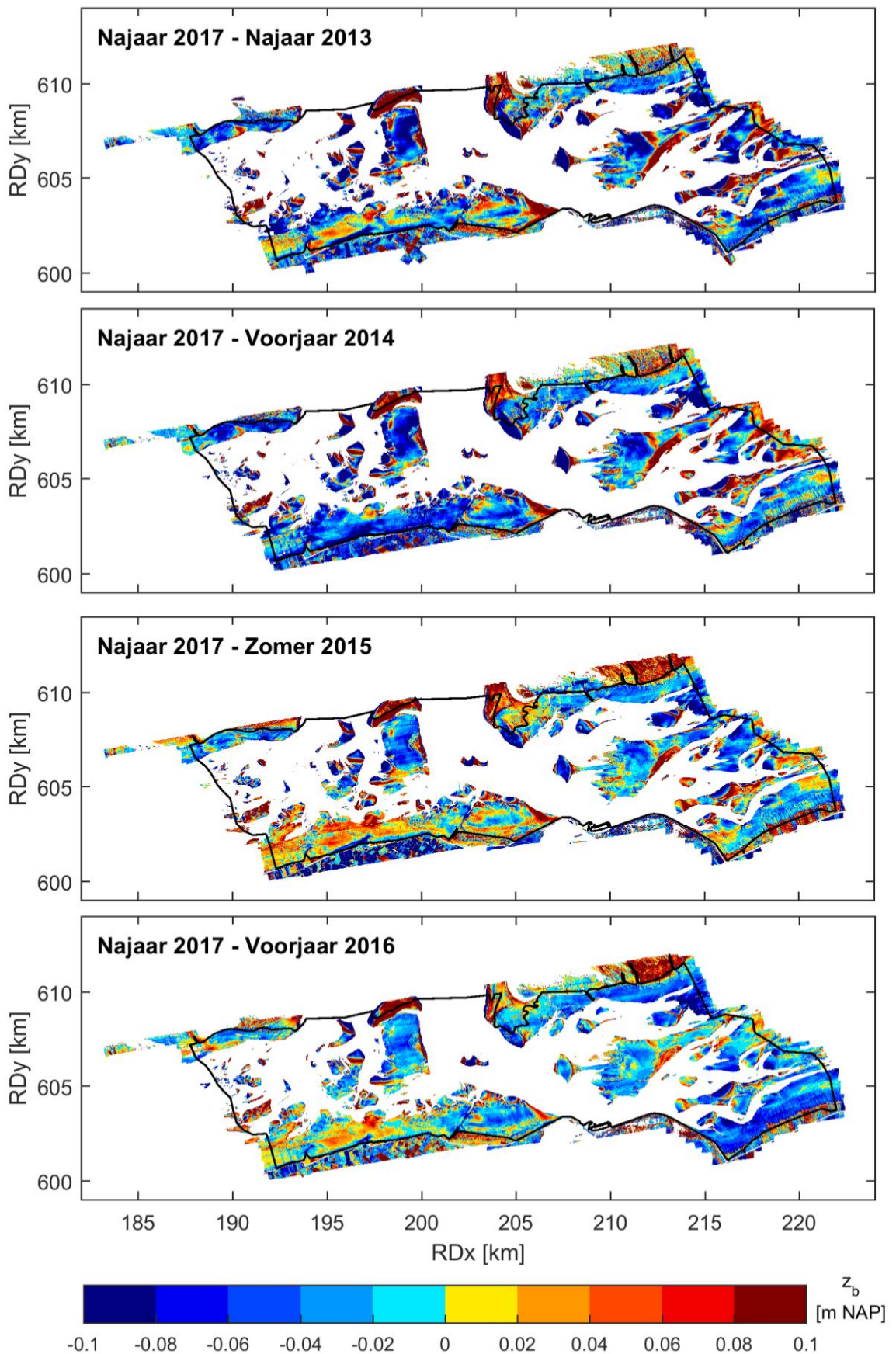
Een ruimtelijke analyse van bodemhoogteverschillen werd in voorgaande analyserapporten gegeven aan de hand van erosie-sedimentatiekaarten: kaartbeelden die het verschil in bodemhoogte weergeven als bodemverhoging (sedimentatie, rode kleur) of bodemverlaging (erosie, blauwe kleur). Het is echter gebleken dat deze kaarten, gegenereerd aan de hand van de LiDAR datasets, moeilijk te interpreteren zijn in termen van morfologische verandering. Dit komt doordat het beeld gedomineerd kan worden door veranderingen die niet het gevolg zijn van morfologische dynamiek. In de oudere datasets zijn dit voornamelijk veranderingen veroorzaakt door streepatronen in de richting van de vliegbanen. In Schrijvershof et al. (2017) zijn de morfologische ontwikkelingen binnen het bekken inzichtelijk gemaakt door trends in bodemhoogteverandering te berekenen, in deze rapportage wordt dit opnieuw uitgevoerd met de recentere datasets toegevoegd (§3.3).

In de vorige morfologische analyse (Schrijvershof et al., 2017) is aan de hand van de erosie-sedimentatiekaarten echter het vermoeden ontstaan dat er een systematische fout zit in de dataset van voorjaar of najaar 2016. Omdat dergelijke afwijkingen duidelijk kunnen worden uit deze kaartbeelden zijn de kaarten in deze rapportage wel getoond (Figuur 3.3).

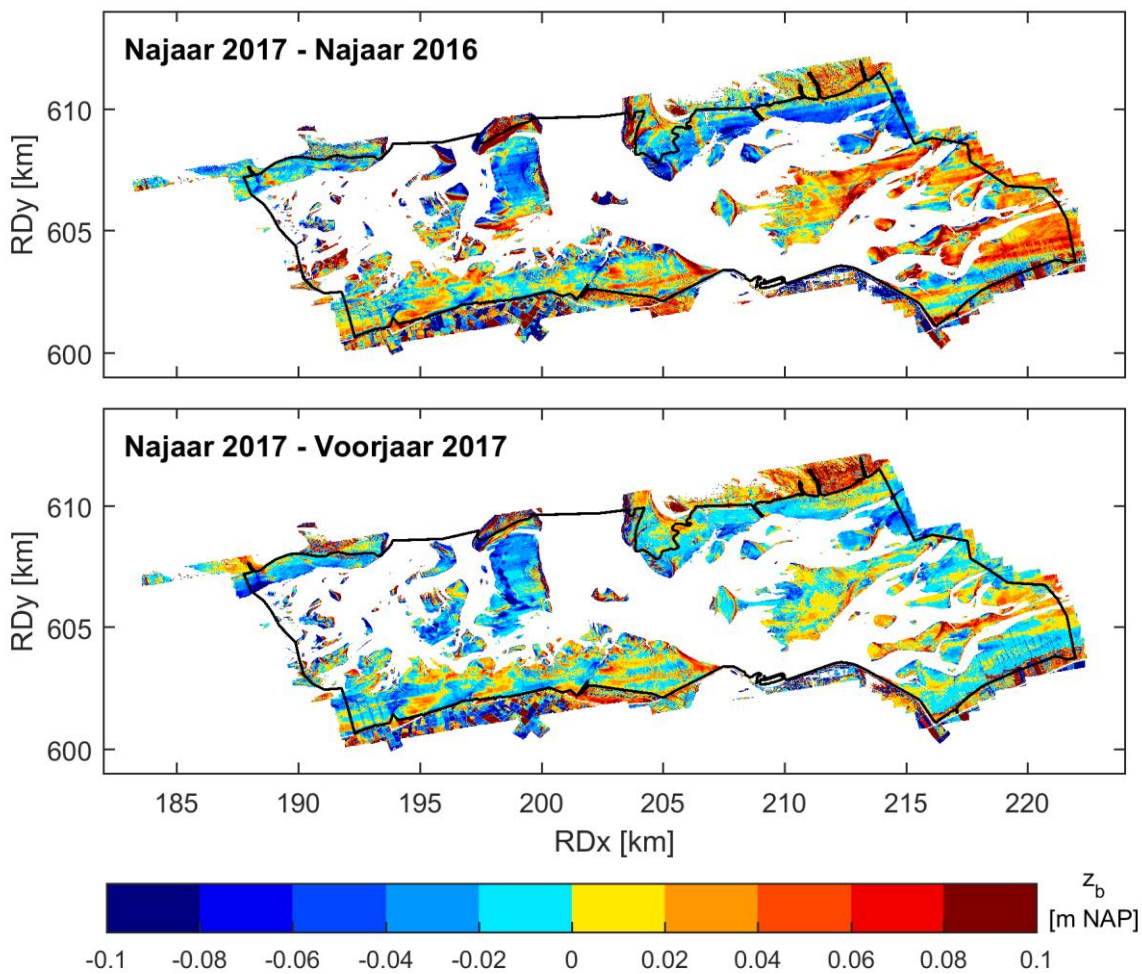
De erosie-sedimentatiekaarten van Voorjaar 2016 en Najaar 2016 met de meest recente survey (Najaar 2017) laten overwegend respectievelijk erosie en sedimentatie zien in het zuidoosten van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. Het vermoeden blijft hierdoor bestaan dat er een systematische fout zit in deze datasets. Omdat de grootte van de systematische afwijking gemiddeld niet groter is dan enkele centimeters, en omdat de oorzaak niet bekend is, worden de datasets niet afgekeurd voor de morfologische analyse.

De verwerking van de datasets is dit jaar opnieuw uitgevoerd door alle datasets vanaf de ruwe data (LAS-punten) te verwerken. De verwerkingsprocedure is dus consistent voor alle datasets. Het kan daarom uitgesloten worden dat een dergelijke systematische afwijking het gevolg is van deze verwerkingsstap. De voorbereiding die door de meetdienst uitgevoerd wordt op de ruwe LAS-punten is waarschijnlijk niet consistent voor alle datasets. Deze voorbereiding betreft het corrigeren van de vliegbanen ten opzichte van elkaar en het integraal corrigeren van de hoogte van de puntenwolk aan de hand van de GCP-punten. Mogelijk kan het verschil in deze voorbereidingsstap de systematische afwijking verklaren.









Figuur 3.3 Erosie- sedimentatiekaarten voor de verschildatasets van de LiDAR opname van najaar 2017 met alle voorgaande opnamen.

### 3.3 Trends in bodemhoogteverandering

De verandering van het bodemniveau op iedere 10x10m roostercel kan worden weergegeven als verloop in de tijd. Op deze tijdserie kan vervolgens een regressie-analyse uitgevoerd worden om trends in de beweging van het bodemniveau te achterhalen. Een voordeel van deze methode is dat alle datasets worden meegenomen en dat uitschieters een beperkter effect hebben dan het geval is bij de erosie-sedimentatiekaarten. De verandering in het bodemniveau is op iedere roostercel benaderd door een lineaire trend. Hoewel de cyclus van erosie en sedimentatie van de wadplaten geen lineaire verandering van het bodemniveau hoeft te veroorzaken, is een lineaire trend wel een goede eerste benadering van de verandering van de bodemhoogte.

Figuur 3.4 toont het resultaat van de lineaire trendanalyse, ruimtelijk weergegeven als de benaderde lineaire verandering van het bodemniveau. Omdat een lineaire regressie niet altijd een goede benadering geeft van de verandering van het bodemniveau is de determinatiecoëfficiënt daaronder weergegeven, deze geeft dus weer of de weergegeven erosie-sedimentatiesnelheid een correcte weergave is van de verandering van het bodemniveau. In Figuur 3.6 is de trendanalyse weergegeven waarbij er is ingezoomd op de vijf controledeelgebieden (zie Figuur 1.2).

Er zijn een aantal morfologische veranderingen die duidelijk naar voren komen uit de lineaire trendanalysekaarten. Deze morfologische ontwikkelingen worden hieronder puntsgewijs beschreven per kombergingsgebied (zie voor de benaming van morfologische eenheden Figuur 1.3).

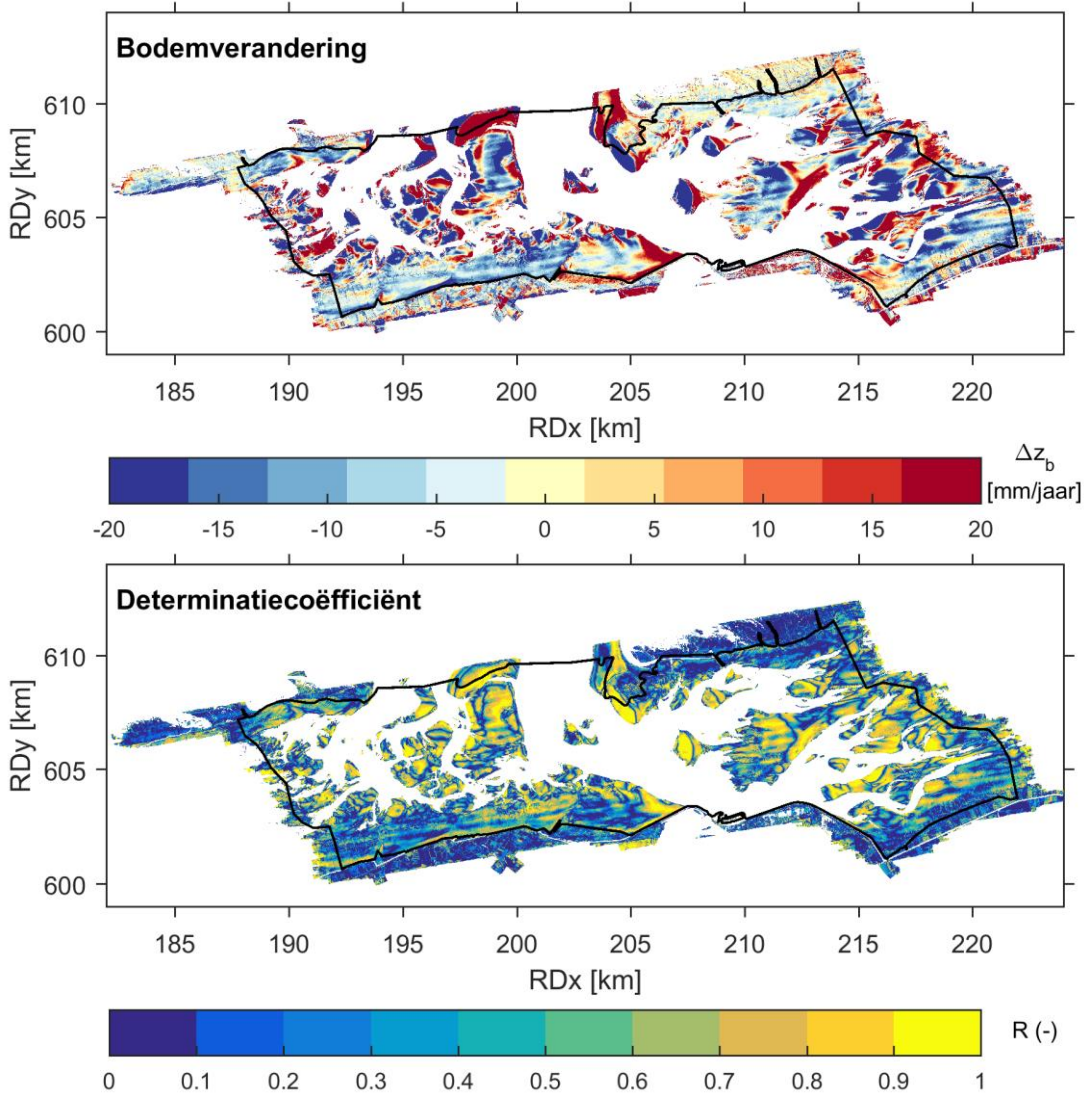
#### Kombergingsgebied Pinkegat

- Er is sedimentatie waar te nemen aan de zuidkant van Het Rif. Dit komt doordat het rif zuidelijk migreert en daarbij het Smeriggat dichtdrukt.
- De Engelsmanplaat laat een trendmatige lineaire verlaging van ongeveer 20 mm/jaar zien. Deze verlaging wordt goed weergegeven door de lineaire trend analyse.
- Het overgrote deel van het Wierumerwad (deelgebied Paesens) wordt gekarakteriseerd door een verlaging van het bodemniveau, de lineaire trend is echter op veel locaties geen juiste benadering van de trend ( $R^2 < 0,2$ ).
- De kleinere platen in het centrale gedeelte van het Pinkegat migreren en vertonen een afwisseling van bodemverhoging en –verlaging, dit is het gevolg van migratie van deze platen.

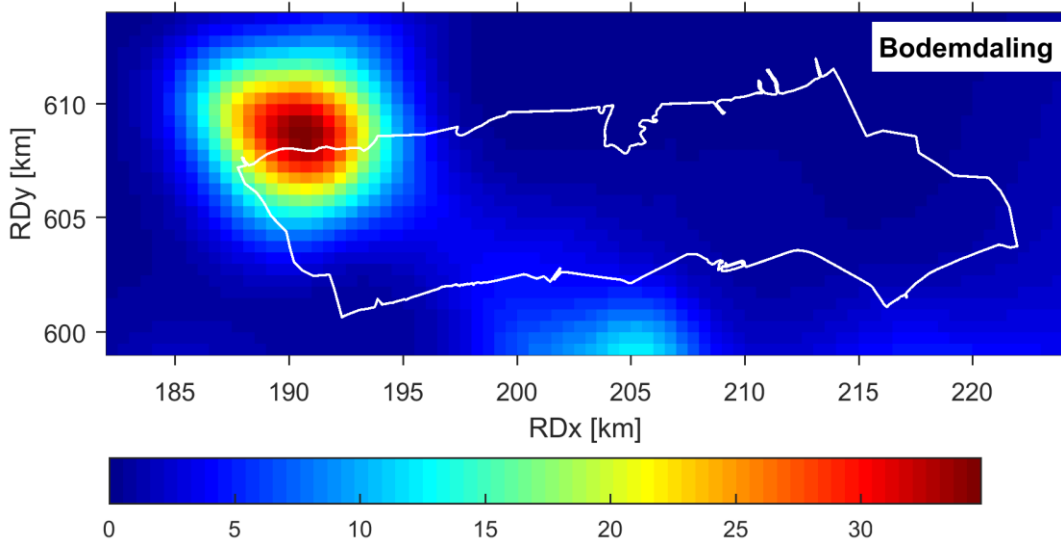
#### Kombergingsgebied Zoutkamperlaag

- Er is erosie aan de westkant en sedimentatie aan de oostkant van het Roode Hoofd waar te nemen. Dit komt doordat het Roode Hoofd in zijn geheel in oostelijke richting migreert.
- Er is bodemverlaging aan de westkant en bodemverhoging aan de oostelijke kant van het Brakzand. De lineaire trend fit hier goed. De veranderingen in bodemniveau zijn het gevolg van het oostwaarts migreren van het Brakzand.
- Er is erosie aan de westkant en sedimentatie aan de oostkant van de Oude Wal. De punt migreert in oostelijke richting.

In Figuur 3.5 is de gemeten en berekende diepe bodemdaling weergegeven (Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., 2017). Door deze figuur te vergelijken met Figuur 3.4 kan er geconcludeerd worden dat de bodemdalingsschotels niet herkend kunnen worden in de verandering van het bodemniveau van de wadplaten zoals deze naar voren komt uit de lineaire trendanalyse.

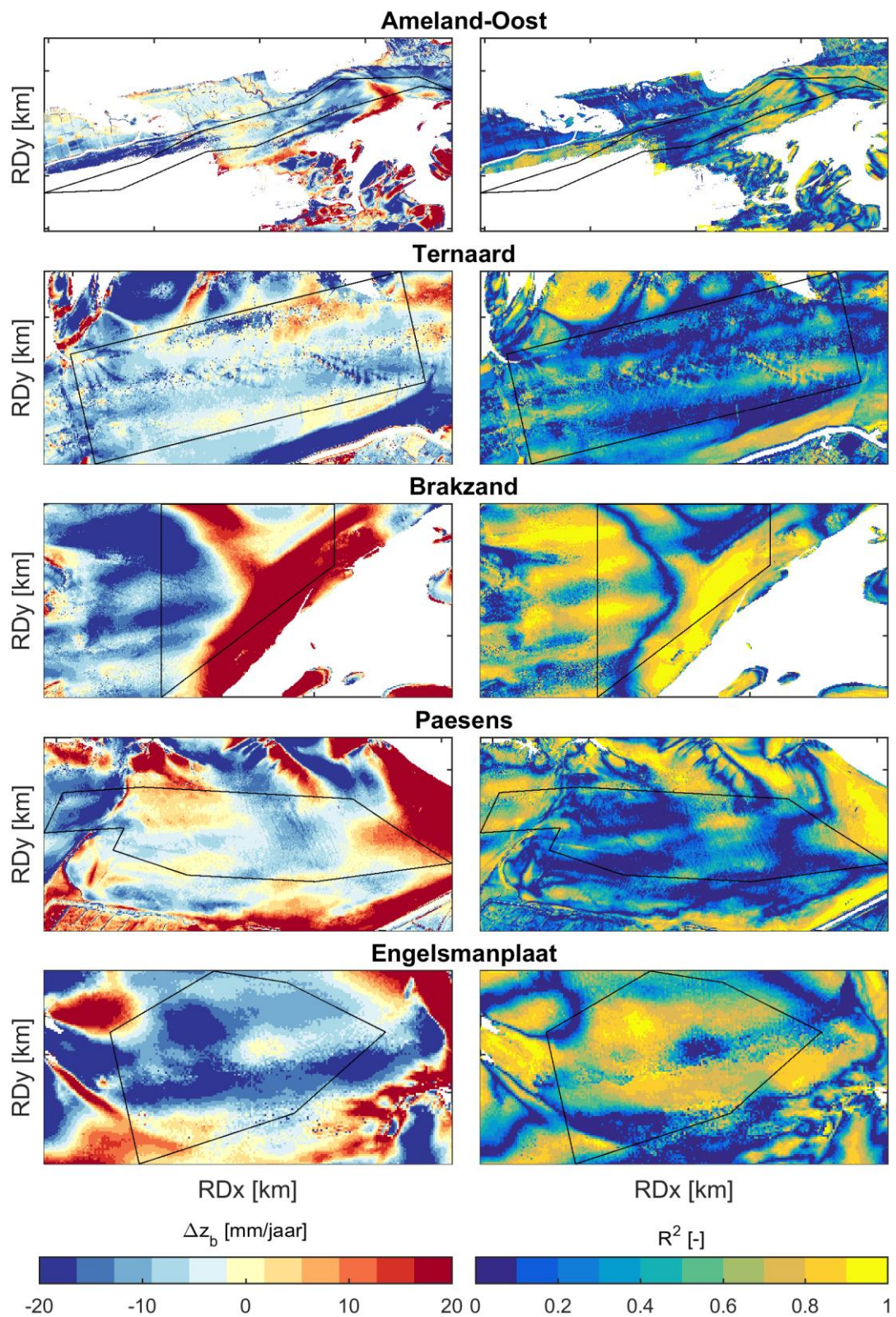


Figuur 3.4 Ruimtelijk patroon van lineaire trend (boven) en de determinatiecoëfficiënt (midden).



Figuur 3.5 Bodemdaling van de start van de productie (2007) tot heden (1-1-2017) (Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., 2017).





Figuur 3.6 Lineaire trend (links) en determinatiecoëfficiënt ( $R^2$ , rechts) van de vijf deelgebieden.



## 4 Analyse hypsometrie

### 4.1 Inleiding

De hypsometrie van de kombergingsgebieden wordt onderzocht aan de hand van hypsometrische curven en tijdseries van het areaal boven een referentievlak. Hypsometrische curven geven de cumulatieve areaalverdeling in relatie tot de hoogte. De tijdseries worden weergegeven omdat deze een duidelijker beeld geven van de ontwikkeling van het areaal. De hypsometrische berekeningen worden uitgevoerd over een specifiek gebied dat wordt aangegeven door middel van polygonen. De polygonen van de kombergingsgebieden en de vijf kleinere deelgebieden zijn gevisualiseerd in Figuur 1.2.

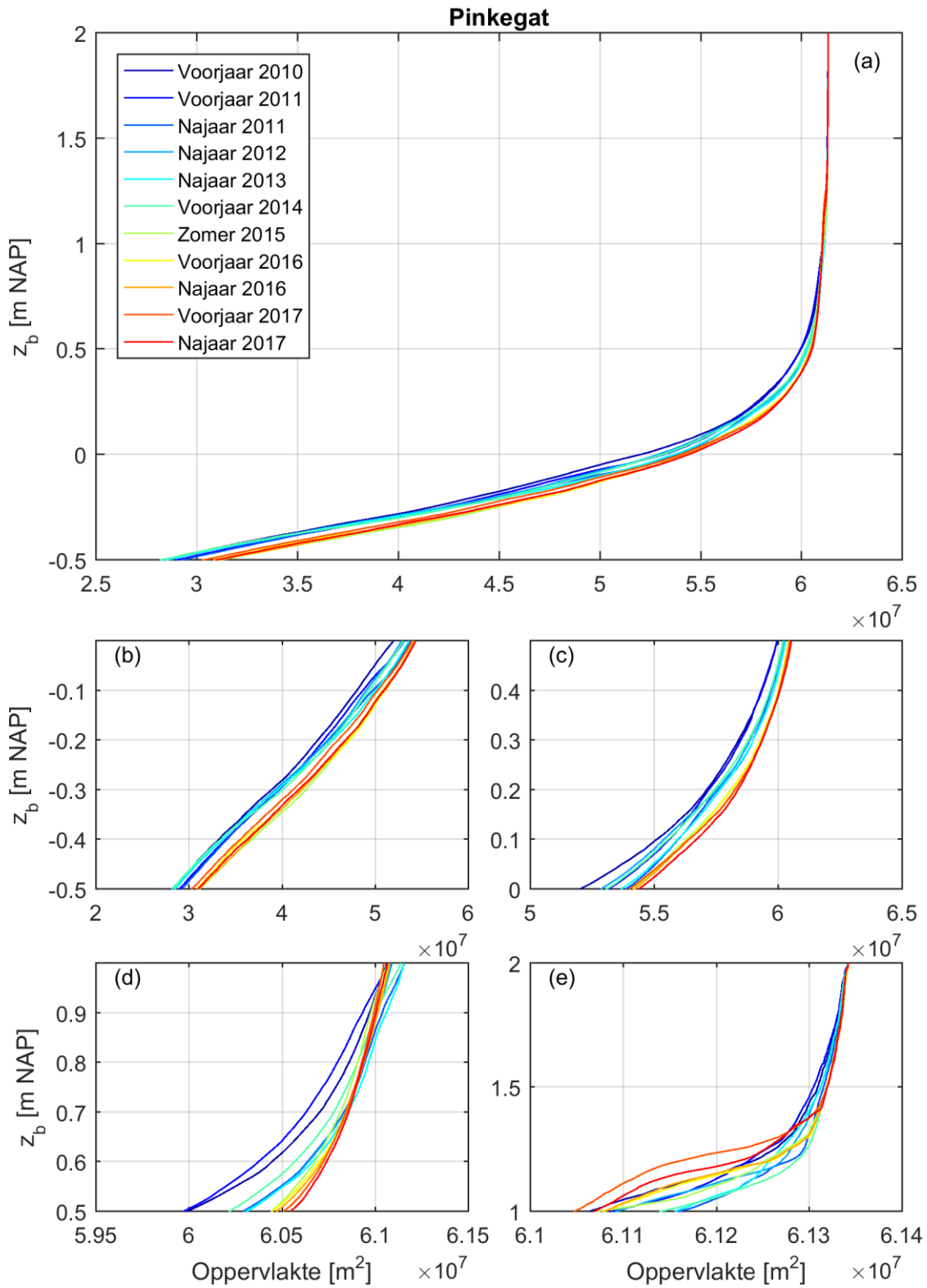
De hypsometrische curven worden berekend door het areaal boven een specifiek referentievlak te berekenen, en dit referentievlak vervolgens op te schuiven. De curven worden berekend van bovenaf (i.e. het referentievlak wordt van boven naar beneden geschoven). De data van het hoger gelegen wad geeft namelijk met grotere nauwkeurigheid de hoogteligging van het wad weer (Schrijvershof et al., 2017). De waarden van de hypsometrische curven worden vervolgens van het totale areaal van het kombergingsgebied afgetrokken. Door deze manier van berekenen kunnen de curven zo weergegeven worden dat ze aanduiden hoe groot het areaal is binnen het kombergingsgebied dat lager gelegen is dan een specifieke waarde.

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 een interpolatieslag is uitgevoerd om de gaten op te vullen.

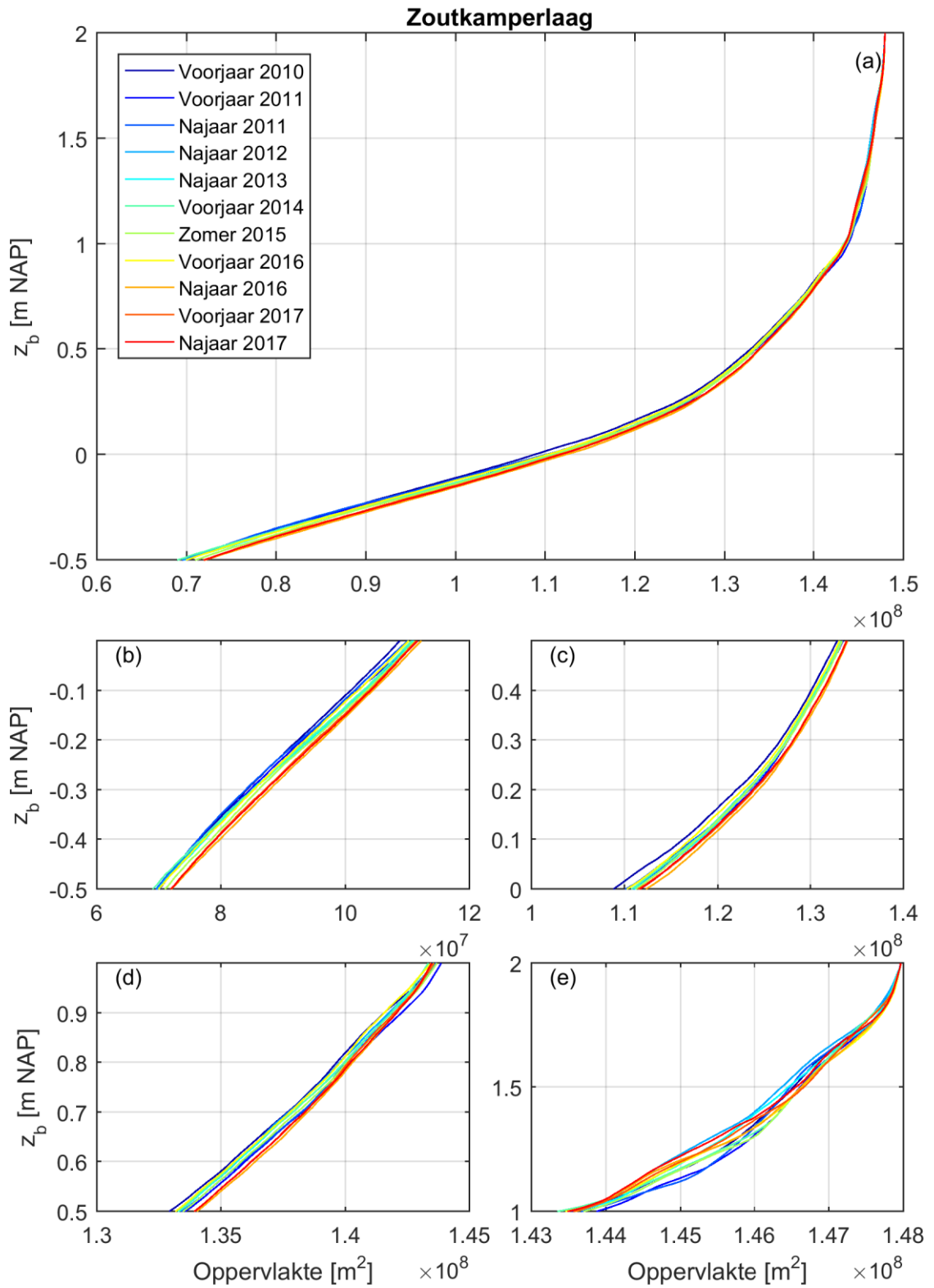
### 4.2 Kombergingsgebieden

De hypsometrische curven van het kombergingsgebied Pinkegat zijn weergegeven in Figuur 4.1a. De figuren b-e geven een uitvergroting van een specifiek hoogte-interval. De figuren laten zien dat de curven van de recentere jaren onder het peil onder NAP +0,70 m lager gelegen zijn dan de curven van de eerdere survey's. In Schrijvershof (2017) is aangetoond dat de interpolatie zorgt voor een artificiële verhoging van het bodemniveau doordat lokale depressies in de wadplaten worden gladgestreken. Bij de oudere datasets speelt dit een grotere rol doordat een relatief groter aantal roosterzellen wordt opgevuld met interpolatie. Het verschil tussen de oudste en meest recente datasets wordt dus deels verklaard door dit verschijnsel, Figuur 4.1 laat echter zien dat de recentere curven ook lager liggen dan de hypsometrische curve van de survey van Najaar 2013. Dit gedeelte van de tijdreeks (na 2013) van de geïnterpoleerde dataset is betrouwbaarder dan het eerste gedeelte, de curven lijken dus een afname in areaal van het lager gelegen wad aan te geven. Voor het hoger gelegen wad (boven NAP +1,0 m) liggen de recentere curven juist boven de curven van de oudere datasets. Dit heeft waarschijnlijk te maken met schorvorming op de platen.

De hypsometrische curven van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag laten vrijwel dezelfde kenmerken zien als van het Pinkegat: de recentere (rode) curven liggen onderaan de bundel en de oudste (blauwe) curven zijn bovenin de bundel gelegen. De spreiding tussen de curven is minder groot dan het geval is in het Pinkegat.



Figuur 4.1 Hypsometrische curven van het kombergingsgebied Pinkegat



Figuur 4.2 Hypsometrische curven van het kombergingsgebied Zoutkamperlaag

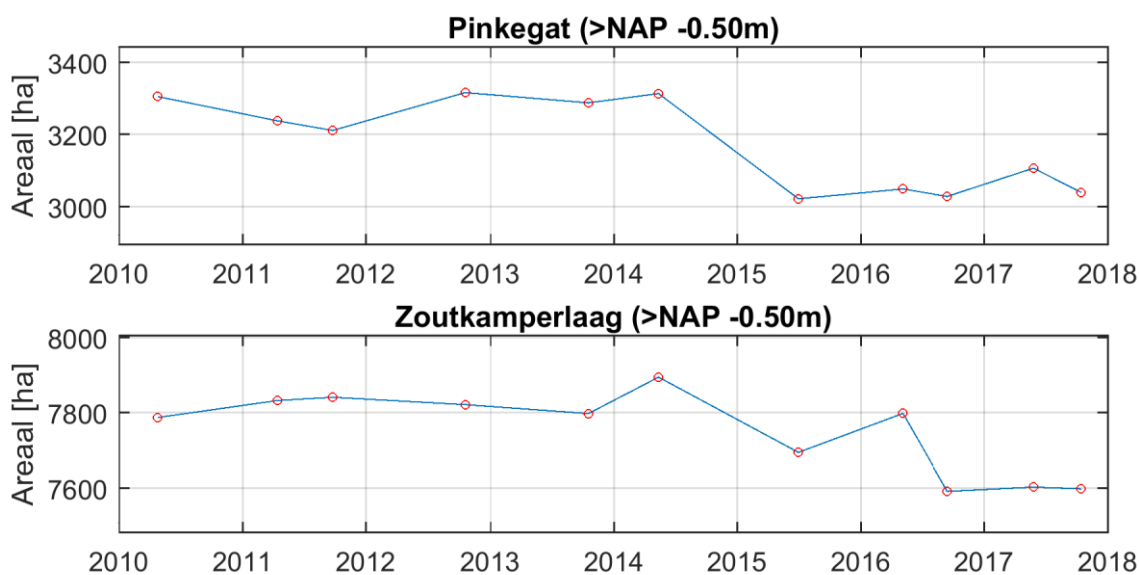
Om de ontwikkeling van het areaal te verduidelijken is het areaal boven een vast referentievlak berekend en uitgezet als tijdserie (Figuur 4.3 en Figuur 4.4). De ontwikkeling van het areaal boven NAP -0,50 m (Figuur 4.3) laat zien dat in beide kombergingsgebieden het areaal niet of nauwelijks is veranderd in de periode 2010-2014. In de periode tussen de opname van voorjaar 2014 en zomer 2015 is er een sterke afname. Deze abrupte overgang komt overeen met de waargenomen veranderingen in bodemhoogte (§3.2.1). In het Pinkegat is er in de periode na 2015 nauwelijks verandering. In de Zoutkamperlaag wordt nogmaals een sprong waargenomen in het areaal. Deze sprong treedt op in de periode tussen voorjaar en najaar 2016. Aan de hand van de erosie-sedimentatiekaarten is echter het vermoeden ontstaan dat tenminste één van deze twee datasets een systematische fout bevat die een uniforme bodembeweging over het gehele zuidoostelijke gedeelte van de Zoutkamperlaag (Groningerwad) teweegbrengt (§3.2.2). De systematische fout kan de sprong in de ontwikkeling verklaren.

In de figuren van het areaal boven NAP 0,00 m (Figuur 4.4) zijn dezelfde kenmerken waar te nemen maar zijn de twee perioden minder duidelijk te onderscheiden. Daarnaast lijkt er ook een sterke afname van het areaal te zijn in de periode 2010-2011. Deze datasets bevatten echter meer interpolatie-artefacten, het is daarom met minder betrouwbaarheid vast te stellen dat deze verandering een werkelijk gemeten verandering is of gevolg van de methode.

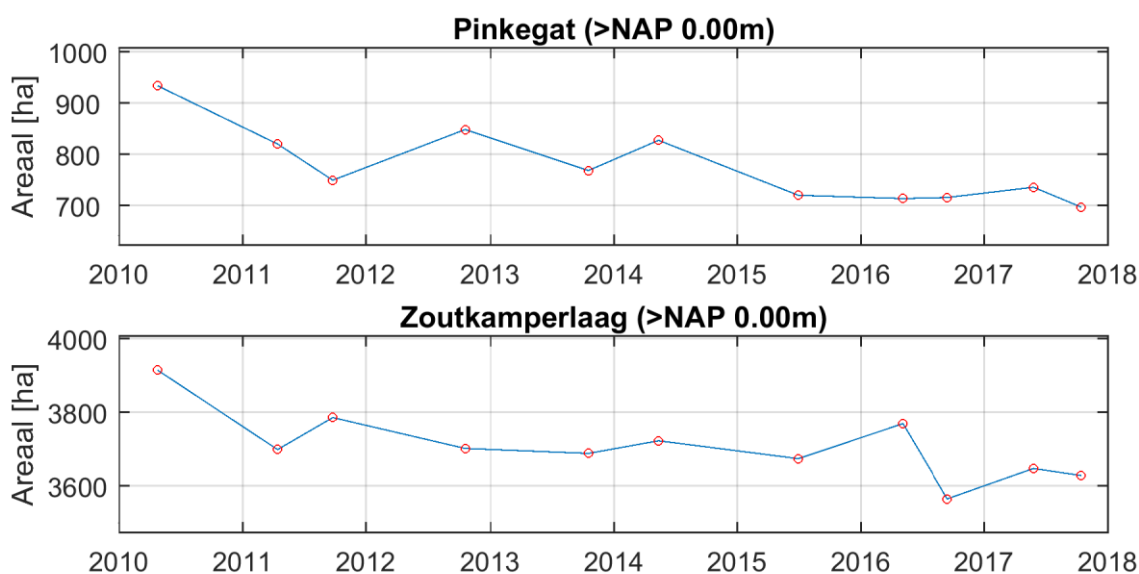
De afname van het areaal droogvallend wad over de gehele meetperiode (vanaf 2010) boven NAP -0,50 m is in het pinkegat ongeveer 300 hectare en in de Zoutkamperlaag ongeveer 200 hectare. Boven NAP 0,00 m is dit ongeveer 250 ha (Pinkegat) en 300 ha (Zoutkamperlaag).

Aan de hand van de hypsometrische curven en tijdseries wordt er een afname in areaal waargenomen binnen beide kombergingsgebieden. Deze afname is niet geleidelijk maar is een abrupte afname in areaal binnen een zeer kort tijdsbestek van een half tot één jaar. De overgangen bevinden zich tussen de survey's van 2014-2015 en in 2016. In de volgende paragrafen worden de areaalberekeningen over kleinere deelgebieden uitgevoerd om te achterhalen of de afname in areaal op een specifieke locatie plaatsvindt of over het gehele kombergingsgebied verspreid is.





Figuur 4.3 Tijdsree van het areaal boven NAP -0,50 m voor de de twee kombergingsgebieden.



Figuur 4.4 Tijdsree van het areaal boven NAP -0,00 m voor de twee kombergingsgebieden.

## 4.3 Deelgebieden

De hypsometrische curven van de vijf gedefinieerde deelgebieden zijn weergegeven van Figuur 4.5 tot en met Figuur 4.9. De deelgebieden worden hieronder afzonderlijk besproken.

### Deelgebied Ameland-Oost

De curven van de opnamen van najaar 2010 en najaar 2012 liggen uitzonderlijk hoog voor dit deelgebied. Boven de hoogte van -0,1 m NAP ligt de curve van de meest recente dataset het laagst, onder -0,1 m NAP is dit echter de curve van voorjaar 2016.

### Deelgebied Ternaard

De hypsometrische curve van de survey van zomer 2015 is een stuk onder de bundel curven gelegen. Gelijk aan de observaties van §3.2.1 lijkt er dus een sprong in de data te zitten rond deze periode. Deze sprong in het areaal van het kombergingsgebied Pinkegat lijkt dus gedeeltelijk veroorzaakt te worden door het wad rondom deelgebied Ternaard (Wierumerwad).

### Deelgebied Engelsmanplaat

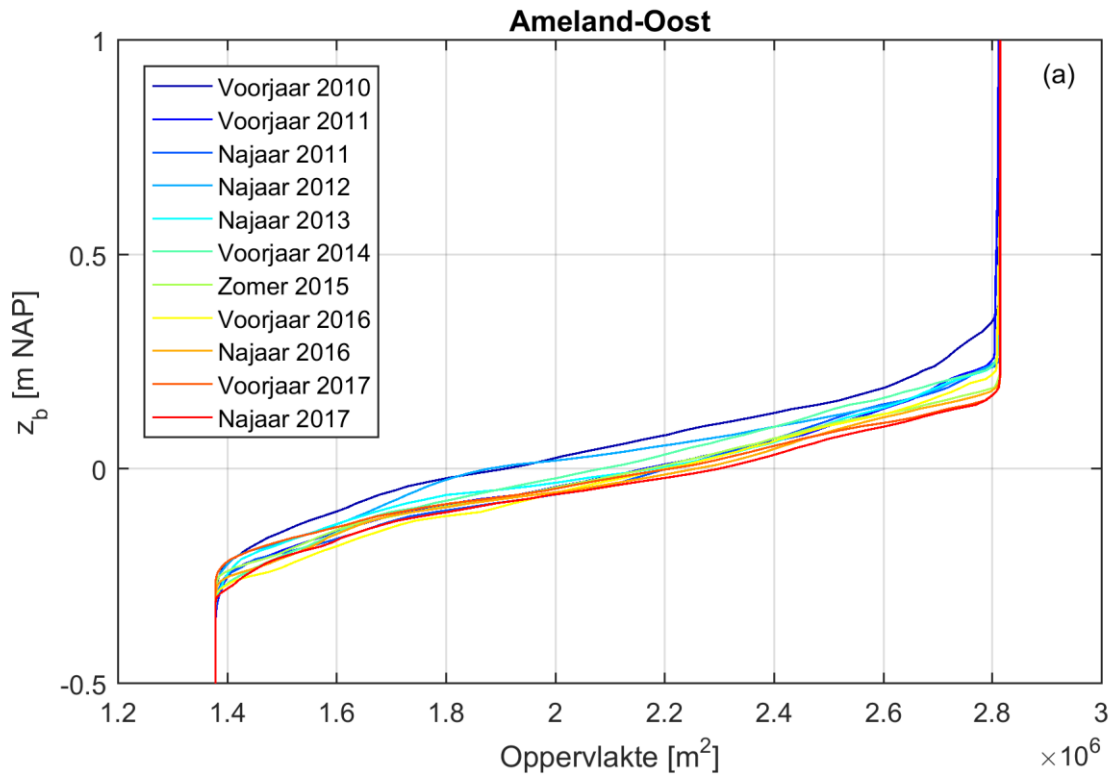
De hypsometrische curven van de Engelsmanplaat laat een duidelijke trendmatige verlaging van de gehele curve zien. De verlaging van de gehele curve betekent dat het areaal droogvallend wad binnen de polygoon van het deelgebied Engelsmanplaat is afgenomen. De oorzaak hiervan kan toegeschreven worden aan erosie van de wadplaten. De erosie op deze locatie is een gevolg van de cyclische ontwikkeling van het morfologische systeem Engelsmanplaat en het Rif, versterkt door de sedimenthonger in de naastliggende geul veroorzaakt door de afsluiting van de Lauwerszee (Wang, 2007). De curven van het deelgebied geven aan dat een groot signaal en duidelijke trend in bodemhoogteverandering goed wordt weergegeven door de LiDAR gegevens en duidelijk wordt aan de hand van de huidige analyse.

### Deelgebied Paesens

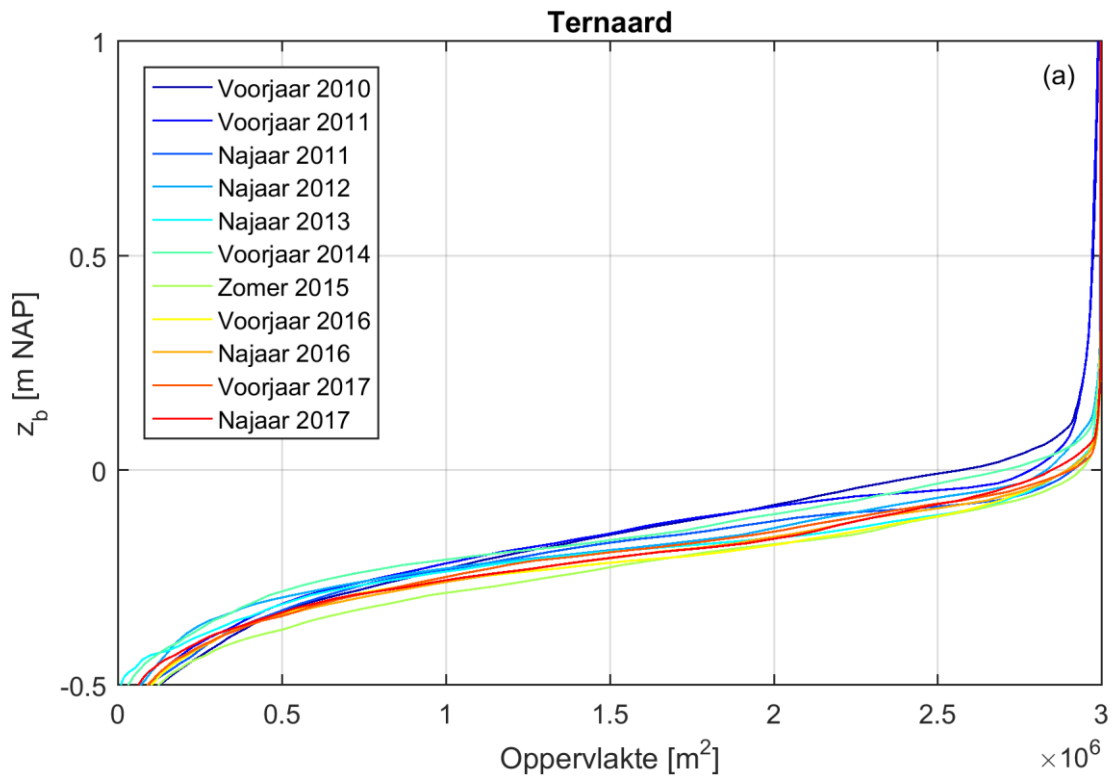
De curven van het deelgebied Paesens tonen geen duidelijke eenduidige trend tussen de verschillende LiDAR opnamen. Aan de hand van de LiDAR gegevens kan dus niet eenvoudig bepaald worden of het areaal droogvallend wad binnen de polygoon Paesens veranderd is als gevolg van morfologische veranderingen.

### Deelgebied Brakzand

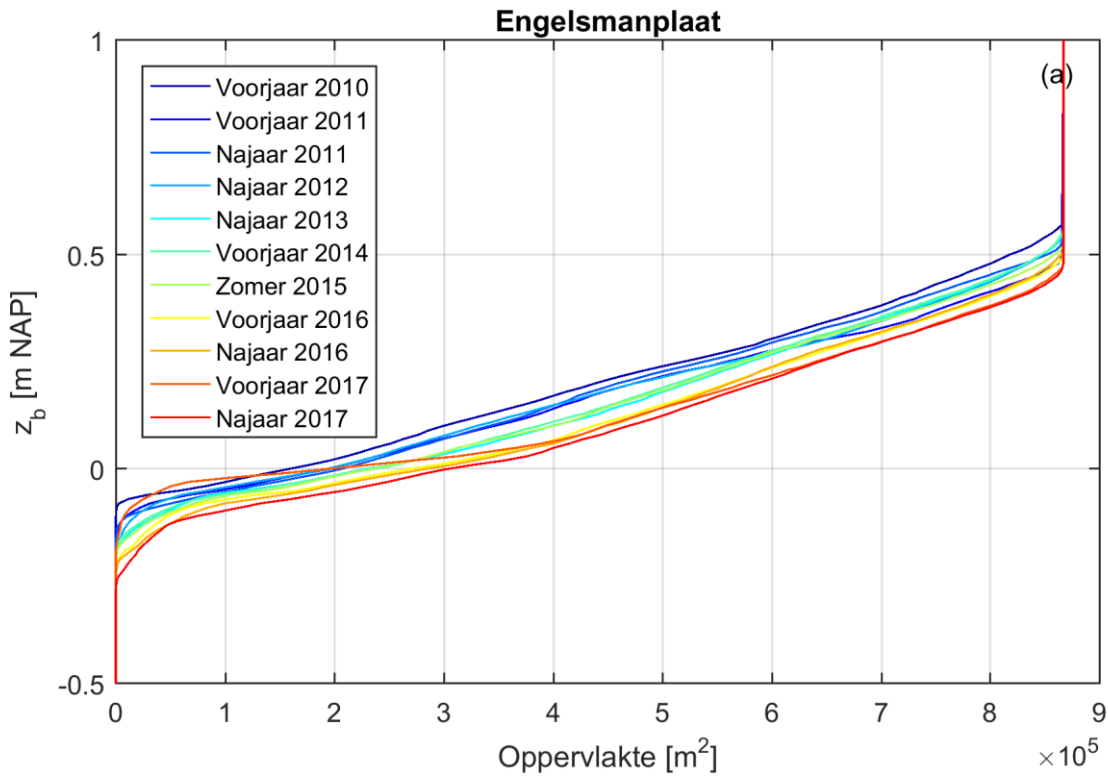
De hypsometrische curven van het Brakzand lijken enige vorm van systematiek aan te duiden. Het areaal onder 0,4 m NAP neemt toe door de jaren en het areaal boven de 0,4 m NAP neemt af, hoewel deze trend meer fluctueert. Dit komt overeen met de observaties van de lineaire trendanalyse, waar er sedimentatie aan de zuidoostelijke plaatrand plaatsvindt en erosie op de plaat zelf.



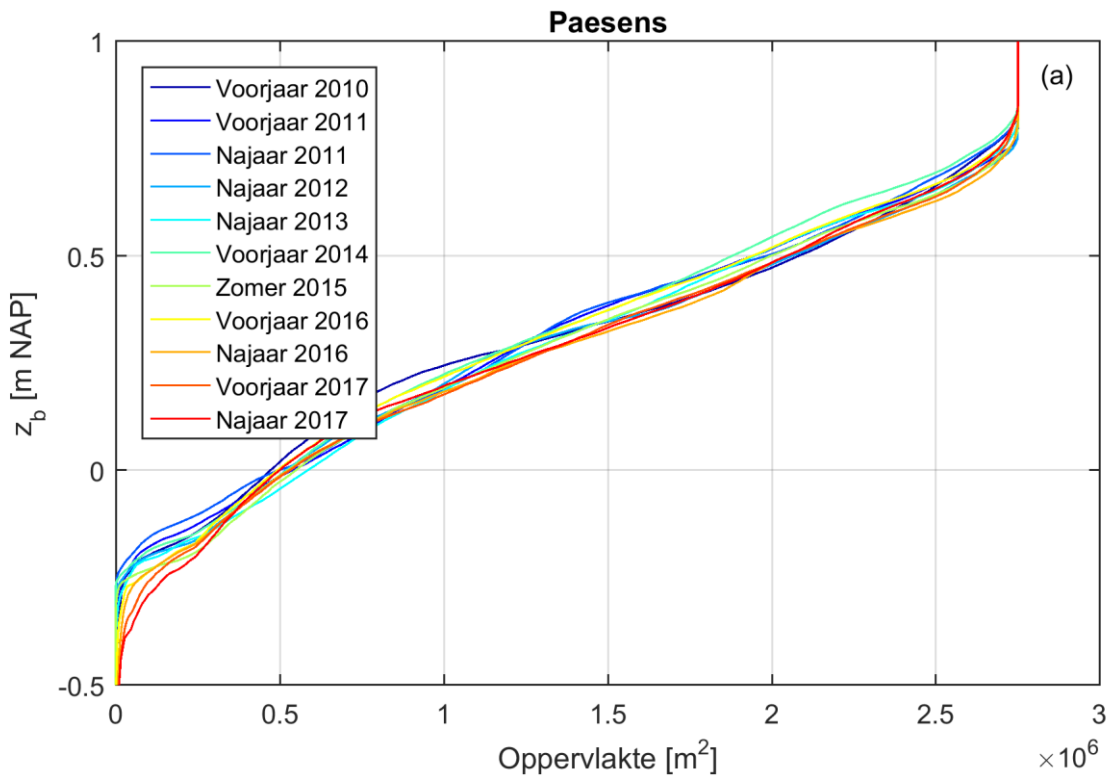
Figuur 4.5 Hypsometrische curven van deelgebied Ameland-Oost.



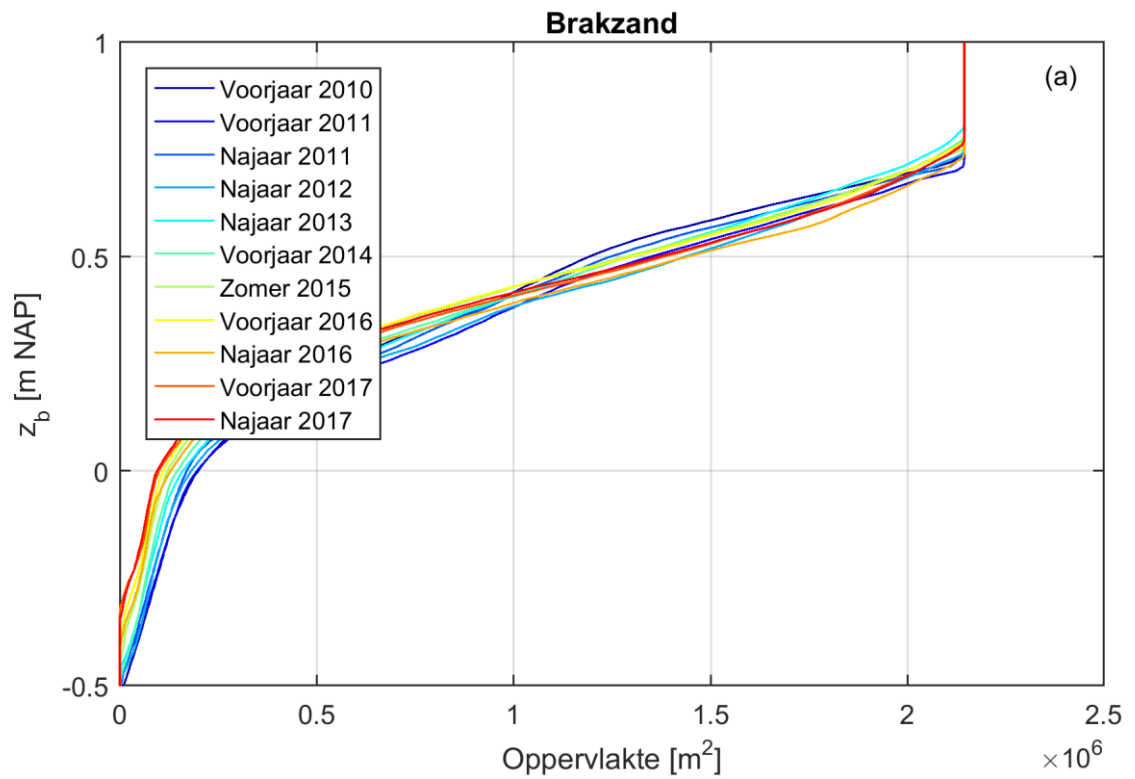
Figuur 4.6 Hypsometrische curven van deelgebied Ternaard.



Figuur 4.7 Hypsometrische curven van deelgebied Engelsmanplaat.



Figuur 4.8 Hypsometrische curven van deelgebied Paesens.

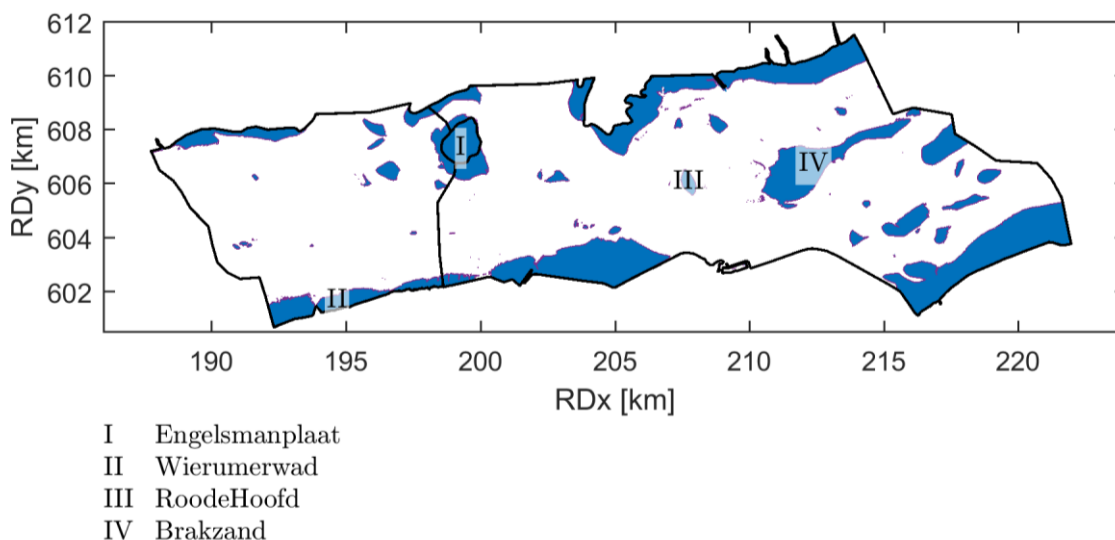


Figuur 4.9 Hypsometrische curven van deelgebied Brakzand.

#### 4.4 Morfologische entiteiten

De hypsometrische curven van de deelgebieden (§4.3) geven alleen inzicht in de ontwikkeling van een zeer klein gebied en daarmee niet voldoende duidelijkheid waar de areaalafname binnen de kombergingsgebieden geconcentreerd is. Om dit probleem te overkomen is er een nieuwe aanpak gehanteerd waarbij deelgebieden gedefinieerd zijn als morfologische entiteiten (Figuur 4.10). De geografische locatie van deze deelgebieden wordt gedefinieerd door de hoogtecontourlijn op NAP 0,0 m, apart berekend voor iedere dataset. De definitie van de deelgebieden is dus niet gefixeerd in de ruimte en tijd (zoals het geval is bij de controlepolygoon) maar verandert mee met de morfologische ontwikkelingen. Er zijn vier morfologische entiteiten gedefinieerd:

1. De Engelsmanplaat (Figuur 4.12)
2. Het Wierumerwad dat gelegen is binnen de controlepolygoon van kombergingsgebied Pinkegat (Figuur 4.13)
3. Het Roode Hoofd (Figuur 4.14)
4. Het Brakzand (Figuur 4.15)



Figuur 4.10 Overzichtsfiguur van gedefinieerde morfologische entiteiten binnen het projectgebied.

De ontwikkeling van de NAP 0,0 m contour is voor deze gedefinieerde gebieden gevolgd en het oppervlak van deze contourlijnen is uitgezet als tijdserie (Figuur 4.11).

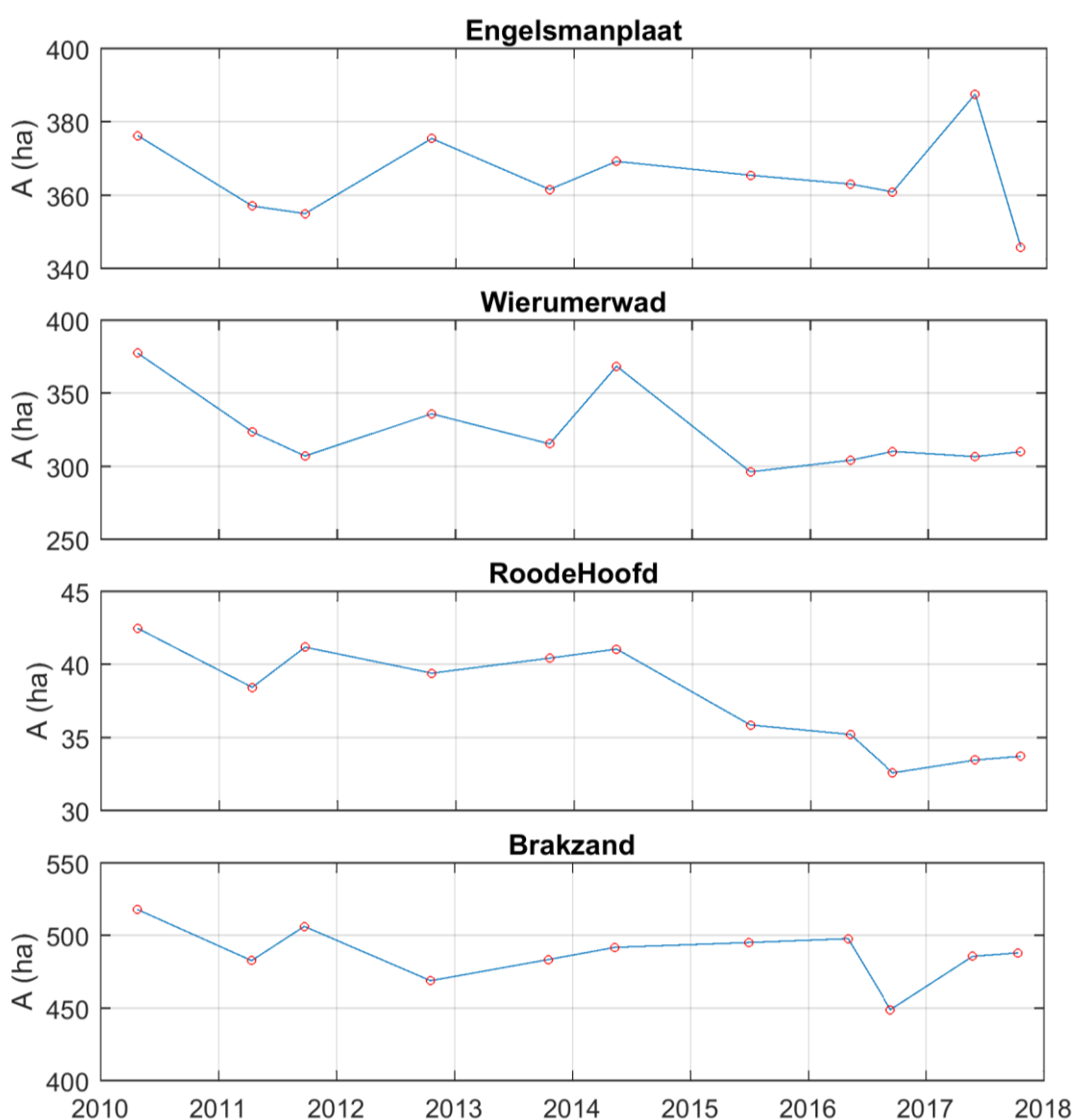
De Engelsmanplaat erodeert aan de noord- en zuidwestelijke kant. De plaat groeit echter ook aan, aan de noordwestelijke kant. Het areaal boven NAP 0,00 m schommelt dan ook 360 ha en van een trendmatige afname in areaal lijkt geen sprake te zijn.

Het Wierumerwad laat wel een sterke afname in areaal zien. Het overzichtsfiguur (Figuur 4.13) geeft aan dat de NAP 0,0 m contour landwaarts beweegt. De afname van het areaal boven NAP 0,00 m van het Wierumerwad bedraagt ongeveer 75 ha en deze afname is geconcentreerd rond de overgang van 2014 naar 2015.

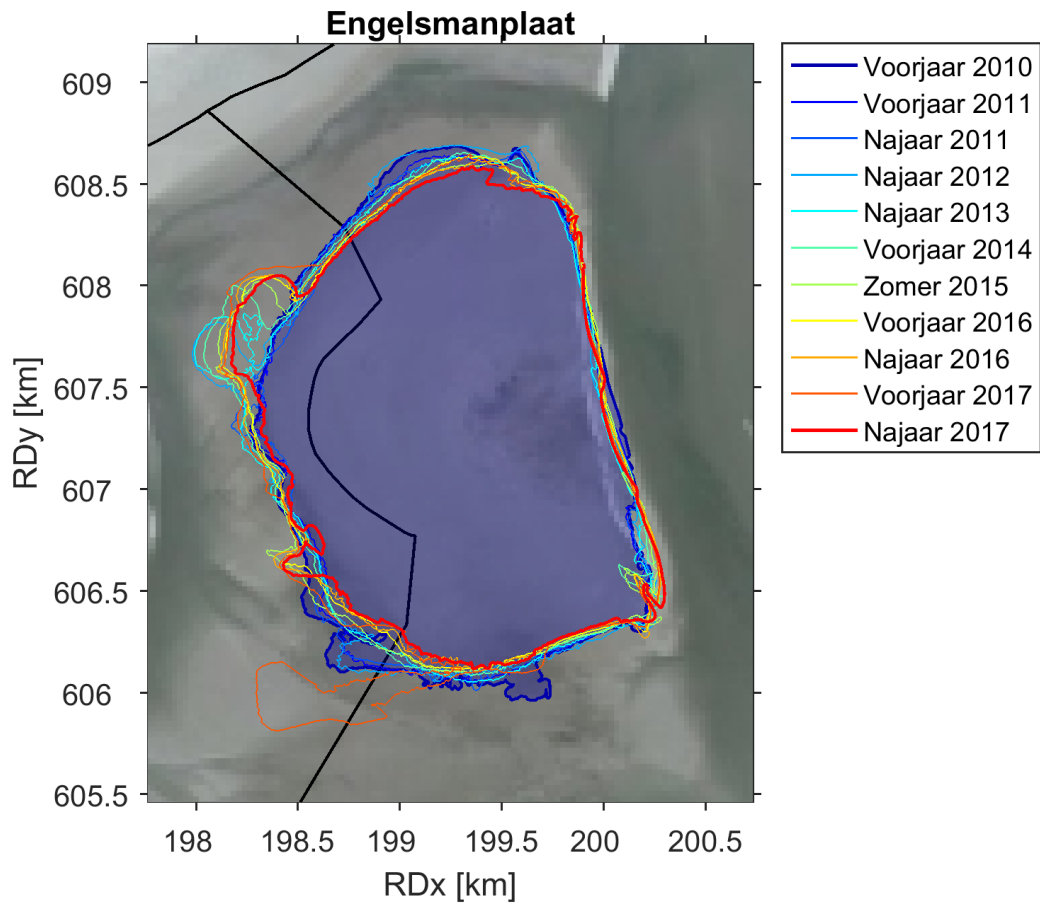
Figuur 4.14 geeft duidelijk aan dat het Roode Hoofd oostwaarts migreert, de plaat neemt daarbij ook af in areaal boven NAP 0,0 m. Het Roode Hoofd is een relatief kleine plaat en de afname bedraagt enkel 10 hectare. De ontwikkeling van het Roode Hoofd kan dus niet de ontwikkelingen verklaren die waargenomen zijn in het kombergingsgebied Zoutkamperlaag.



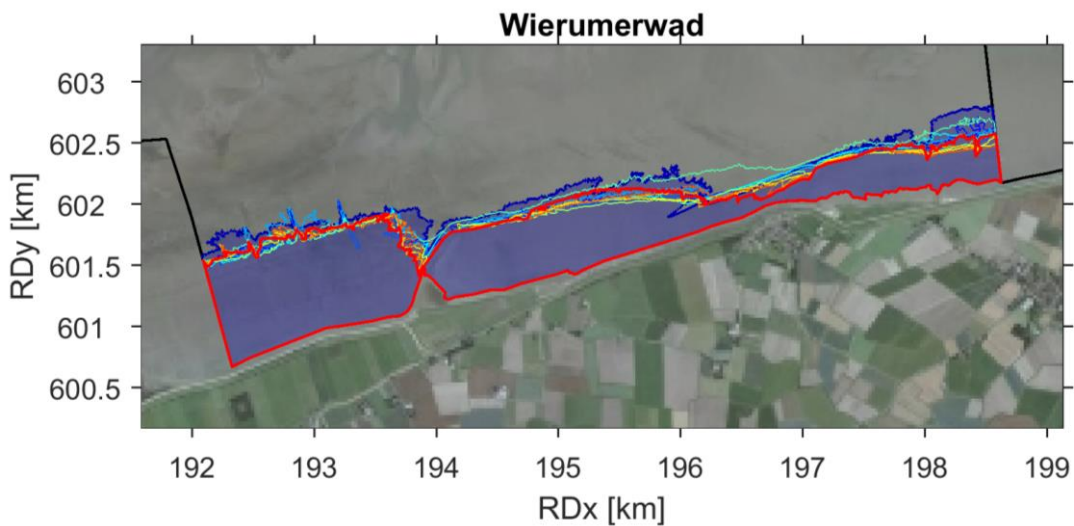
Het Brakzand (Figuur 4.15) laat eveneens een zeer duidelijke oostwaartse migratie zien. In de ontwikkeling van het areaal boven NAP 0,0 m is geen duidelijke trendmatige afname te zien. Het valt wel op dat er een sprong van ongeveer 50 ha te zien is tussen de twee survey's van 2016. Deze sprong valt samen met de sprong in areaal van het gehele kombergingsgebied Zoutkamperlaag en wordt veroorzaakt door de systematische bodemhoogteverandering die uniform verdeeld lijkt te zijn over het gehele zuidoosten van de Zoutkamperlaag (Figuur 3.3).



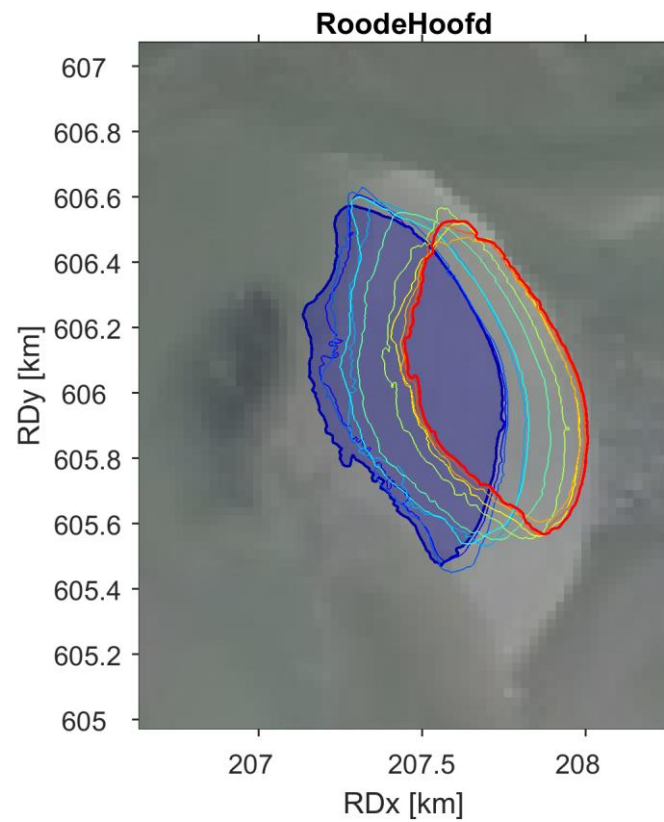
Figuur 4.11 Tijdseries van het areaal wadplaat boven NAP 0,0 m voor de gedefinieerde morfologische entiteiten binnen de controlepolygoon van de kombergingsgebieden.



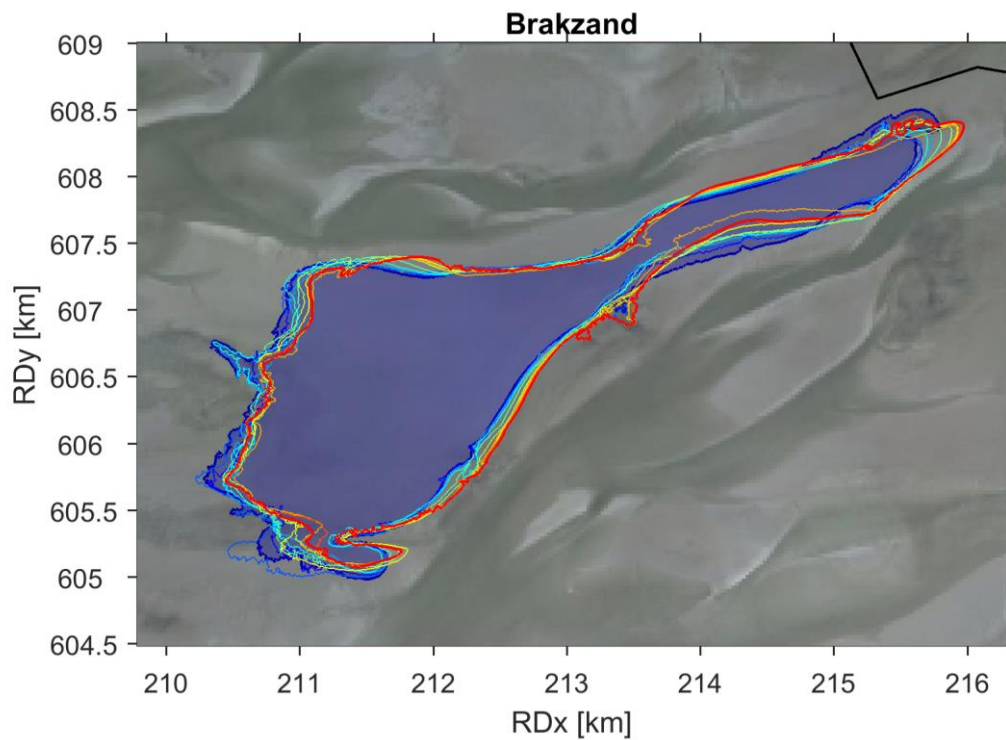
Figuur 4.12 Hoogtecontour op NAP 0,0 m voor de Engelsmanplaat.



Figuur 4.13 Hoogtecontour op NAP 0,0 m voor het Wierumerwad. Legenda is gelijk aan Figuur 4.12.



Figuur 4.14 Hoogtecontour op NAP 0,0 m voor het Roode Hoofd. Legenda is gelijk aan Figuur 4.12.



Figuur 4.15 Hoogtecontour op NAP 0,0 m voor het Brakzand. Legenda is gelijk aan Figuur 4.12.



## 5 Analyse naar de verklaring van gemeten veranderingen

### 5.1 Inleiding

De analyse van de LiDAR data laat zien dat de meetreeks lang genoeg is om veranderingen in wadplaathoogte en –areaal te detecteren. Deze veranderingen zijn primair het gevolg van morfodynamische veranderingen in de kombergingsgebieden maar worden ook beïnvloedt door de nauwkeurigheid van de LiDAR data. Vanaf de start van de analyse van de LiDAR metingen (2010) is er dan ook discussie geweest rondom de kwaliteit en de nauwkeurigheid van de meetgegevens. In de afgelopen jaren zijn er verschillende verbeteringen gerealiseerd qua meettechniek en uitvoering van de metingen (zoals de dekking van het gebied) en daarnaast zijn er verbeteringen doorgevoerd in het verwerken en analyseren van de meetgegevens (zie bijvoorbeeld Appendix B). Ondanks deze verbeteringen worden er grote veranderingen in de meetgegevens waargenomen in zeer korte perioden (zie bijvoorbeeld Figuur 4.4). Deze fluctuaties op korte tijdschaal zijn echter niet eenvoudig te verklaren in termen van morfologische dynamiek. Om inzicht te krijgen in de mogelijke oorzaken van deze korte termijn fluctuaties wordt er in dit hoofdstuk een analyse uitgevoerd naar de omgevingsfactoren tijdens en tussen de LiDAR metingen. De onderzoeksvragen die daarbij gesteld worden zijn:

1. Wat zijn de mogelijke oorzaken van de (grote) gemeten veranderingen op korte tijdschaal? Is dit enkel toe te schrijven aan de (on)nauwkeurigheid van de metingen of worden deze ook veroorzaakt door daadwerkelijke veranderingen als gevolg van bodemdaling in combinatie met morfodynamische ontwikkelingen door sedimenttransport?
2. Als het onnauwkeurigheid van de metingen betreft, wat zijn de oorzaken? Aan welke factoren kan de meetonnauwkeurigheid worden gerelateerd?
3. Als het om daadwerkelijke morfologische veranderingen gaat, hoe kunnen de verschillen in de veranderingen in verschillende perioden dan worden verklaard? Aan welke factoren kunnen de opgetreden veranderingen in een bepaalde periode worden gerelateerd?

De daadwerkelijke veranderingen van de bodemhoogte en het areaal van de wadplaten kunnen twee oorzaken hebben: bodemdaling en morfodynamische veranderingen. Bodemdaling door gaswinning betreft daling van de diepe ondergrond en is in principe goed te meten. De gerapporteerde grootte van bodemdaling (Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., 2017) is in de orde van millimeters per jaar. Bodemdaling is daarmee veel te klein om de gemeten veranderingen in specifieke perioden (zoals tussen 2014 en 2015) te kunnen verklaren. De analyse naar morfodynamische veranderingen in de kombergingsgebieden is daarom geconcentreerd op veranderingen die aangedreven worden door de waterbeweging (het getij, wind gedreven stroming en golven).

De (on)nauwkeurigheid van de metingen (de meetfout) die de gemeten veranderingen mogelijk deels kan verklaren kan onderscheiden worden in:

- Stochastische en systematische fouten door de onnauwkeurigheid van de meetapparatuur. Deze fouten worden onder andere veroorzaakt door de positiebepaling van het vliegtuig. Over deze oorzaken is veel discussie gevoerd en er is door middel van een analyse van bodemhoogtegegevens op niet veranderende (harde) topografie

aangetoond dat deze fouten een klein zijn (maximaal enkele centimeters; Liu, 2017). De analyse is dit hoofdstuk gaat daarom niet verder in over dit soort meetfouten.

- Onnauwkeurigheid van de metingen die bepaald worden door de omstandigheden tijdens de metingen. De metingen kunnen worden beïnvloedt door de weersomstandigheden (i.e. wind en bewolking) en het water dat op de wadplaten aanwezig blijft terwijl de waterspiegel in de geulen lager gelegen is. De analyse naar de nauwkeurigheid van de metingen is geconcentreerd op deze omgevingsfactoren.

Samengevat wordt er in dit hoofdstuk geanalyseerd of de verschillen in meetomstandigheden tussen twee metingen en de variatie in de aandrijvende krachten van morfologische verandering samen de gemeten verschillen in wadplaathoogte en -areaal kunnen verklaren.

## 5.2 Morfologische veranderingen

De morfologische veranderingen kunnen, in principe, onderscheiden worden in een lange-termijn trend en korte-termijn fluctuaties. De verzamelde datareeks is echter nog niet lang genoeg om dit onderscheid te kunnen maken. De lange-termijn trend betreft veranderingen aangedreven door zeespiegelstijging en grootschalige menselijke ingrepen. Dit deel van de veranderingen verklaart niet de gemeten fluctuaties met een tijdschaal van orde één jaar. De veranderingen zoals de data aangeven zijn dus gedomineerd door korte-termijn fluctuaties, op een tijdschaal van een seizoen tot één jaar. Oorzaken van deze fluctuaties moeten worden gezocht bij de fluctuaties (met dezelfde tijdschaal) van de aandrijvende processen.

De aandrijvende processen voor morfodynamische veranderingen van de wadplaten zijn:

- Het getij: het getij is een van de belangrijkste aandrijvingen voor morfodynamische veranderingen. De algemene opvatting is dat getij het opbouwend werkt voor de wadplaten doordat getijstroming sediment vanaf de geulen naar de platen transporteert. Dit proces is echter vrij regelmatig en goed voorspelbaar door de astronomische oorsprong ervan. Het is daarom onwaarschijnlijk dat het getij de verklaring geeft voor de waargenomen korte-termijn fluctuaties.
- Wind-gedreven stroming: treedt in principe tegelijkertijd op met getijstroming maar in tegenstelling tot getijstroming kan dit wel korte-termijn fluctuaties veroorzaken. De effecten hiervan op de (morfologie van) wadplaten zijn relatief onbekend.
- Golven: golven zijn een belangrijke aandrijving voor morfodynamische veranderingen naast de stroming. Over het algemeen worden golven beschouwd als het eroderende proces doordat ze het sediment op de platen opwoelen zodat het met de stroming in de geulen kan worden getransporteerd. Golven hebben in principe twee oorsprongen, lokaal opgewekt door wind of van buiten het zeegat naar binnengedrongen. De aanwezigheid van de buitendelta en het relatief nauwe Friesche Zeegat zorgt ervoor dat de indringing van golven van buiten beperkt is. Het zijn dus voornamelijk de lokale windgegeneerde golven die van belang kunnen zijn. Het proces is dus gekoppeld aan de wind, welke op korte termijn sterk kan fluctueren.
- Erosie door regen: over wadplaaterosie door regen is relatief weinig bekend maar is goed te vergelijken met erosie in stroomgebieden van rivieren. Het proces kan in principe korte-termijn fluctuaties veroorzaken, maar het is zeer de vraag of het significante veranderingen kan verklaren.

Uit bovenstaande inventarisatie kan worden geconcludeerd dat erosie van de wadplaten vooral tijdens stormen optreedt. Omdat stormen stochastische gebeurtenissen zijn betekent dit dat erosie van de wadplaten zich concentreert in korte perioden. Dit impliceert ook dat erosie na elke storm weer wordt hersteld door de opbouwende werking van de getijstroming. De tijdschaal van het herstelproces is dan van belang voor de gemeten veranderingen. Als de



tijdschaal veel korter is dan het tijdinterval tussen twee metingen dan zijn alleen de stormen vlak vóór de laatste meting van belang.

### 5.3 Definitie indicatoren

Uit de analyse beschreven in vorige paragraaf kan geconcludeerd worden dat de kortetermijn fluctuaties in morfodynamiek hoofdzakelijk worden veroorzaakt door:

- Wind-gedreven stroming en golven; beide processen zijn gerelateerd aan wind en kunnen dus geparametriseerd worden aan de hand van de meetgegevens van de wind. De gegevens zijn verkrijgbaar bij het KNMI en worden gemeten op enkele locaties verspreid over het gehele land. In principe is de gehele periode tussen twee metingen van belang, het kan echter ook zijn dat alleen een kortere periode vóór een meting van belang is.
- Regen; deze gegevens zijn eveneens verkrijgbaar via de KNMI meetstations. In principe is de gehele periode tussen twee metingen van belang, het kan echter ook zijn dat alleen een kortere periode vóór een meting van belang is. Hoogst waarschijnlijk is alleen regen tijdens droogval van de platen van belang.

Uit fysische overwegingen kan de invloed van de wind het best worden uitgedrukt in de (overdracht naar het water van) windenergie, die evenredig is met het kwadraat van de windsnelheid. Naast de sterkte van de wind kan ook de windrichting van belang zijn. Met deze overwegingen zijn enkele parameters gedefinieerd die weergegeven staan in Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Gedefinieerde parameters voor de morfodynamische veranderingen tussen twee metingen.

| Parameter | Definitie  |
|-----------|--|
| $E_1$     | Gemiddelde van het kwadraat van de windsnelheid over de gehele hele periode tussen twee metingen                       |
| $E_2$     | Gemiddeld van het kwadraat van de windsnelheid over de periode vanaf 1 maand vóór tot de start van de metingen.        |
| $R_1$     | Cumulatieve hoeveelheid regen gedurende de gehele periode tussen twee metingen   |
| $R_2$     | Cumulatieve hoeveelheid regen over de periode vanaf 1 maand vóór tot start van de metingen                             |
| $E_w$     | De Integraal van het kwadraat van de snelheid van de west georiënteerde wind over de hele periode tussen twee metingen |
| $E_o$     | De Integraal van het kwadraat van de snelheid van de oost georiënteerde wind over de hele periode tussen twee metingen |

Voor de meetomstandigheden zijn de volgende twee aspecten van belang:

- De weeromstandigheden tijdens de metingen, zoals wind die het vlieggedrag van het vliegtuig kan beïnvloeden en bewolking en regen die het zicht beïnvloeden.
- Hoeveelheid water op de wadplaten. Aanwezigheid van water op de platen heeft als gevolg dat het wateroppervlak in plaats van het bodemniveau van de wadplaten wordt gemeten.

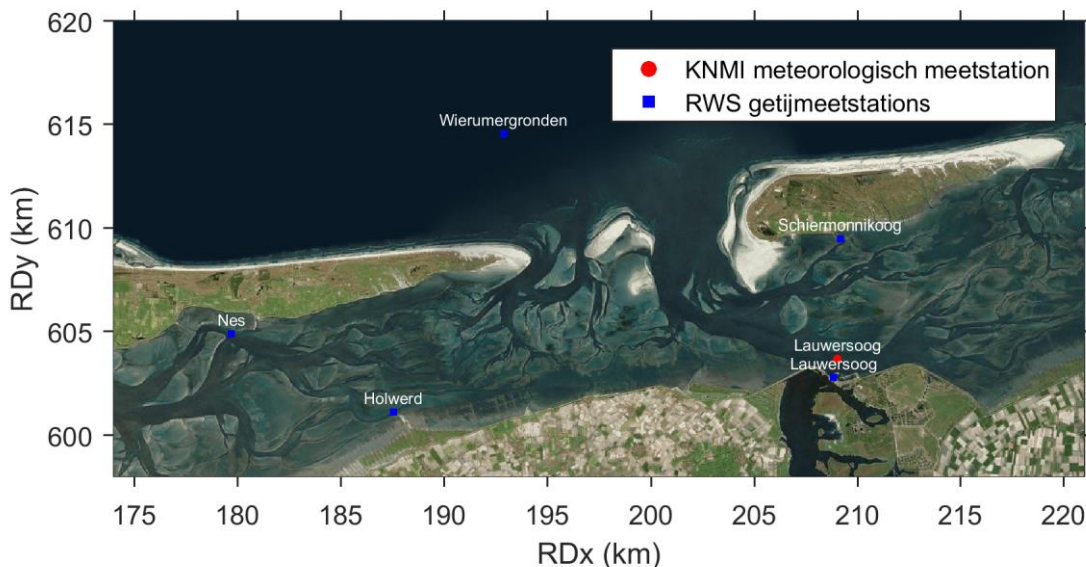
De weeromstandigheden kunnen afgeleid worden aan de hand van meetgegevens welke verzameld worden door meteorologische KNMI meetstations in de buurt van het projectgebied. De hoeveelheid water op de wadplaten wordt vooral beïnvloedt door het getij tijdens en vlak voor de metingen, waarvoor de waterstandmetingen bij de nabijgelegen Rijkswaterstaat getijmeetstations kunnen worden gebruikt. De parameters die gedefinieerd zijn om de omstandigheden tijdens de metingen weer te geven zijn weergegeven in Tabel 5.2.

Tabel 5.2 Gedefinieerde parameters voor de omstandigheden tijdens de metingen.

| Parameter       | Definitie  |
|-----------------|--|
| W               | Gemiddelde windsnelheid tijdens de metingen  |
| R               | Cumulatieve hoeveelheid regen vanaf 2 dagen voor de start tot het eind van de metingen |
| S               | Aantal zonuren tijdens de metingen   |
| HW <sub>1</sub> | Gemiddeld hoogwater tijdens de metingen  |
| LW <sub>1</sub> | Gemiddeld laagwater tijdens de metingen  |
| HW <sub>2</sub> | Gemiddeld hoogwater in de 2 dagen vóór de metingen                                     |
| LW <sub>2</sub> | Gemiddeld laagwater in de 2 dagen vóór de metingen                                     |
| TD <sub>1</sub> | Gemiddelde duur van het dalend tij tijdens de metingen                                 |
| TD <sub>2</sub> | Gemiddelde duur van het dalend tij in de 2 dagen vóór de metingen                      |

## 5.4 Meetgegevens

De gedefinieerde parameters worden berekend aan de hand van gegevens die gemeten worden op verschillende meteorologische en getijmeetstations in het bekken van het Friesche Zeegat. In Figuur 5.1 zijn de locaties van de aanwezige meetstations weergegeven. Voor de analyse worden de gegevens van getijmeetstations Schiermonnikoog en Lauwersoog gebruikt, deze zijn namelijk als enige in het getijbekken van het Friesche Zeegat gelegen. Het meteorologische KNMI meetstation dat gebruikt wordt is Lauwersoog.



Figuur 5.1 Locatie van de meteorologische en getijmeetstations.

Naast de gegevens van de meetstations is ook het tijdsinterval waarin de LiDAR metingen zijn uitgevoerd van belang. Deze informatie is verkregen aan de hand van alle documenten die bij de LiDAR data meegeleverd zijn. Dit zijn zowel de verschillende datarapporten, bijgeleverde exceldocumenten en voor de recentere campagnes ook shapefiles met vluchtinformatie. De LAS-data bevat in principe ook informatie over de tijd van opname (waardoor deze informatie ook daaruit gewonnen kan worden), deze is echter niet voor alle LiDAR meetcampagnes aangeleverd in een formaat waarin de vluchtlijnen nog zijn te achterhalen (LAS-data opgedeeld in vliegbanen).

In Tabel 1.1 is alle relevante informatie van alle LiDAR meetcampagnes samengevoegd. Er is geprobeerd om in de tabel zo nauwkeurig mogelijk het tijdsinterval te noteren dat er data ingewonnen is, dus het moment dat de productielijnen gevlogen zijn. Dit bleek echter niet voor elke campagne precies te achterhalen, in dat geval is de tijd benaderd door bijvoorbeeld het gehele tijdsinterval te gebruiken van het moment van opstijgen tot landen van het vliegtuig.

De informatie over de vlieglijnen in Tabel 1.1 is niet voor alle datasets exact aangegeven, de oudere meetcampagnes zijn namelijk niet geleverd met de exacte informatie over het inwinnen van de vlieglijnen. Aan de hand van de rapporten en overige informatie is dit zo goed mogelijk uitgezocht en genoteerd tot een detailniveau zoals te achterhalen was. De planning en de nummering van de vlieglijnen wordt voor iedere meetcampagne opgesteld door de meetdienst aan de hand van de de polygoon van het projectgebied, de nummering verschilt daarom voor elke meetcampagne.

De informatie van de weerscondities in de tabel is ook afkomstig uit de rapporten en bijgevoegde documenten. Deze informatie is alleen in deze tabel gevoegd ter referentie, de actuele weerscondities worden beschouwd aan de hand van de opgestelde parameters die afgeleid worden vanuit de gemeten data (zie §5.3).

De tijdsintervallen van de LiDAR meetcampagnes zijn weergegeven op de tijdseries van de data waarmee de indicatoren in Tabel 5.1 en Tabel 5.2 zijn berekend. In Figuur 5.2 is de gemeten waterstand weergegeven en in Figuur 5.3 de windsnelheid en -richting, er worden echter meer meteorologische gegevens gebruikt van dit meetstation dan in de figuur wordt weergegeven.



Tabel 5.3 Overzicht van vluchtgegevens van alle LiDAR opnamen.

| LiDAR referentie   | Meetdienst en referentie                                | Merk en type scanner | Data van opnamen                                 | Uren van opname                  |                                     | Vlieglijnen  | Weerscondities  | Opmerkingen   |
|--------------------|---|----------------------|--|----------------------------------|-------------------------------------|--|---|---|
|                    |   |                      |  | Start                            | Eind                                |  |   |   |
| 2010<br>(voorjaar) | Fugro<br><i>Fugro Geospatial B.V. (2010)</i>            | FLI-MAP<br>1000      | 25-03-2010<br>26-03-2010<br>28-03-2010           | 09:00<br>10:33<br>13:02          | 11:03 (*)<br>12:26 (*)<br>14:36 (*) | Noord<br>Zuid<br>Midden                            | Helder weer<br>Bewolking en neerslag<br>Wisselend bewolkt | Tijdsinformatie van bijgevoegde <i>FlightLineRelation.xlsx</i><br>Vlieghoogte 500 m AGL |
| 2011<br>(voorjaar) | Fugro<br><i>Fugro Geospatial B.V. (2011)</i>            | FLI-MAP<br>1000      | 14-04-2011<br>15-04-2011<br>16-04-2011           | 10:00<br>10:50<br>11:50          | 12:20<br>13:20<br>13:00             | Noord<br>Midden<br>Zuid                            | Bewolkt<br>Heldere hemel<br>Nevel                         | Tijdsinformatie uit H6.5 (benaderd)<br>Vlieghoogte 500 m AGL                            |
| 2011<br>(najaar)   | Fugro<br><i>Fugro Geospatial B.V. (2011a)</i>           | FLI-MAP<br>1000      | 24-9-2011<br>25-9-2011<br>26-9-2011<br>27-9-2011 | 13:20<br>14:00<br>15:00<br>16:20 | 15:00<br>16:20<br>16:50<br>17:00    | Noord<br>Zuid<br>Midden<br>Midden (extra)          | Heldere hemel<br>Heldere hemel<br>Bewolkt<br>Bewolkt      | Tijdsinformatie uit: <i>11871-002 tidal data.xls</i><br>Vlieghoogte 500 m AGL           |
| 2012<br>(najaar)   | Fugro<br><i>Fugro Geospatial B.V. (2012)</i>            | FLI-MAP<br>1000      | 15-10-2012<br>16-10-2012<br>26-10-2012           | 15:15<br>16:30<br>13:10          | 18:15<br>17:45<br>16:10             | Noord, zuid (2)<br>Midden (1),<br>zuid (1)<br>Zuid | Lichte bewolking<br>Bewolkt, survey gestopt<br>Bewolkt    | Periode van 10 dagen tussen opnamen<br>Vlieghoogte 500 m AGL                            |
| 2013<br>(najaar)   | Fugro<br><i>Fugro Geospatial B.V. (2013)</i>            | Riegl<br>Q680i       | 18-10-2013<br>19-10-2013<br>20-10-2013           | 14:50<br>15:40<br>17:00          | 18:20<br>18:30<br>18:10             | Noord<br>Midden<br>Zuid                            | Heldere hemel<br>Heldere hemel<br>Heldere hemel           | Vlieghoogte 440 m AGL   |
| 2014<br>(voorjaar) | Fugro<br><i>Fugro Geospatial B.V. (2014a)</i>           | Riegl<br>Q680i       | 13-05-2014<br>14-05-2014<br>15-05-2014           | 15:20<br>15:20<br>15:50          | 16:50<br>18:10<br>17:30             | Noord<br>Midden<br>Zuid                            | Licht bewolkt<br>Licht bewolkt<br>Heldere hemel           | Cross-lines gedeeltelijk gevlogen buiten getijdenster<br>Vlieghoogte 440 m AGL          |
| 2014<br>(najaar)   | Fugro<br><i>Fugro Geospatial B.V. (2014b)</i>           | Riegl<br>Q680i       | 21-09-2014<br>22-09-2014<br>23-09-2014           | 14:16<br>15:39<br>15:38          | 16:04<br>17:17<br>17:37             | 6-19<br>20-28<br>29-38                             | Lage bewolking, regen<br>Licht bewolkt<br>Heldere hemel   | Vlieglijnen 6-14 (Ternaard) gevlogen buiten getijdenster<br>Vlieghoogte 440 m AGL       |
| 2015<br>(zomer)    | Fugro<br>(Eurosense)<br>Fugro Geospatial<br>B.V. (2015) | Riegl<br>Q680i       | 30-06-2015<br>1-7-2015                           | 14:08<br>15:10                   | 17:45<br>18:24                      | 6-20; 34-38<br>18; 21-33                           | Heldere hemel<br>Heldere hemel                            | Vlieghoogte 460 m AGL   |

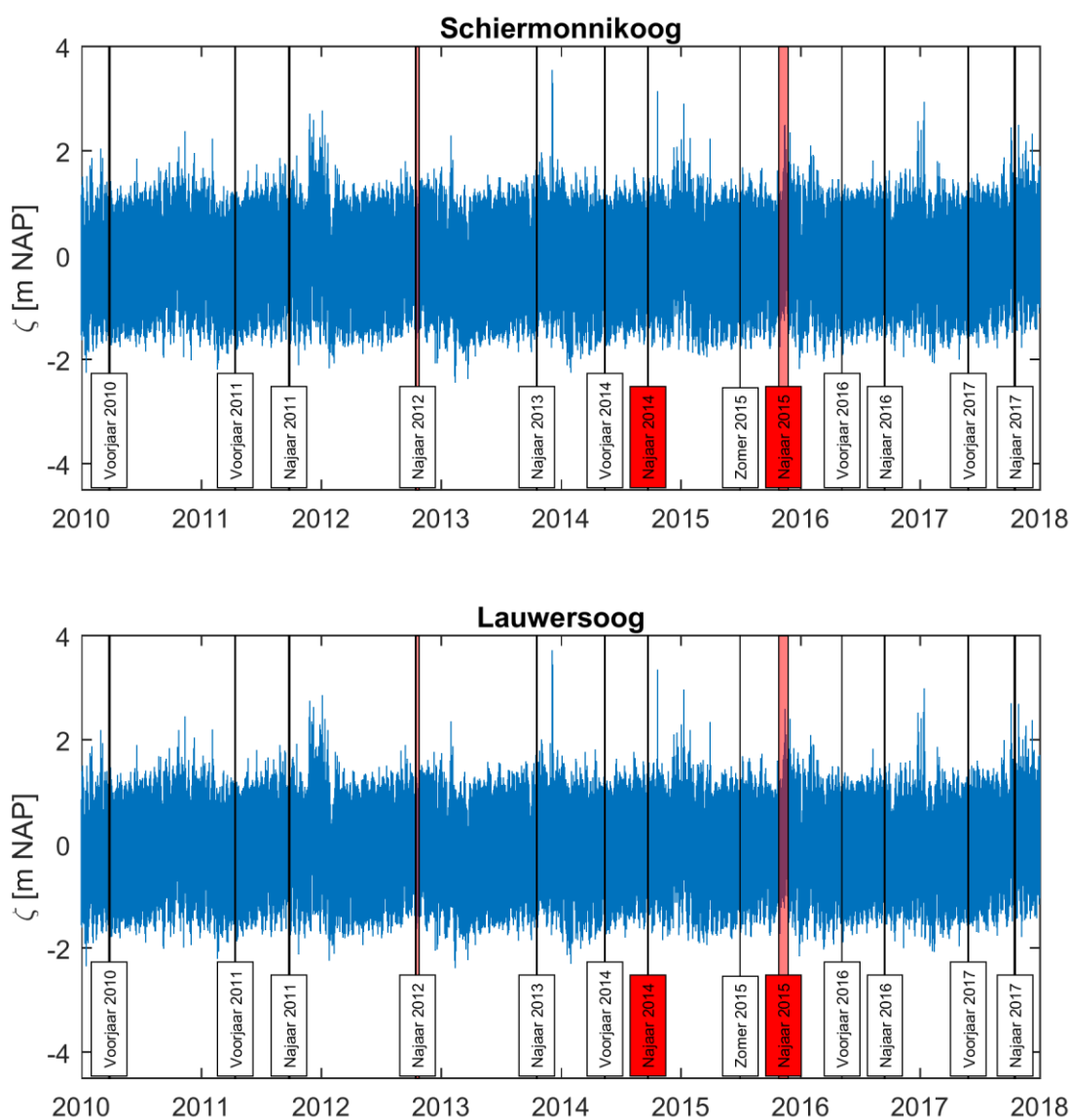
Tabel 5.1 Overzicht van vluchtgegevens van alle LiDAR opnamen (vervolg).

| LiDAR referentie   | Meetdienst en referentie              | Merk en type scanner | Data van opnamen                       | Uren van opname          |  | Vlieglijnen   | Weerscondities   | Opmerkingen  |
|--------------------|---------------------------------------|----------------------|--|--------------------------|--|---|--|--|
|                    |                                       |                      |  | Start                    | Eind   |   |  |  |
| 2015<br>(najaar)   | Eurosense<br><i>Eurosense (2016a)</i> | Riegl<br>Q680i       | 26-10-2015<br>8-11-2015<br>23-11-2015  | 14:03<br>12:22<br>15:03  | 16:55 (start*)<br>13:34 (start*)<br>16:38 (start*) | Noord, Zuid<br>Midden; noord<br>Midden; zuid<br><i>Figure 5</i> | Heldere hemel maar<br>later mist<br>Gestopt door bewolking | Vlieglijnen 20 t/m 23 buiten<br>getijvenster<br>Tot 15 dagen tussen meetdagen<br>Vlieghoogte 460 m AGL |
| 2016<br>(voorjaar) | Eurosense<br><i>Eurosense (2016b)</i> | Riegl<br>Q680i       | 5-5-2016<br>6-5-2016                   | 12:45 (**)<br>14:30 (**) | 18:45 (**)<br>20:12 (**)                           | 6-12; 26-39<br>27-9<br><i>Figure 2</i>                          | Heldere hemel<br>Heldere hemel                             | Vlieghoogte 460 m AGL  |
| 2016<br>(najaar)   | Aerodata<br><i>Aerodata (2016)</i>    | Riegl<br>LMS-780     | 14-9-2016<br>15-9-2016<br>16-9-2016    | 14:05<br>16:19<br>15:55  | 16:57<br>17:24<br>18:39                            | 8-14;20-23;33<br>15-17;33<br>15-19;24-32                        | Lichte nevel<br>Lichte nevel<br>Lichte nevel               | Vlieghoogte 460 m AGL  |
| 2017<br>(voorjaar) | Aerodata<br><i>Aerodata (2017)</i>    | Riegl<br>LMS-780     | 27-5-2017<br>28-5-2017                 | 16:27<br>17:39           | 20:02<br>19:58                                     | 1-21;33<br>1; 22-32   | Onbekend   | Vlieghoogte 460 m AGL  |
| 2017<br>(najaar)   | Aerodata<br><i>Aerodata (2017)</i>    | Riegl<br>LMS-780     | 15-10-2017<br>17-10-2017<br>18-10-2017 | 11:52<br>14:06<br>15:16  | 14:15<br>16:35<br>16:39                            | 1-16<br>22-33<br>17-21  | Onbekend   | Vlieghoogte 460 m AGL  |

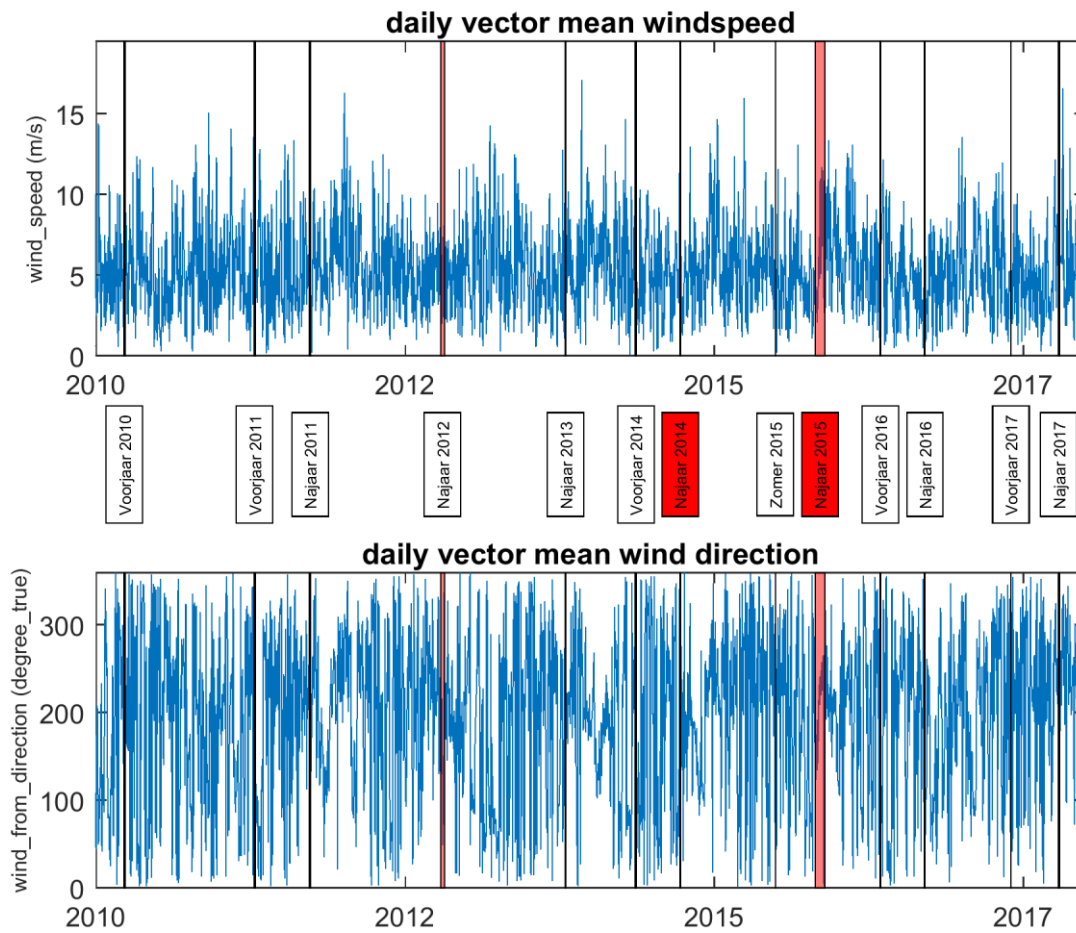
\*Geregistreeerde eindtijd is de starttijd van de vlieglijn. Duur van een vlieglijn is gemiddeld ongeveer 20 minuten

\*\*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.





Figuur 5.2 Tijdsreefs van de waterstand bij de getijmeetstations Schiermonnikoog en Lauwersoog. De tijdsintervallen van de LiDAR meetcampagnes zijn aangegeven in de figuur met verticale lijnen en rode vlakken.



Figuur 5.3 Tijdsreefs van windsnelheid (boven) en -richting (onder) bij het KNMI meetstation Lauwersoog. De tijdsintervallen van de LiDAR meetcampagnes zijn aangegeven in de figuur met verticale lijnen en rode vlakken.

## 5.5 Analyse indicatoren

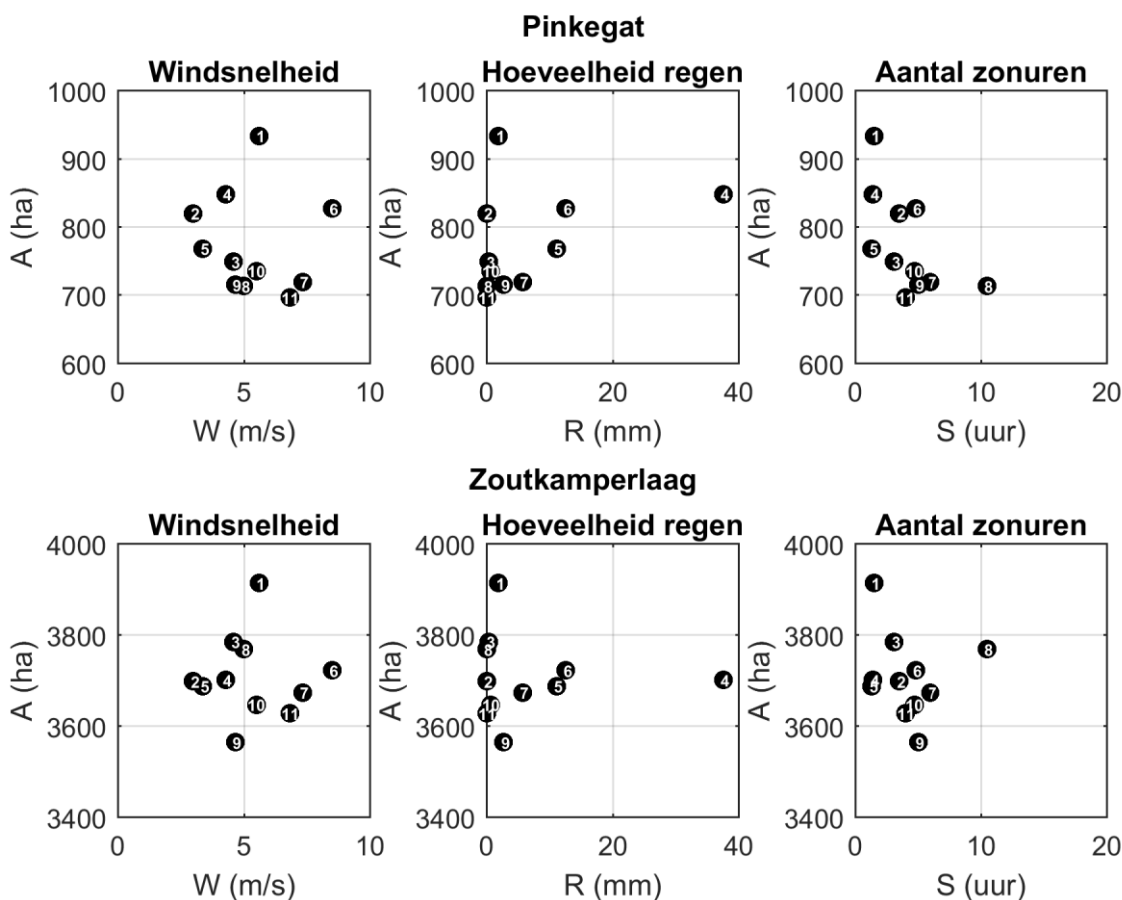
In deze paragraaf worden de indicatoren weergegeven en uitgezet tegen de veranderingen die in Hoofdstuk 3 en 4 zijn weergegeven. Voor deze analyse dient een parameter gedefinieerd te worden die de staat van het systeem (de wadplaten) weergeeft (de afhankelijke of responsvariabele). Er is voor gekozen deze te definiëren als het areaal van de wadplaten boven NAP 0 m, voor de twee kombergingsgebieden afzonderlijk (zie ook Figuur 4.4). In §5.5.1 wordt er gezocht naar een correlatie tussen de omgevingsfactoren en het gemeten areaal, de afhankelijke variabele is hier dan gedefinieerd als het areaal boven NAP 0 m dat is gemeten tijdens een LiDAR survey (A). In §5.5.2 wordt er gezocht naar een correlatie tussen omgevingsfactoren berekend over een periode tussen twee metingen, de afhankelijke variabele is hier dan ook gedefinieerd als het verschil in areaal (boven NAP 0 m) tussen twee metingen ( $\Delta A$ ). Omdat de relatie tussen de omgevingsfactoren en de responsvariabele (A,  $\Delta A$ ) geen lineair verband hoeft te zijn wordt de relatie gezocht door middel van scatterplots (in plaats van enkel correlatiecoëfficiënten).

### 5.5.1 Indicatoren omstandigheden tijdens de metingen

In Figuur 5.5 zijn de parameters m.b.t. de weersomstandigheden uitgezet tegen aan het areaal van de twee kombergingsgebieden (A). De nummering in de figuren duidt de LiDAR survey aan, dit is weergegeven in Tabel 5.4. Aan de hand van de figuur is op te maken dat geen van de parameters een duidelijke relatie vertonen met het gemeten areaal wadplaat boven NAP 0 m. Er wordt daarom verder geen aandacht besteed aan deze parameters.

Tabel 5.4 Nummering LiDAR metingen als parameter A.

| #  | Survey        |
|----|---------------|
| 1  | Voorjaar 2010 |
| 2  | Voorjaar 2011 |
| 3  | Najaar 2011   |
| 4  | Najaar 2012   |
| 5  | Najaar 2013   |
| 6  | Voorjaar 2014 |
| 7  | Zomer 2015    |
| 9  | Voorjaar 2016 |
| 10 | Najaar 2016   |
| 11 | Voorjaar 2017 |
| 12 | Najaar 2017   |

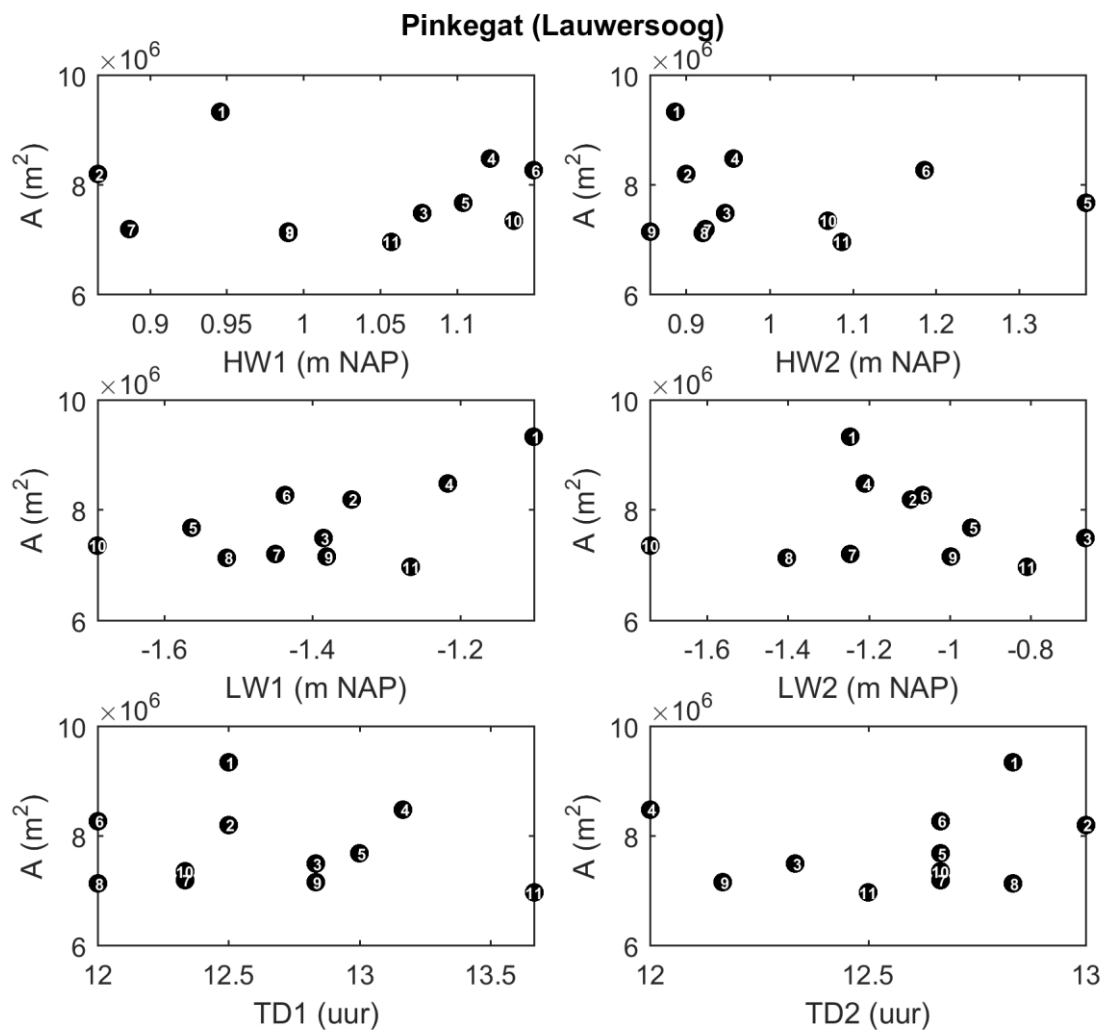


Figuur 5.4 Scatterplot van het areaal boven NAP 0,0 m, uitgezet tegen de meteorologische indicatoren tijdens de metingen (W, R en S, zie Tabel 5.2).

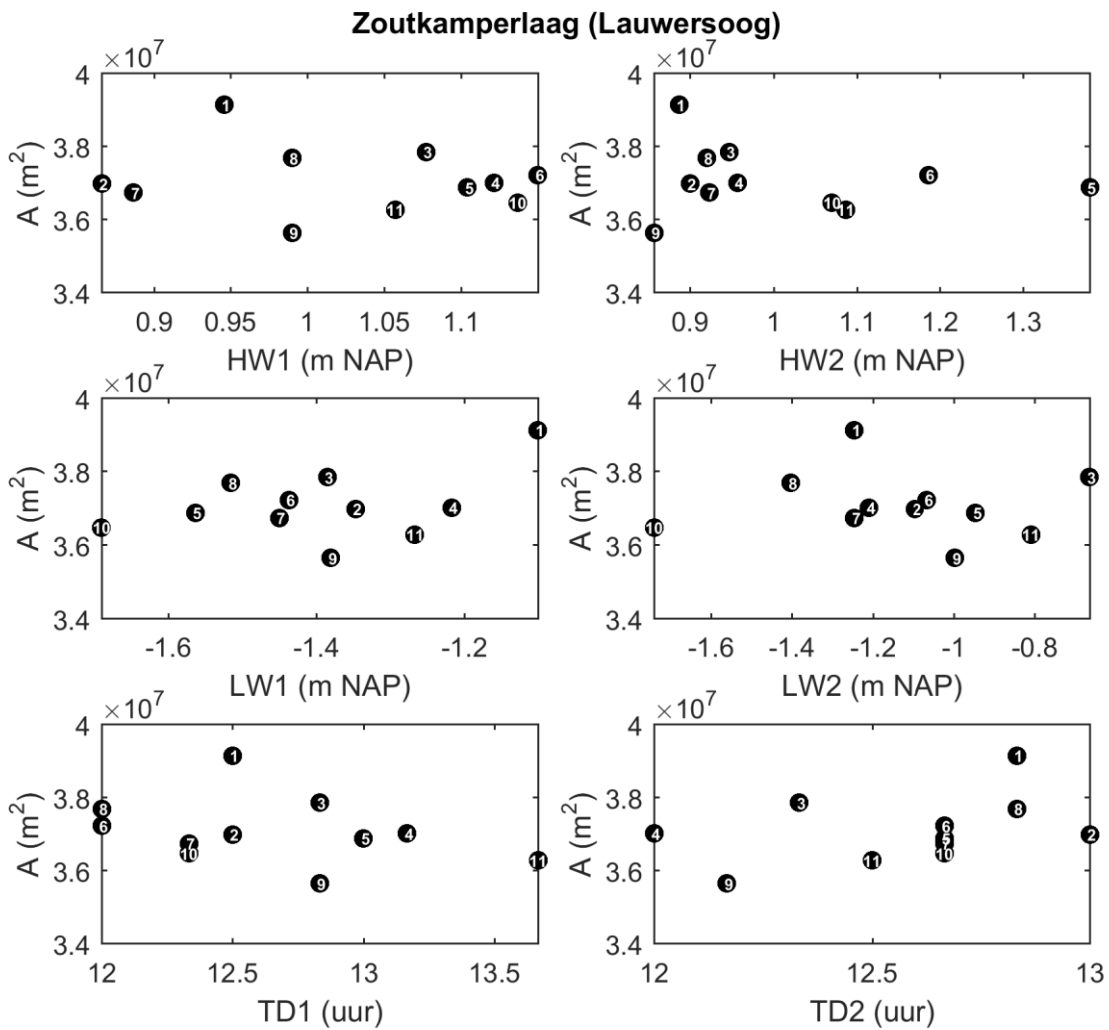
In Figuur 5.5 en Figuur 5.6 zijn de parameters die afgeleid zijn uit de waterstandgegevens van getijmeetstation Lauwersoog op eenzelfde wijze weergegeven (in Appendix C staan deze figuren voor getijmeetstation Schiermonnikoog). Uit de figuren blijkt dat alleen de parameter  $LW_1$  (i.e. gemiddelde van het niveau van laagwater tijdens de duur van de metingen) een relatie toont met het gemeten areaal wadplaat. De parameter  $LW_1$  lijkt een positieve correlatie te vertonen met A; dit betekent dat als het laagwater tijdens de metingen hoger is, het areaal wadplaat boven NAP 0 m groter zal zijn. Dit kan uitgelegd worden doordat tijdens de metingen voor een gedeelte van de wadplaten niet de hoogte van de wadplaat zelf ingemeten wordt, maar de waterspiegel van het water op de wadplaten. Het areaal boven een bepaald referentievlak zal dan toenemen doordat laaggelegen gebieden een hogere bodemligging toegekend krijgen. Daarnaast lijkt er een kritische waarde te zijn voor de parameter  $LW_1$ ; als het laagwater onder deze grens is dan heeft de waarde van de parameter geen invloed, boven de grens wordt het gemeten areaal hoger gelegen wadplaat groter bij hoger laagwater. Deze grenswaarde zorgt voor een ‘breekpunt’ in de relatie en lijkt ongeveer rond NAP -1,4 m te liggen. Een dergelijk ‘breekpunt’ in de relatie is een plausibel verband: als het laagwater laag genoeg is dan maakt het weinig uit hoe laag het is, maar als het laagwater te hoog staat tijdens de metingen is de hoeveelheid water op de wadplaten waarschijnlijk groter doordat de afstromingsgradiënt kleiner is en het water dus minder makkelijk de platen afstroomt.

De relatie tussen  $LW_1$  en de responsvariabele is verder onderzocht door de te variëren in de responsvariabele (A). De responsvariabele is hiervoor gedefinieerd als het areaal van de wadplaten boven NAP -0,5 m ( $A_{-0,5}$ ) en als het areaal boven NAP +0,5 m ( $A_{+0,5}$ ). Er werd

geen relatie gevonden tussen  $LW_1$  en  $A_{-0,5}$ . De relatie valt lager op de wadplaten waarschijnlijk weg omdat het areaal wadplaat boven NAP -0,5 m veel groter is waardoor de relatieve toename van areaal door water op de platen minder sterk uitgedrukt is. Tussen  $LW_1$  en  $A_{+0,5}$  werd de relatie wel gevonden, maar minder duidelijk dan voor de oorspronkelijk gekozen responsvariabele. Dit is verklaarbaar doordat het hogere gedeelte van de wadplaten eerder afstroomt tijdens de eb fase en water op de platen hier dus een minder grote rol speelt.



Figuur 5.5 Scatterplot van het areaal boven NAP 0,0 m van kombergingsgebied Pinkegat, uitgezet tegen de indicatoren HW1, LW1, TD1 en HW2, LW2 en TD2 (zie Tabel 5.2) berekend aan de hand van meetgegevens bij getijmeetstation Lauwersoog.



Figuur 5.6 Scatterplot van het areaal boven NAP 0,0 m van kombergingsgebied Zoutkamperlaag, uitgezet tegen de indicatoren HW1, LW1, TD1 en HW2, LW2 en TD2 (zie Tabel 5.2) berekend aan de hand van meetgegevens bij getijmeetstation Lauwersoog.



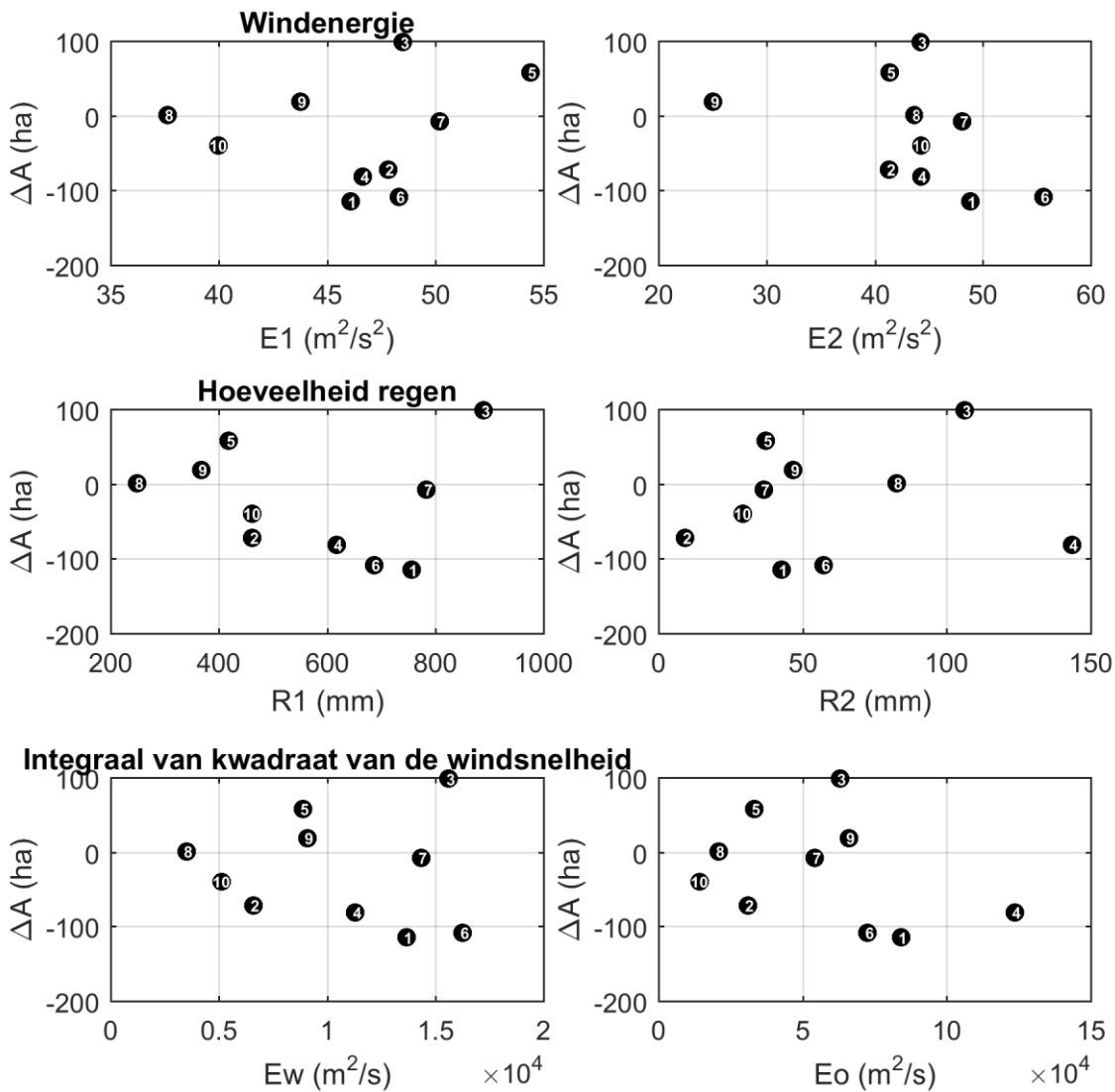
### 5.5.2 Indicatoren morfodynamische veranderingen

De parameters die zijn gedefinieerd om de aandrijving van morfodynamische verandering te kwantificeren zijn op eenzelfde wijze als in de vorige paragraaf uitgezet tegen de LiDAR metingen. De afhankelijke variabele die hiervoor wordt gebruikt is het verschil in gemeten areaal van de wadplaten tussen twee metingen ( $\Delta A$ , boven NAP 0 m). De analyse is voor de twee kombergingsgebieden apart weergegeven in Figuur 5.7 en Figuur 5.8, de nummering van de punten geeft het interval tussen twee metingen weer en is weergegeven in Tabel 5.5. Doordat enkele metingen zijn uitgefilterd en doordat er niet altijd twee keer per jaar gemeten is zitten er grote verschillen in het tijdsinterval. Uit de figuren blijkt dat er geen hele sterke correlatie te vinden is tussen de gedefinieerde parameters en  $\Delta A$ , alleen de parameters  $R_1$  en  $Ew_1$  duiden op een (matige) negatieve correlatie. De parameter  $Ew_1$  is een maat voor de windenergie van de west-georiënteerde wind. Een negatieve correlatie met  $\Delta A$  wordt verwacht omdat meer windenergie meer (en grotere) golven opwerkt waardoor er meer erosie van de wadplaten plaatsvindt. De parameter  $R_1$  lijkt ook een matig negatieve correlatie te vertonen met  $\Delta A$  maar dit komt doordat de hoeveelheid regen sterk gecorreleerd is met de west georiënteerde wind (correlatiecoëfficiënt  $r = 0,90$ ).

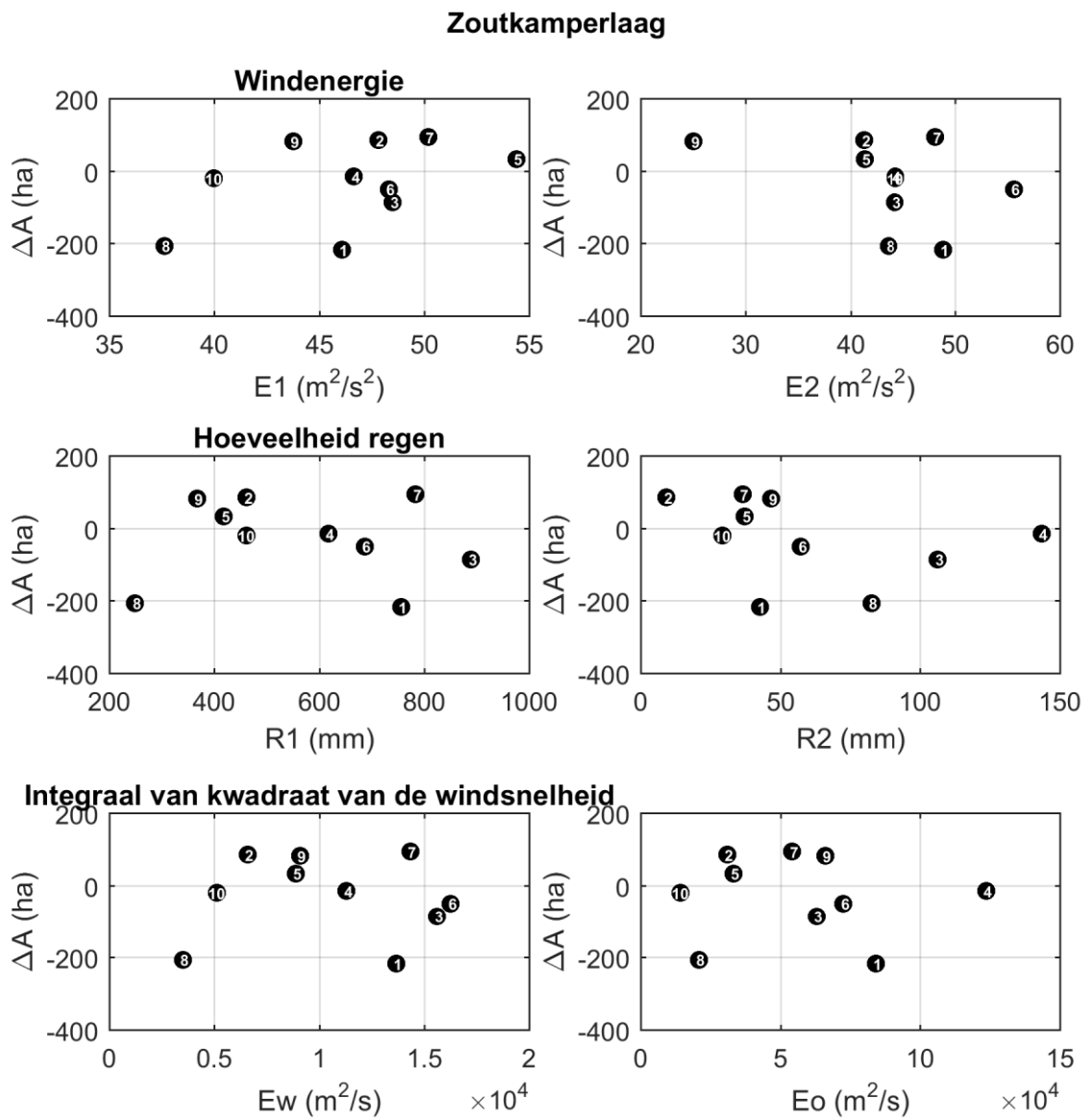
Tabel 5.5 Nummering intervallen tussen twee LiDAR metingen als parameter  $\Delta A$ .

| #  | Survey-interval               | Tijdsinterval (dagen) |
|----|-------------------------------|-----------------------|
| 1  | Voorjaar 2010 – Voorjaar 2011 | 382                   |
| 2  | Voorjaar 2011 - Najaar 2011   | 161                   |
| 3  | Najaar 2011 - Najaar 2012     | 384                   |
| 4  | Najaar 2012 - Najaar 2013     | 357                   |
| 5  | Najaar 2013 - Voorjaar 2014   | 205                   |
| 6  | Voorjaar 2014 - Zomer 2015    | 411                   |
| 7  | Zomer 2015 - Voorjaar 2016    | 309                   |
| 9  | Voorjaar 2016 - Najaar 2016   | 131                   |
| 10 | Najaar 2016 - Voorjaar 2017   | 253                   |
| 11 | Voorjaar 2017 - Najaar 2017   | 140                   |

## Pinkegat



Figuur 5.7 Scatterplot van het areaal boven NAP 0,0 m van kombergingsgebied Pinkegat, uitgezet tegen de parameters die gedefinieerd zijn om de aandrijving van morfologische verandering te kwantificeren (zie Tabel 5.2).



Figuur 5.8 Scatterplot van het areaal boven NAP 0,0 m van kombergingsgebied Zoutkamperlaag, uitgezet tegen de parameters die gedefinieerd zijn om de aandrijving van morfologische verandering te kwantificeren (zie Tabel 5.2).

## 5.6 Regressie-analyse

De analyse in vorige paragrafen duidt aan dat er een relatie bestaat tussen het niveau van het laagwater en het areaal boven NAP 0 m dat gemeten wordt tijdens een LiDAR survey. Daarnaast wordt er een matige relatie gevonden tussen de verandering in het gemeten areaal en de westelijke windforcering als aandrijvingsmechanisme. In deze paragraaf wordt onderzocht in hoeverre deze relaties het gemeten signaal kunnen verklaren door middel van een lineaire regressie-analyse. Als volgende stap wordt het signaal gecorrigeerd voor de invloedfactoren en worden de residuen gecorreleerd aan de grootte van (gemiddelde) bodemdaling in de twee kombergingsgebieden.

### 5.6.1 Regressie met $LW_1$

Met behulp van het opgestelde multivariabele regressiemodel is de relatie bepaald tussen  $LW_1$  en A. Voor deze regressie is de responsvariabele (A) eerst getransformeerd door middel van z-schaling:

$$A_z = \frac{A_i - \bar{A}}{\sigma}$$

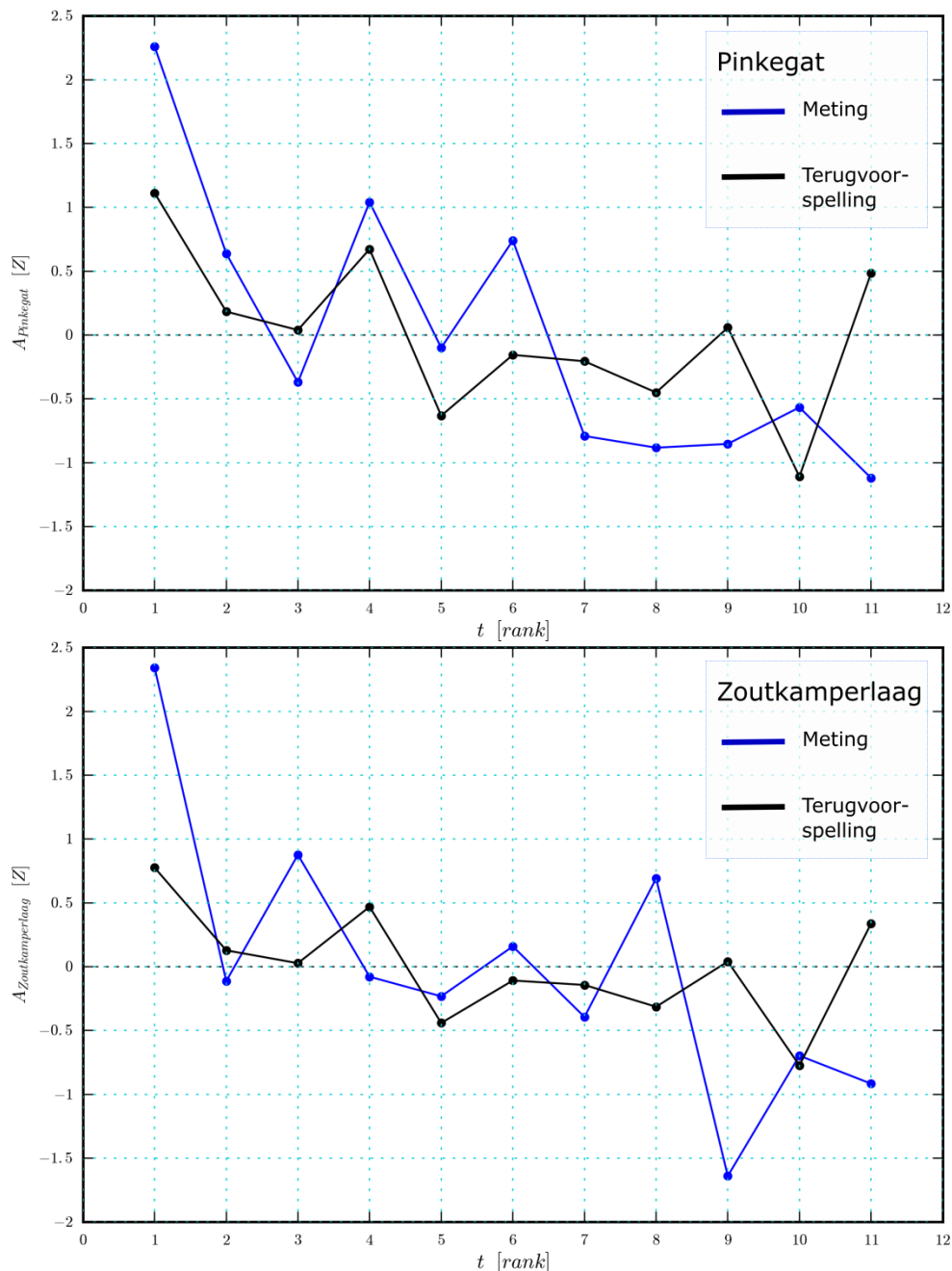
Met  $A_i$  het areaal boven NAP 0 m van één LiDAR meetcampagne,  $\bar{A}$  het gemiddelde van meetreeks van de arealen, en  $\sigma$  de standaardafwijking van de meetreeks. Aan de hand van de bepaalde relatie is het areaal van de kombergingsgebieden (A) terug voorspeld en deze terugvoorspelling is gevisualiseerd in Figuur 5.9, de correlatiecoëfficiënten tussen de meting en de terugvoorspelling zijn weergegeven in Tabel 5.6 (kolom  $LW_1$ ). De figuur en tabel tonen dat de mate van terugvoorspelling niet heel erg sterk is. In de vorige paragraaf is echter ook beschreven dat de relatie tussen  $LW_1$  en A uit twee delen bestaat: als  $LW_1$  lager is dan een waarde van ongeveer NAP -1,4 m dan valt de relatie weg, en boven deze waarde is er een positieve correlatie. Er is dus een gebroken lineaire afhankelijkheid van A met  $LW_1$ . Dit 'breekpunt' in de relatie is toegevoegd aan het regressiemodel en de terugvoorspelling is opnieuw uitgevoerd. In Tabel 5.6 staan de correlatiecoëfficiënten weergegeven van de terugvoorspelling. De kolom  $LW_1^-$  en  $LW_1^+$  duidt hierop een terugvoorspelling waarbij zowel de relatie voor als na het breekpunt is meegenomen in de terugvoorspelling, en de kolom  $LW_1^+$  duidt op een terugvoorspelling waarbij alleen de relatie boven het breekpunt is meegenomen. Het is duidelijk te zien dat met breekpunt de correlatie tussen meting en terugvoorspelling beter wordt en dat de relatie onder het breekpunt ( $LW_1^-$ ) niet bijdraagt aan de mate van terugvoorspelling. Er kan daarmee geconcludeerd worden dat het gemeten areaal (A) afhankelijk is van het niveau van laagwater als dit zich boven een grenswaarde bevindt, hiervoor wordt op het moment de grenswaarde van NAP -1,4 m gehanteerd. De correlatie die gevonden wordt tussen  $LW_1^+$  en A is echter matig. De terugvoorspelling van de relatie  $LW_1^+$ -A is gevisualiseerd in Figuur 5.10.

Tabel 5.6 Correlatiecoëfficiënten tussen de metingen en de terugvoorspelling

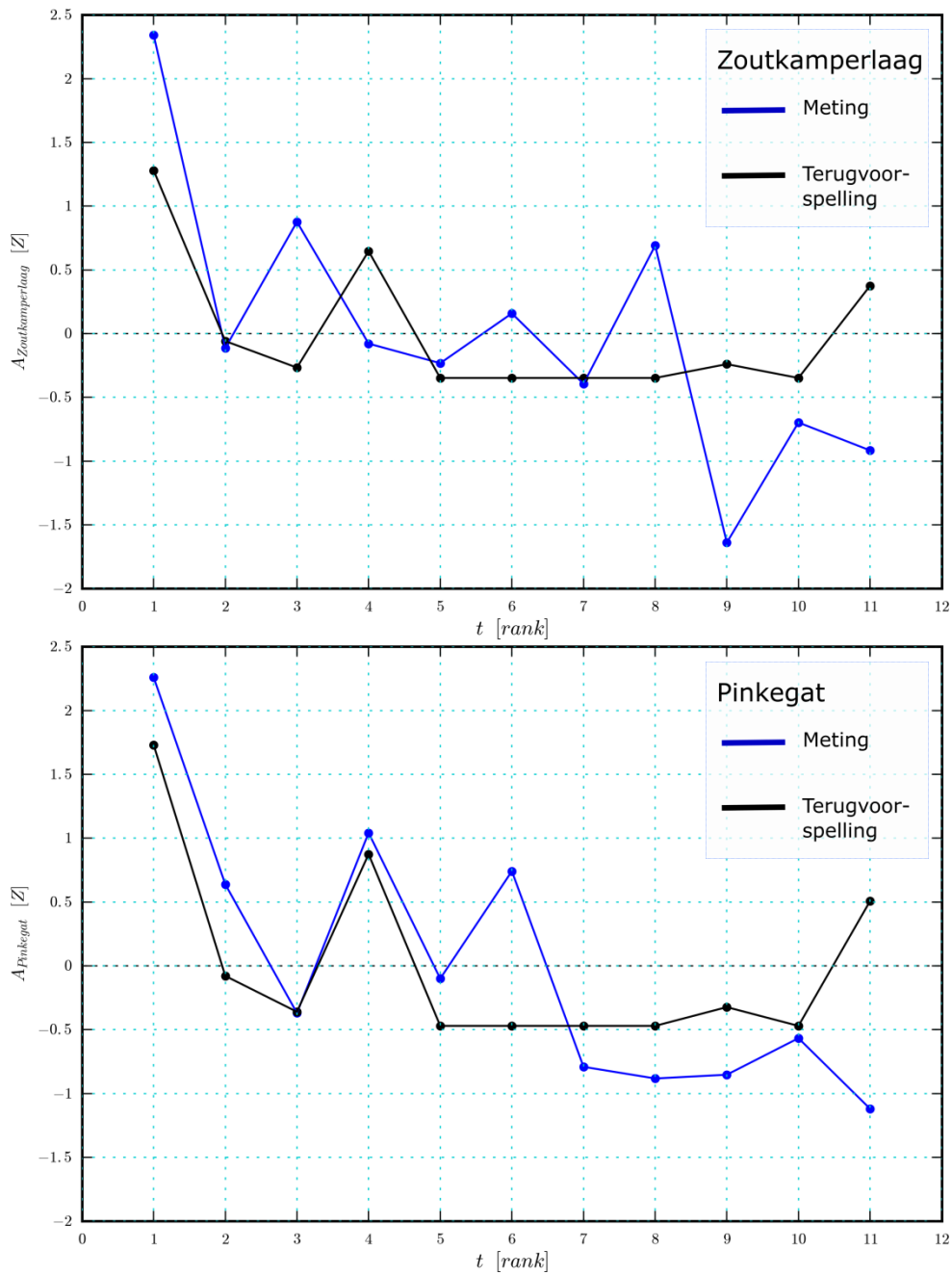
| Kombergingsgebied/Parameter | $LW_1$ | $LW_1^-$ en $LW_1^+$ | $LW_1^+$ |
|-----------------------------|--------|----------------------|----------|
| Pinkegat                    | 0,592  | 0,698                | 0,698    |
| Zoutkamperlaag              | 0,413  | 0,520                | 0,516    |

Daarnaast valt het op dat de relatie niet even sterk is voor beide kombergingsgebieden. Het is, in principe, wel te verwachten dat de parameter  $LW_1^+$  een gelijk effect heeft op beide kombergingsgebieden en de relatie dus ook ongeveer even sterk zal zijn. Het kan echter zijn dat de lokale morfologie van de platen de afstroming sterk beïnvloedt waardoor het effect van  $LW_1^+$  wel verschillend kan zijn. In Figuur 5.11 is het gemeten areaal van beide kombergingsgebieden tegen elkaar uitgezet, om aan te geven hoe deze met elkaar

gecorrleerd zijn. De correlatiecoëfficiënt van de twee variabelen is 0,68 en geeft daarmee aan dat het gemeten areaal in beide kombergingsgebieden ook matig gecorrleerd is. Vanzelfsprekend zal de relatie van het gemeten areaal met  $LW_1^+$  ook verschillend zijn voor beide kombergingsgebieden. Punten die de correlatie tussen het areaal van de twee kombergingsgebieden laat afnemen zijn 3 (Najaar 2011) en 8 (Voorjaar 2016). Deze punten worden in de terugvoorspelling van A op basis van  $LW_1^+$  ook slecht voorspeld in het kombergingsgebied van de Zoutkamperlaag (Figuur 5.10), maar niet voor het Pinkegat. De afwijking van het laatste punt is mogelijk te verklaren door de systematische uniforme verschuiving in de Zoutkamperlaag (zie §3.2.2).

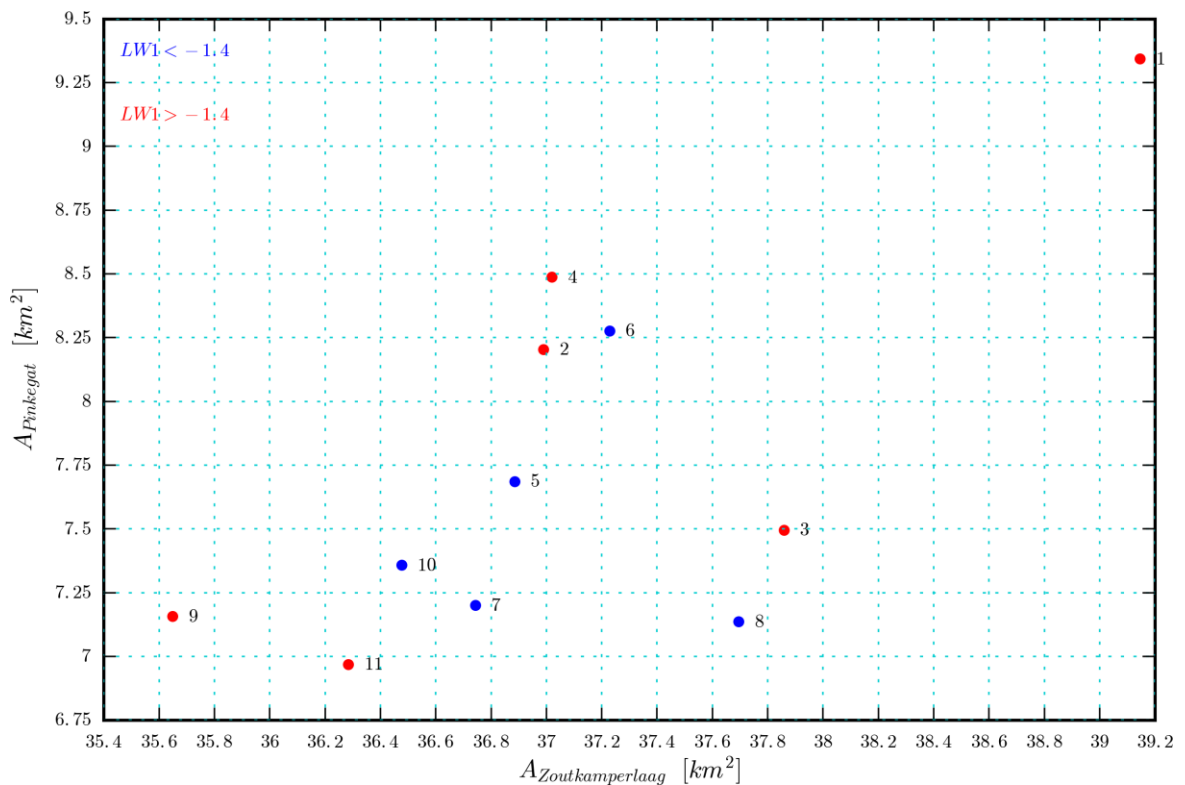


Figuur 5.9 Terugvoorspelling van A op basis van de lineaire regressie met  $LW_1$ , voor het Pinkegat (boven) en de Zoutkamperlaag (onder).



Figuur 5.10 Terugvoorspelling van  $A$  op basis van de lineaire regressie met  $LW_1$  boven het breekpunt NAP -1,4 m ( $LW_1^+$ ), voor het Pinkegat (boven) en de Zoutkamperlaag (onder).

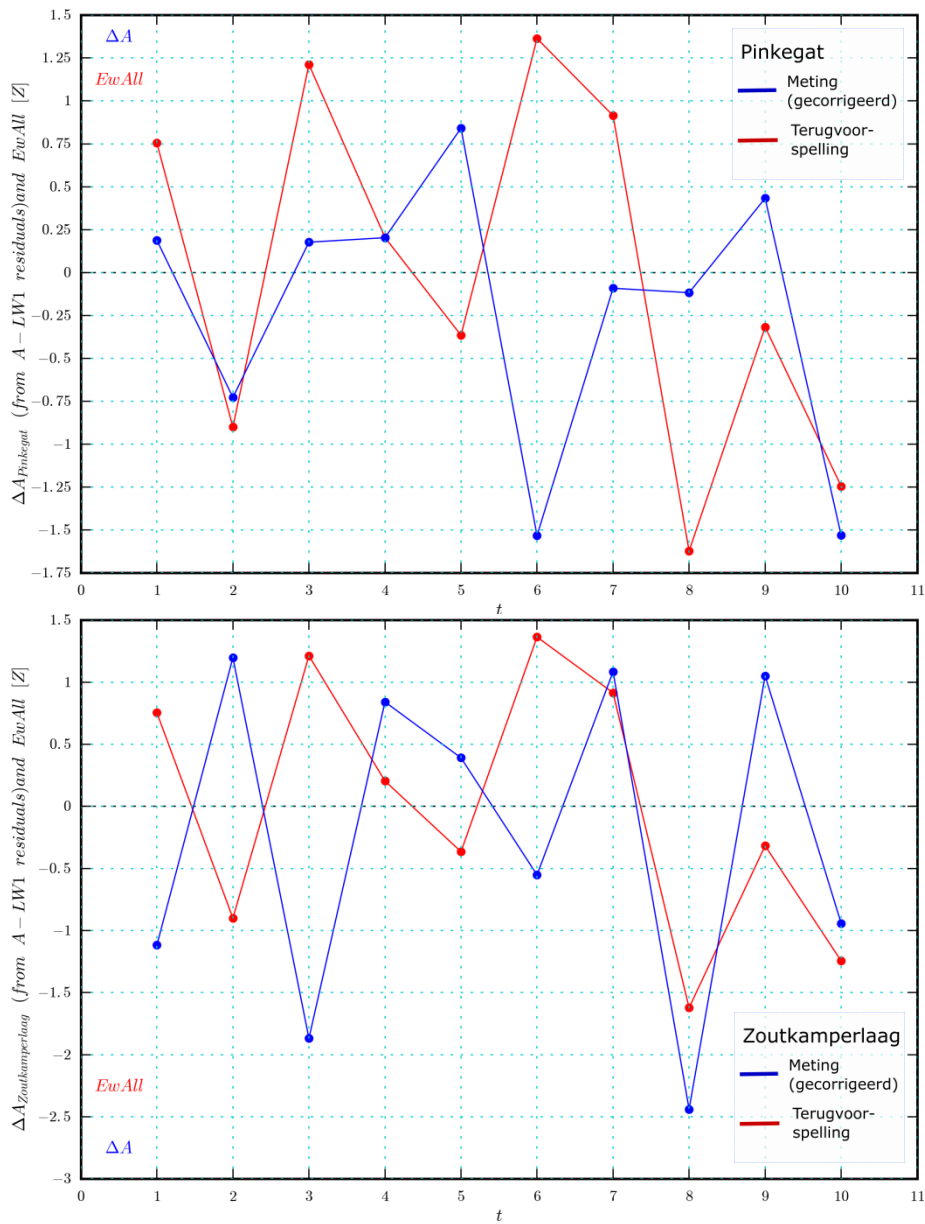




Figuur 5.11 Scatterplot van het gemeten areaal boven NAP 0 m van het Pinkegat (verticale as) en de Zoutkamperlaag (horizontale as).

### 5.6.2 Regressie met $E_w$

Het gemeten areaal ( $A$ ) is gecorrigeerd aan de hand van de lineaire relatie die met  $LW_1^+$  is gevonden, dit levert een gecorrigeerd signaal op ( $A^*$ ). Uit deze waarden is een verschil berekend ( $\Delta A^*$ ) en dit signaal is uitgezet tegen de parameter die gedefinieerd is om de forcering van morfologische verandering van de wadplaten te kwantificeren ( $E_w$ ). In Figuur 5.12 is de terugvoorspelling van  $\Delta A^*$  op basis van  $E_w$  getoond. De figuren tonen dat deze relatie niet sterk is en  $E_w$  dus maar heel slecht de variatie in  $\Delta A^*$  kan verklaren ( $r_{Pinkegat} = 0,07$ ;  $r_{Zoutkamperlaag} = 0,07$ ). Omdat de terugvoorspelling een dermate slecht resultaat oplevert is er voor gekozen het signaal  $\Delta A^*$  niet te corrigeren op basis van  $E_w$  alvorens dit te correleren aan bodemdaling.



Figuur 5.12 Terugvoorspelling van  $\Delta A^*$  (berekent aan de hand van  $A$ , welke gecorrigeerd is voor de relatie met  $LW_1^+$ ) op basis van de lineaire relatie met  $E_w$ .

### 5.6.3 Regressie met bodemdaling

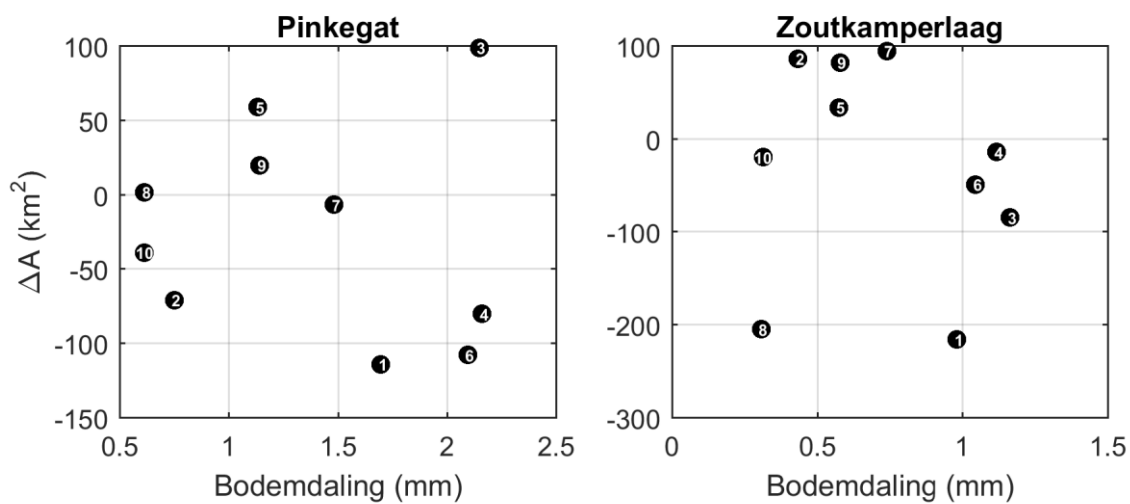
Om te bepalen of er een relatie bestaat tussen de bodemdaling in de kombergingsgebieden en het gemeten areaal is het signaal gecorreleerd aan de grootte van bodemdaling. Hiervoor is de bodemdaling gebruikt zoals gerapporteerd door Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (2018) (Tabel 2-10). De bodemdalingsgegevens in deze tabel geven de gemiddelde bodemdaling over het bekken voor één jaar (per 1 januari van dat jaar). Omdat de perioden tussen de LiDAR metingen verschillend zijn, zijn de bodemdalingsgegevens geïnterpoleerd naar de perioden tussen de LiDAR metingen (dezelfde perioden waarover  $\Delta A^*$  wordt berekend). De bodemdalingswaarden die hierdoor verkregen zijn, zijn weergegeven in Tabel 5.7. De correlatiecoëfficiënt tussen de berekende bodemdaling van de twee kombergingsgebieden is 0,99.

Tabel 5.7 Bodemdaling (in mm) voor de kombergingsgebieden, afgeleid voor de perioden tussen twee metingen.

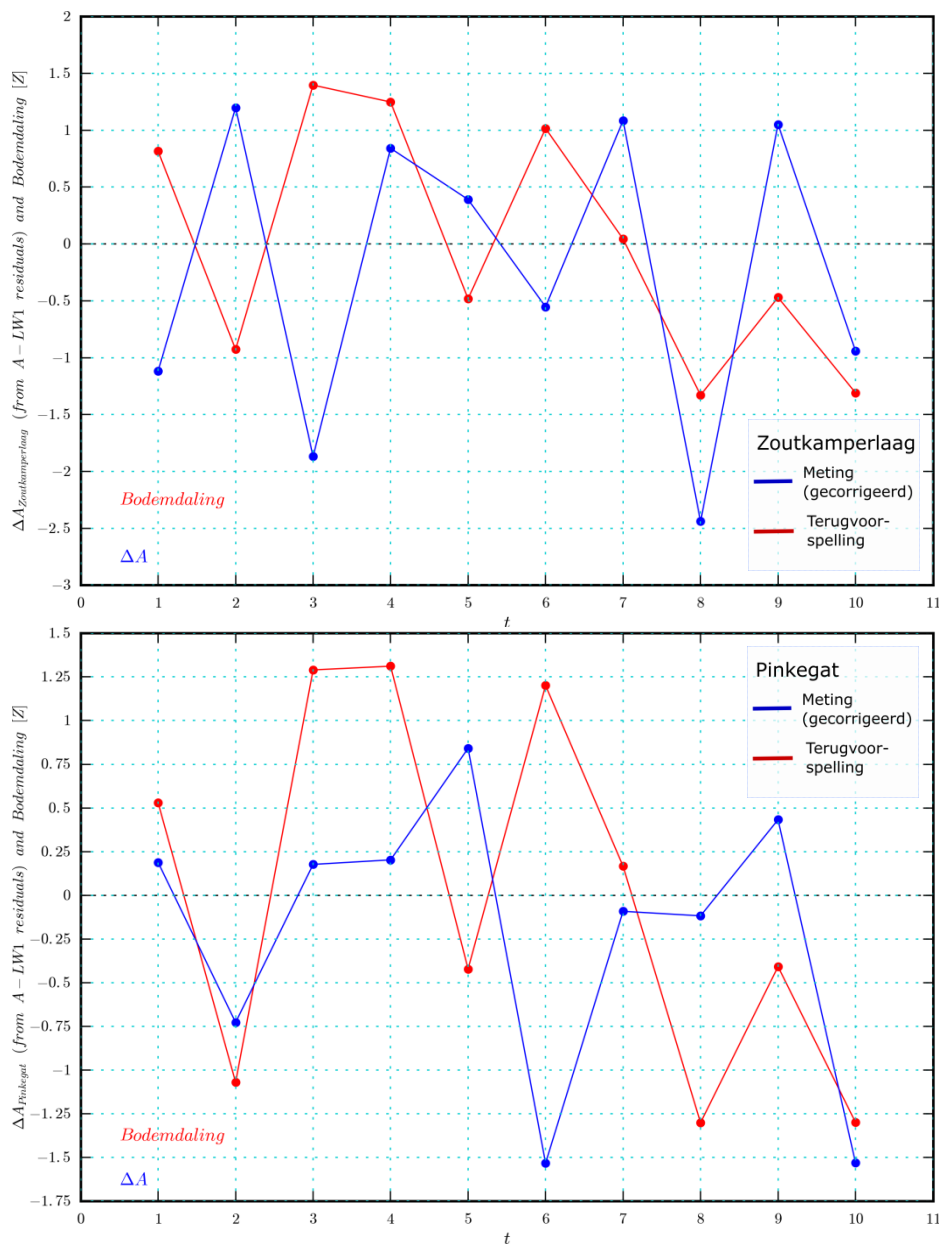
| Periode $\Delta A^*$          | #  | Pinkegat (mm/periode) | Zoutkamperlaag (mm/periode) |
|-------------------------------|----|-----------------------|-----------------------------|
| Voorjaar 2010 - Voorjaar 2011 | 1  | 1,70                  | 0,98                        |
| Voorjaar 2011 - Najaar 2011   | 2  | 0,75                  | 0,43                        |
| Najaar 2011 - Najaar 2012     | 3  | 2,15                  | 1,17                        |
| Najaar 2012 - Najaar 2013     | 4  | 2,16                  | 1,12                        |
| Najaar 2013 - Voorjaar 2014   | 5  | 1,13                  | 0,57                        |
| Voorjaar 2014 - Zomer 2015    | 6  | 2,10                  | 1,05                        |
| Zomer 2015 - Voorjaar 2016    | 7  | 1,48                  | 0,74                        |
| Voorjaar 2016 - Najaar 2016   | 8  | 0,61                  | 0,31                        |
| Najaar 2016 - Voorjaar 2017   | 9  | 1,14                  | 0,58                        |
| Voorjaar 2017 - Najaar 2017   | 10 | 0,61                  | 0,31                        |

In Figuur 5.13 is een scatterplot weergegeven van de gemiddelde bodemdaling in beide kombergingsperioden over de perioden tussen twee LiDAR metingen en het verschil in areaal tussen de metingen ( $\Delta A$ ). De scatterplots tonen dat er geen duidelijke correlatie is tussen de twee variabelen, de correlatiecoëfficiënt is voor beide kombergingsgebieden is dan ook laag ( $r_{\text{Pinkegat}} = -0,11$ ;  $r_{\text{Zoutkamperlaag}} = -0,18$ ).

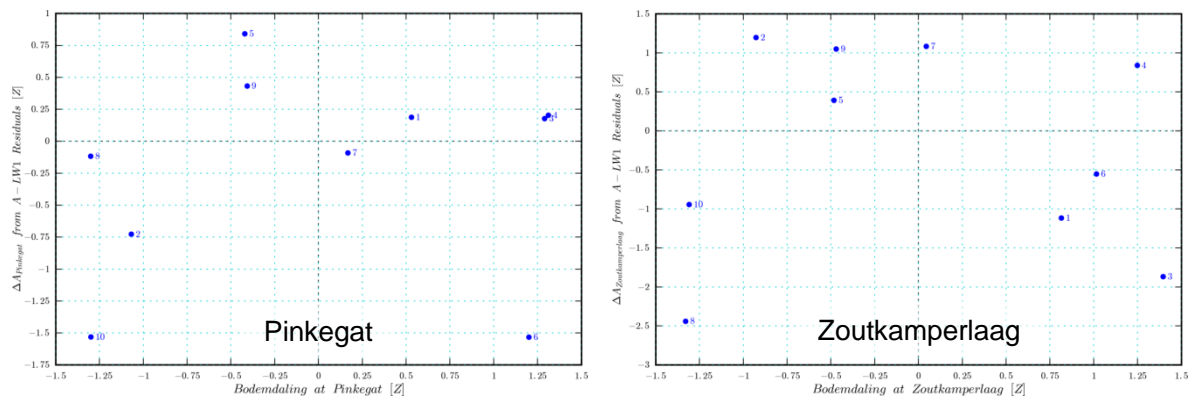
Op basis van de relatie gevonden in §5.6.1 is het signaal van het areaal gecorrigeerd voor de laagwaterstand. In Figuur 5.14 is de terugvoorspelling weergegeven die gevonden wordt op basis van een lineaire regressie tussen  $\Delta A^*$  en de bodemdalingsgegevens uit Tabel 5.7. De tijdseries tonen dat ook het gecorrigeerde signaal ( $\Delta A^*$ ) geen duidelijke samenhang heeft met de gemiddelde bodemdaling. De correlatiecoëfficiënten tussen de terugvoorspelling en de metingen is dan ook zeer laag ( $r_{\text{Pinkegat}} = 0,15$ ;  $r_{\text{Zoutkamperlaag}} = -0,02$ ). In Figuur 5.15 zijn de scatterplots weergegeven van de bodemdaling in de kombergingsgebieden en  $\Delta A^*$ , de figuren duiden aan dat er niet direct een ander verband tussen de gegevens te vinden is dan de lineaire relatie waarmee de regressie momenteel is uitgevoerd. Op basis van de figuren in dit hoofdstuk lijkt er dus geen duidelijke relatie te zijn tussen het gemeten verschil in areaal en de gemiddelde bodemdaling in de kombergingsgebieden.



Figuur 5.13 Scatterplots van de grootte van bodemdaling en het verschil in gemeten areaal ( $\Delta A$ ).



Figuur 5.14 Terugvoorspelling van  $\Delta A^*$  op basis van de bodemdaling in de kombergingsgebieden.



Figuur 5.15 Scatterplots van bodemdaling en het gecorrigeerde verschil in gemeten areaal ( $\Delta A^*$ ).

## 5.7 Discussie

In dit rapport is de analyse van de LiDAR data van het Friesche Zeegat opnieuw uitgevoerd en uitgebreid met twee nieuwe metingen uit het monitoringsjaar 2017. De morfologische analyse van de LiDAR data laat zien dat er veranderingen waar te nemen zijn in wadplaat hoogte en –areaal, namelijk een afname in hoogte en areaal over de duur van de meetreeks (2010-2017). De afname is echter geen gelijkmatig (lineair) verloop maar geconcentreerd in zeer korte perioden (een half tot één jaar) tussen twee metingen. Deze korte-termijn fluctuaties zijn van dezelfde orde-grootte als de totale afname over de gehele meetreeks. Vanwege het korte tijdsinterval en de grootte van de fluctuaties is het dan ook niet eenvoudig om deze veranderingen toe te schrijven aan morfologische dynamiek of bodemdaling (in tegenstelling tot een gelijkmatig lineair verloop). Om beter begrip te krijgen van de oorzaak van deze korte-termijn fluctuaties is er een analyse uitgevoerd naar omgevingsfactoren die de metingen en de morfologische dynamiek beïnvloeden.

Uit deze analyse is gebleken dat er een relatie te vinden is tussen het areaal dat gemeten wordt met behulp van de LiDAR metingen en het niveau van het laagwater tijdens de metingen. Dit komt doordat een hoge laagwaterstand zorgt voor een kleinere afstromingsgradiënt waardoor er meer water op de platen aanwezig blijft tijdens de metingen. Als gevolg wordt het niveau van de waterspiegel op de platen ingemeten in plaats van de hoogte van de wadplaten. Gegeven deze relatie kan het signaal gecorrigeerd worden en kan, theoretisch, een betere schatting verkregen worden van het werkelijke areaal van de wadplaten. Het gemeten areaal is dan ook op basis van de gevonden relatie gecorrigeerd. Als eerste inschatting is hiervoor een lineaire relatie gebruikt met het niveau van de laagwaterstand boven een drempelwaarde van NAP -1,4 m. Het is echter de vraag of een lineaire relatie wel een juiste benadering is, aangezien de toename in areaal over de wadplaten met de hoogte niet lineair verdeeld is (zie de hypsometrische curven). Daarnaast wordt de dataset gecorrigeerd aan de hand van één waarde voor de laagwaterstand tijdens de metingen (gemiddelde van de laagwaterstand tijdens de metingen), deze is echter variabel gedurende de metingen en tussen verschillende meetdagen en heeft dus ook ruimtelijk verschillend effect. Aan de hand van de multispectrale beelden is het mogelijk een onderscheid te maken tussen wad en water (Schrijvershof et al., 2017) en kan een inschatting gegeven worden voor welk gedeelte van de wadplaten de bodemhoogte beïnvloedt wordt door water op de platen.

Op basis van het gecorrigeerde signaal is er een correlatie gezocht met de forcering voor morfodynamische verandering. Hoewel er duidelijk morfologische veranderingen worden waargenomen in de dataset (migratiepatronen) is er geen correlatie gevonden met de forcering. Dit kan een aantal oorzaken hebben:

- De gekozen parameter om de forcering te kwantificeren is niet juist;
- De correctie van het signaal op basis van de laagwaterstand is geen juiste correctie;
- Er zijn meer omgevingsfactoren die het gemeten signaal beïnvloeden naast de laagwaterstand.

Bovengenoemde laatste twee factoren kunnen ook de reden zijn dat er geen correlatie met bodemdaling gevonden wordt. Het is echter ook mogelijk dat er geen correlatie is tussen het gemeten areaal en bodemdaling doordat het aanbod van sediment groot genoeg is om de bodemdaling aan het oppervlak te compenseren. Door de meetreeks uit te breiden kan de relatie tussen het gemeten oppervlak en de laagwaterstand nauwkeuriger vastgesteld worden en kunnen mogelijk lange termijn trends in het (gecorrigeerde) signaal gedetecteerd worden



## 6 Conclusies en aanbevelingen

### 6.1 Conclusies

De morfologische analyse van de wadplaten in het Friesche Zeegat is uitgebreid met twee nieuwe LiDAR datasets die in het voorjaar en najaar 2017 zijn ingewonnen. Deze datasets zijn samen met alle voorgaande datasets opnieuw geaggregeerd (vergrid) van puntenwolken tot punten op een regelmatig rooster om consistentie in de verwerkingsmethode te kunnen waarborgen. Twee van de dertien datasets (Najaar 2014 en Najaar 2015) worden niet gebruikt voor de morfologische analyse omdat deze niet correct zijn ingemeten.

Het doel van de morfologische analyse is onderzoeken of het areaal droogvallend wad sinds de start van de meetcampagne (2010) is veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning.

1. *Welke morfologische veranderingen in het Friesche Zeegat zijn te detecteren aan de hand van de meetgegevens?*

De LiDAR gegevens laten zien dat er gedurende de periode van de meetreeks (2010-2017) morfologische veranderingen optreden binnen de kombergingsgebieden. Een ontwikkeling die voor veel platen wordt waargenomen is erosie aan de westelijke en sedimentatie aan de oostelijke zijde, de platen migreren hierdoor in geheel in oostelijke richting.

2. *Is er een verandering in droogvallend wad?*

Aan de hand van de LiDAR data is er een afname in droogvallend wad waar te nemen in beide kombergingsgebieden. Deze afname heeft geen geleidelijk lineair verloop over de gehele meetreeks maar is geconcentreerd in korte perioden.

- a. *Wat zijn de mogelijke oorzaken van deze veranderingen?*

Een gedeelte van de fluctuaties wordt verklaard door de aanwezigheid van water op de platen tijdens de metingen. Ondanks het hanteren van een drempelwaarde voor het waterniveau in de geulen tijdens de metingen (NAP - 0,70 m) zorgt achter gebleven water voor een toename van de gemeten bodemhoogte van de wadplaten (en daarmee het areaal boven een referentievlak). De hoogte van het laagwater tijdens de metingen beïnvloedt de afstromingsgradiënt en daarmee de hoeveelheid water dat op de platen achter blijft.

- b. *Wat zijn de consequenties?*

De consequentie is dat het gemeten signaal sterk beïnvloedt wordt door de omstandigheden (laagwaterstand) tijdens de metingen. Het gemeten signaal kan gecorrigeerd worden voor de omstandigheden, het is echter de vraag of deze correctie juist is en in hoeverre deze andere onzekerheden introduceert.

- c. *Zijn deze veranderingen te relateren aan bodemdaling door gaswinning?*  
De regressie-analyse toont aan dat het verschil in wadplaatareaal (berekent op basis het gemeten dat areaal dat is gecorrigeerd voor de relatie met de laagwaterstand) niet gecorreleerd is met de gemiddelde bodemdaling in de kombergingsgebieden.

## 6.2 Aanbevelingen

Uit de studie volgt één aanbeveling:

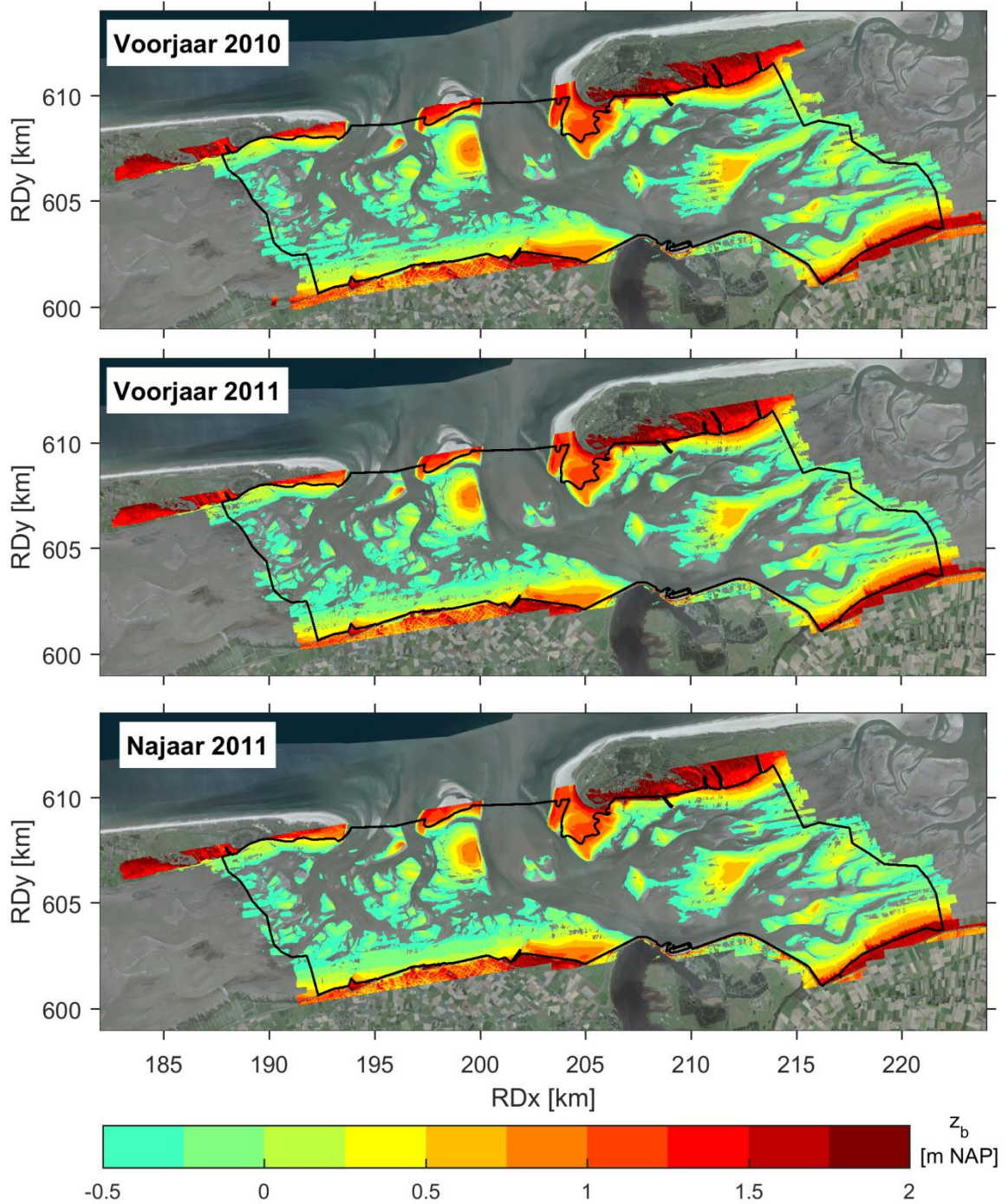
De datasets van voorjaar en najaar 2016 laten een systematische verandering zien van een deelgebied van de dataset. Daarnaast zijn er sprongen in de morfologische ontwikkeling van de wadplaten waar te nemen. Deze sprongen komen toevalligerwijs overeen met de periode waarin er gewisseld is van meetdienst. Tijdens het volgende monitoringsjaar moet uitgezocht worden of het verschil in voorbereiding van de meetdiensten dergelijke veranderingen kan verklaren.

## Referenties

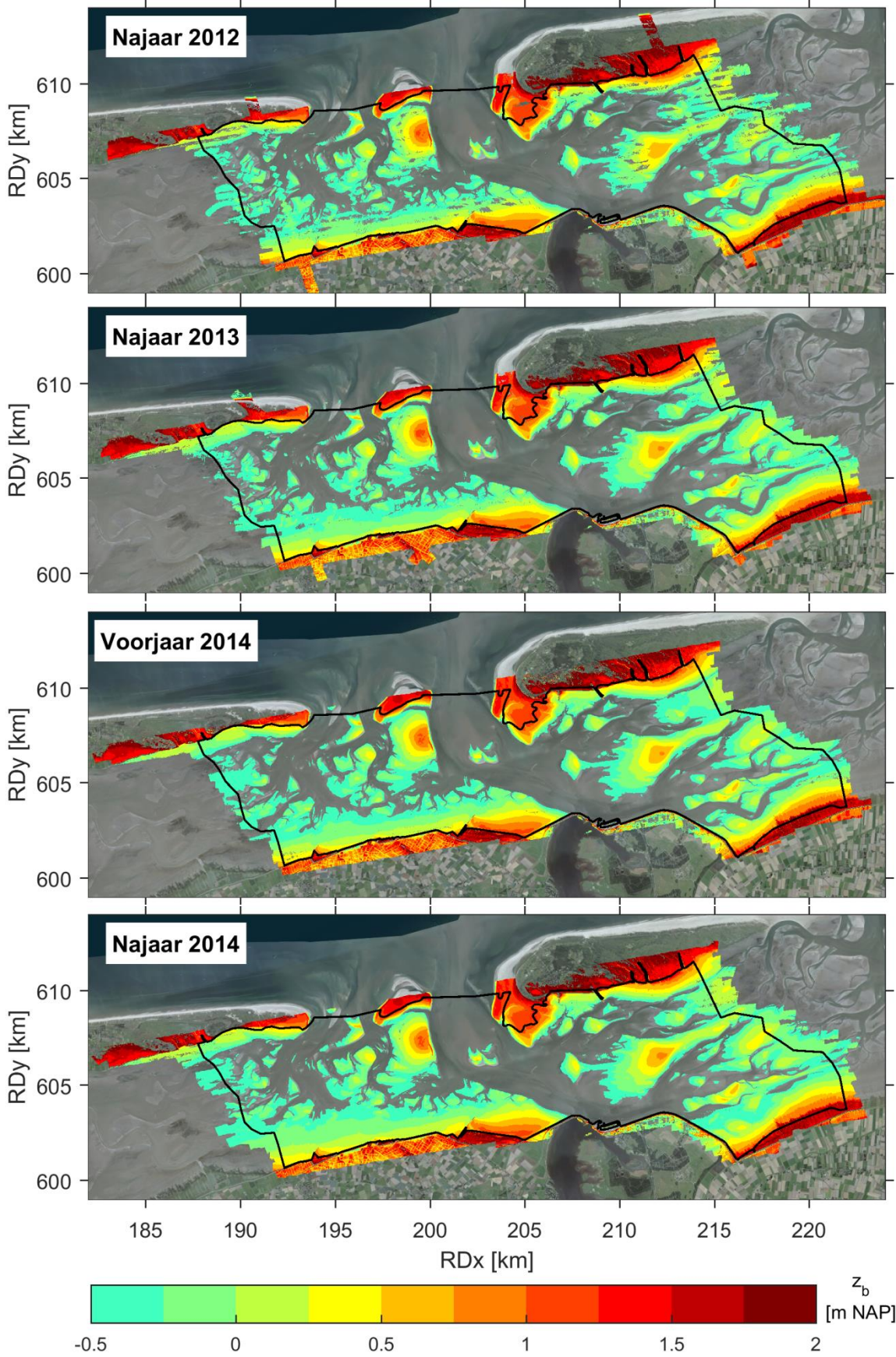
- Aerodata. (2016). *QUALITY REPORT WADDENZEE*.
- Aerodata. (2017a). *QUALITY REPORT WADDENZEE*.
- Aerodata. (2017b). *QUALITY REPORT WADDENZEE*.
- Arentz, L., & Vroom, J. (2014). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2013). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1209136-000*.
- Cronin, K., & Wang, Z. B. (2012). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1204654-000*.
- Elias, E., Bruens, A. (2013). *Beheerbibliotheek Ameland. Feiten & cijfers ter ondersteuning van de jaarlijkse toetsing van de kustlijn. Deltares rapport 1207724-004*.
- Elias, E., Wang, Z. B., & Cronin, K. (2013). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2012). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1206958-000*.
- Eurosense. (2016a). *Report Lidar Survey. Waddenzee Autumn survey 2015*.
- Eurosense. (2016b). *Report Lidar Survey Waddenzee Spring survey 2016*.
- Fugro Geospatial B.V. (2010). *FUGRO AERIAL MAPPING Survey 2010. Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog*.
- Fugro Geospatial B.V. (2011a). *FLI-MAP survey for Nederlandse Aardolie Maatschappij. Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog Autumn 2011*.
- Fugro Geospatial B.V. (2011b). *FUGRO AERIAL MAPPING Survey 2011. Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog*.
- Fugro Geospatial B.V. (2012). *FLI-MAP survey for Nederlandse Aardolie Maatschappij. Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog Autumn 2012*.
- Fugro Geospatial B.V. (2013). *Waddenzee LiDAR Survey, Final report, version 1*.
- Fugro Geospatial B.V. (2014a). *Waddenzee LiDAR Survey May 2014, Final report, version 1*.
- Fugro Geospatial B.V. (2014b). *Waddenzee LiDAR Survey September 2014, Final report, version 141121*.
- Fugro Geospatial B.V. (2015). *Waddenzee LiDAR Survey July 2015, (July)*.
- Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V. (2018). *Gaswinning vanaf de locaties Moddergat , Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2017*.
- Schrijvershof, R. (2017). *Memo n.a.v. aandachtspunten rapport Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2016)*.
- Schrijvershof, R. A., Nederhoff, C. M., Haag, A., & Piening, H. (2017). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2016). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 11200469-000*.
- Schrijvershof, R. A., & Vroom, J. (2016). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2015). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1221249-000*.
- Vroom, J., & Beekhuizen, J. (2015). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2014). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1210543-000*.
- Wang, Z.B., 2007, *Morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat, Analyse naar de mogelijke invloed van bodemdaling, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z3973*.
- Wang, Z. B., Cronin, K., & Ormond, M. (2010). *Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Rapport 1202285-000*.



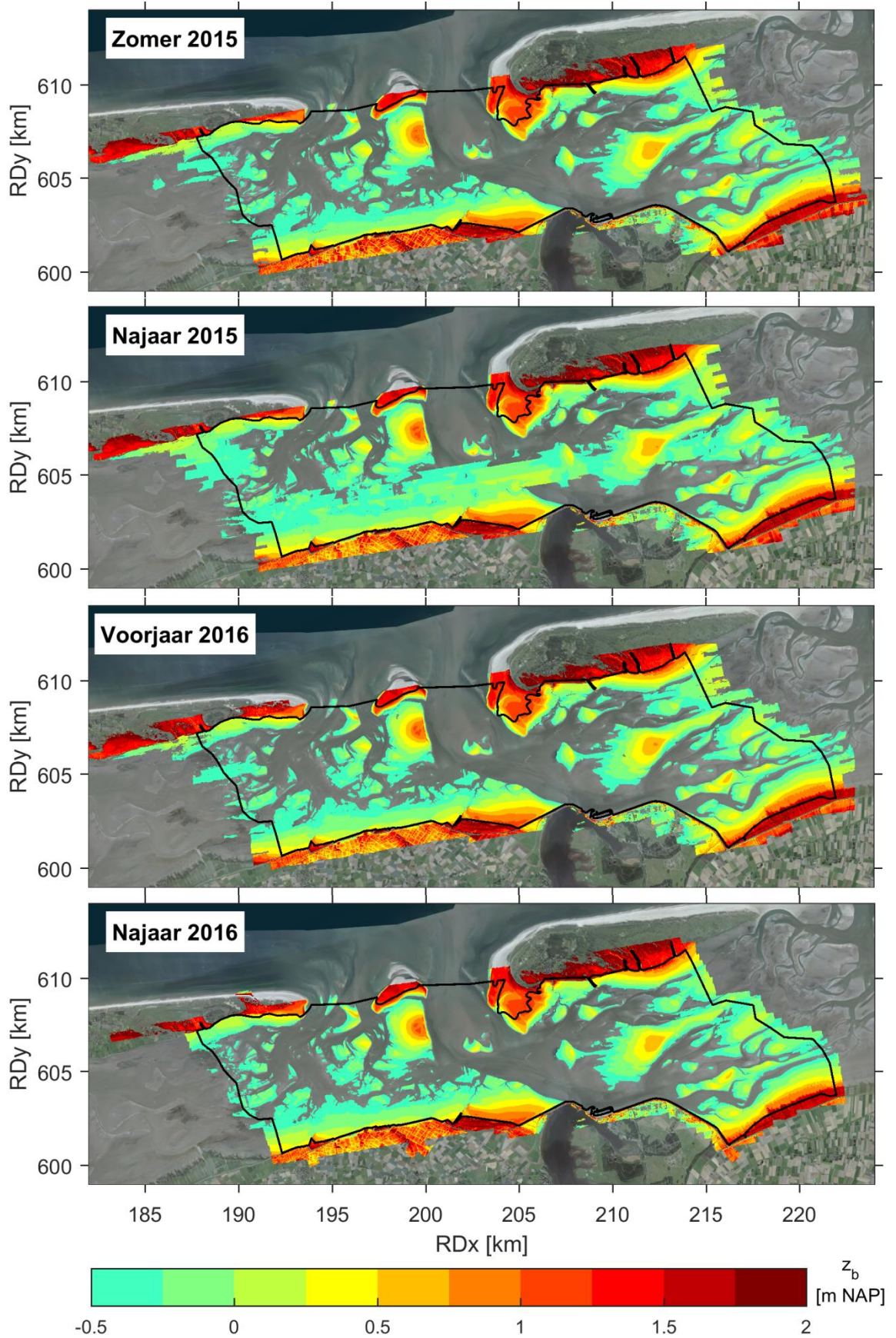
## A Digitale hoogtekarten



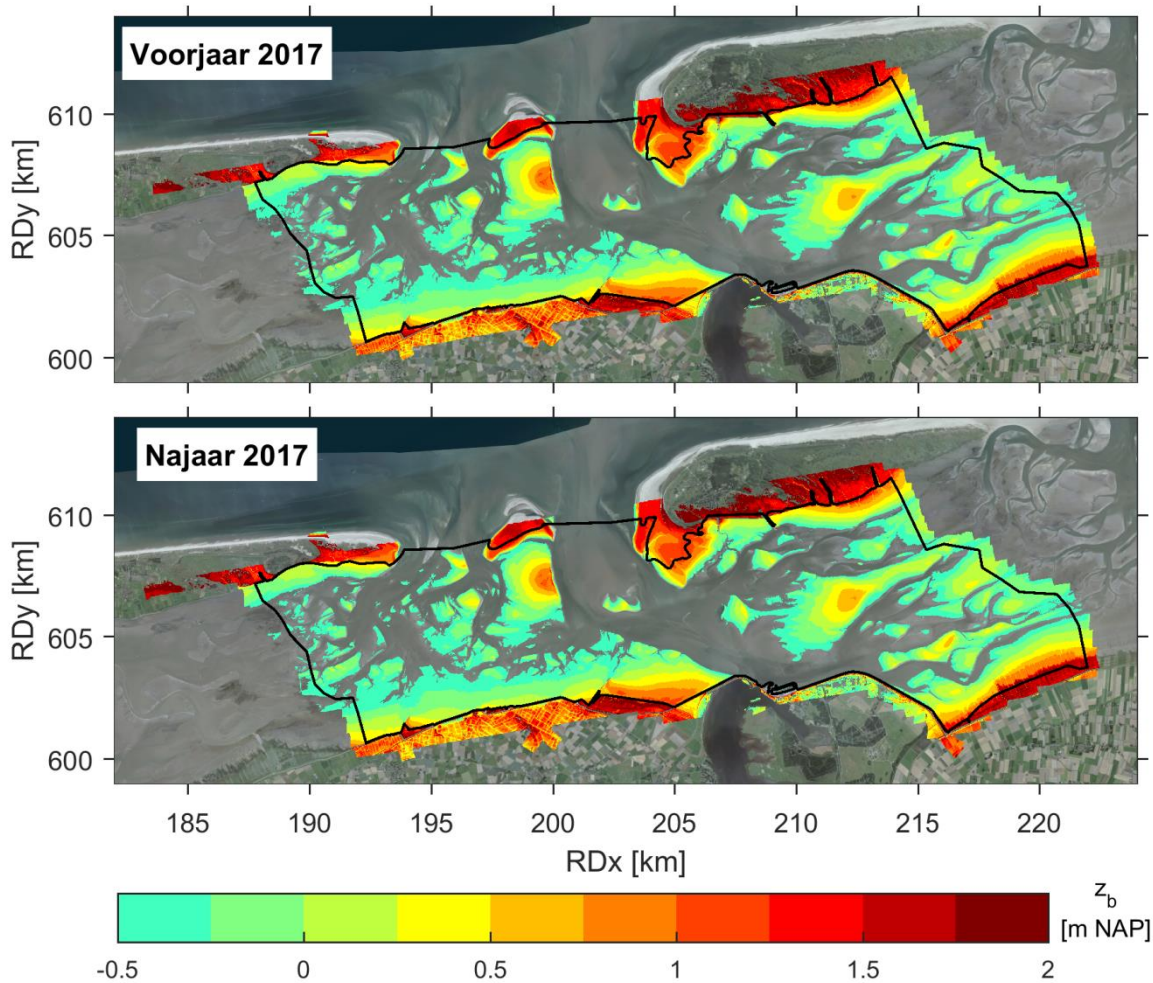












Figuur A.1 Digitaal hoogtebeeld van alle LiDAR opnamen waarbij datapunten met een hoogteligging < NAP -0,5 zijn uitgefilterd.

## B Dataverwerkingsmethoden

### B.1 Inleiding

Deltares heeft dit jaar alle LiDAR opnamen opnieuw verwerkt geaggregeerd (vergrid) van puntenwolken naar regelmatige roosters. De verwerking is opnieuw uitgevoerd voor de gehele meetreeks om een consistente verwerkingsmethode te kunnen waarborgen. Daarnaast zijn er enkele aanpassingen in de verwerkingsprocedure doorgevoerd, deze zijn:

4. De LAS-punten filteren op uitschieters in plaats van de verwerkte (vergride 1x1m) punten te filteren. Uitschieters worden op een eenvoudige wijze verwijderd door de punten met een hoogteligging van NAP +2m te verwijderen. Deze harde drempelwaarde is correct omdat we enkel geïnteresseerd zijn in de hoogteligging van de wadplaten en deze niet boven het peil NAP +2 m gelegen zijn.
5. De LAS-punten rechtstreeks aggregeren naar een grid van 10x10m zonder de tussenstap van het grid van 1x1m. Rechtstreeks aggregeren zorgt ervoor dat alle punten binnen de 10x10 m rooster cel even zwaar mee wegen.
6. Een waarde aan een rooster cel toekennen door de mediaan van de punten binnen deze cel te berekenen in plaats van het gemiddelde. De mediaan geeft een robuustere waarde voor het bodemniveau als er uitschieters in de dataset zitten (binnen het bereik tot NAP +2m);
7. Een drempelwaarde instellen voor het aantal punten binnen een rooster cel van 10x10m. Deze drempelwaarde is ingesteld op een waarde van (theoretisch) 1 punt per m<sup>2</sup>, dit komt neer op 100 punten per rooster cel.

In deze bijlage wordt het effect van bovengenoemde veranderingen in de verwerkingsprocedure inzichtelijk gemaakt (aan de hand van één enkele dataset). Het effect van het uitfilteren van uitschieters wordt niet behandeld. De centrale vraag die beantwoordt wordt door middel van de analyse is of het te verwachten is dat de wijziging in verwerkingsprocedure effect heeft op de resultaten van de morfologische analyse.

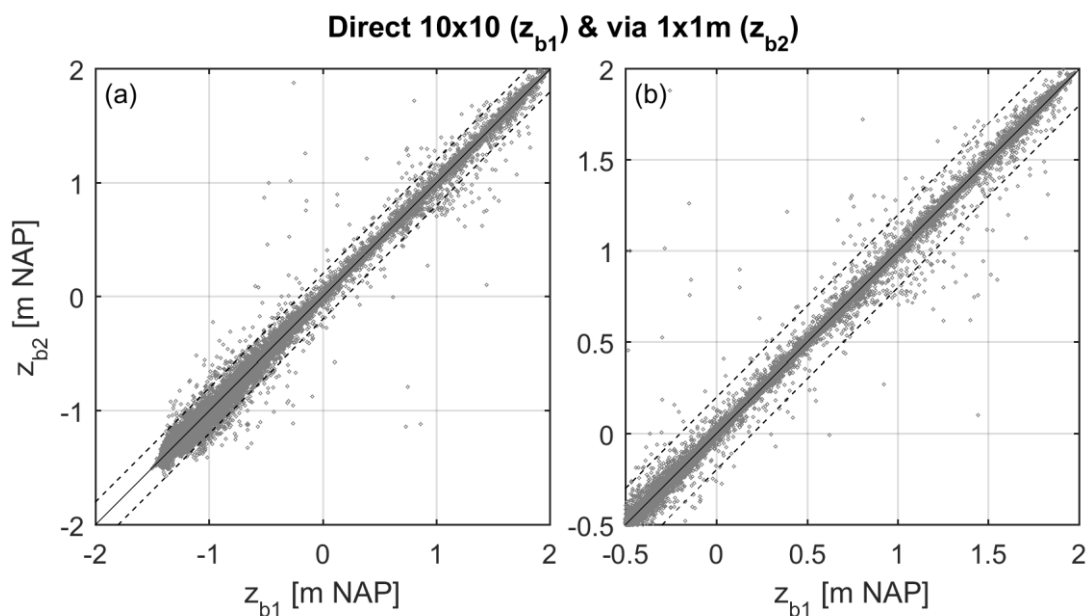
## B.2 Verwerkingmethoden

### B.2.1 Rechtstreeks aggregeren naar 10x10m grid

De basis van de morfologische analyse is altijd gevormd door de data die door de meetdienst (Fugro, Eurosense, Aerodata) vergrid was naar een rooster van 1x1m. Deze data werd vervolgens vergrid naar een een rooster van 10x10m, waarmee de morfologische analyse werd uitgevoerd. Tijdens de verwerking is er voor gekozen de LAS-punten rechtstreeks te aggregeren naar een rooster van 10x10m. In deze paragraaf wordt het effect van deze wijziging in procedure inzichtelijk gemaakt, voor deze vergelijking wordt de dataset van Najaar 2017 gebruikt.

Figuur B.1 toont een scatterplot van de bodemhoogte van iedere roostercel die verkregen is door directe vergridding ( $z_{b1}$ ) en door vergridding via de tussenstap van 1x1m ( $z_{b2}$ ). De figuren tonen dat de punten rondom de lijn  $z_{b1} = z_{b2}$  gelegen zijn. Er zijn echter ook punten die afwijken van de lijn. Om een beter inzicht te krijgen in de afwijkende punten zijn in Figuur B.2 histogrammen van verschildatasets getoond en in Tabel B.1 de beschrijvende statistische parameters. De histogrammen en tabel tonen dat er enkele waarden zijn die een grote variatie vertonen, de verdeling van de verschillen is echter zeer smal ( $\sigma = 1$  cm). Voor het overgrote deel van de datapunten is er dus nauwelijks een verschil in bodemhoogte tussen de twee verwerkingmethoden.

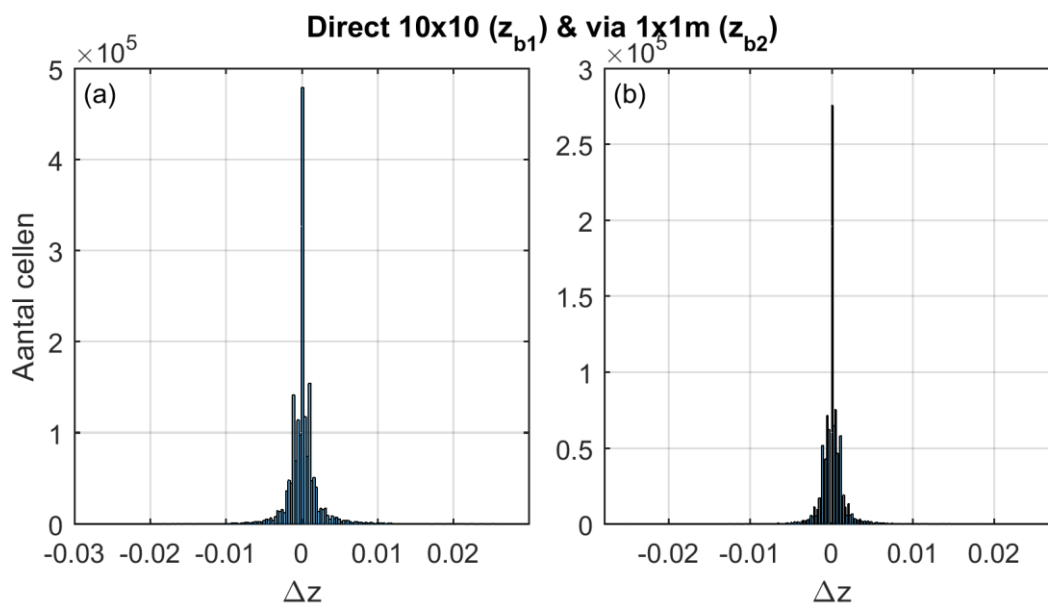
In Figuur B.3 zijn de verschillen ruimtelijk weergegeven. In de verschilkaart zijn verticale en horizontale lijnen te ontdekken, deze zijn gelegen op de overgang van de kaartbladen waarin de data wordt verwerkt. Deze lijnen zijn waarschijnlijk zichtbaar door een miniem verschil in aggregatie, deze is namelijk voor de twee kaartbeelden met verschillende software uitgevoerd. Daarnaast toont de kaart dat de grootste verschillen zijn te ontdekken op de randen van platen, waar de bodemgradiënt groter is.



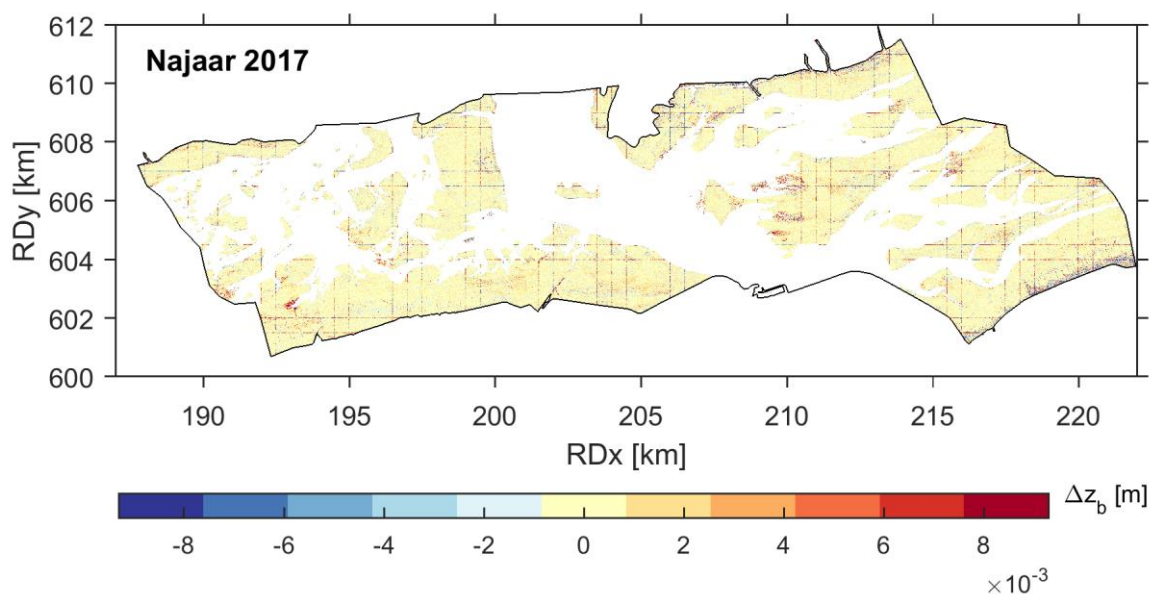
Figuur B.1 Scatterplot van de bodemhoogte van de 10x10m grids van de dataset van Najaar 2017. De 10x10 m grids zijn gegeneerd door de LAS-punten rechtstreeks te aggregeren ( $z_{b1}$ ) en door deze te aggregeren met een tussenstap van gridcellen van 1x1 m ( $z_{b2}$ ). Scatterplots zijn getoond voor alle bodemhoogtepunten (a) en na verwijderen van punten met een hoogteligging lager NAP -0,5 m (b). Doorgetrokken lijn geeft de relatie  $z_{b1} = z_{b2}$  weer, de gestippelde lijnen geven een verschil van 20 cm weer.

Tabel B.1 Statistiek verschil directe vergridding en via een tussen stap van 1x1m roostercellen.

| Maat | $\Delta z_b$<br>(m) | $\Delta z_b (z_b \geq \text{NAP } -0,5 \text{ m})$<br>(m) |
|------|---------------------|---|
| Min  | -2.14               | -2.14   |
| Max  | 1.98                | 1.34  |
| Bias | 0.00                | 0.00  |
| Std  | 0.01                | 0.01  |



Figuur B.2 Histogram van de verschillen van 10x10m grids waarbij een waarde aan de roostercel is toegekend als de mediaan of het gemiddelde van de punten binnen deze roostercel. Histogrammen zijn getoond voor alle bodemhoogtepunten (a) en na verwijderen van punten met een hoogteligging lager dan NAP 0,5 m (b). Verschillen zijn berekend als  $z_{b1} - z_{b2}$ .



Figuur B.3 Kaartbeeld van de verschillen van 10x10m grids die direct geaggregeerd zijn ( $z_{b1}$ ) en die via een tussenstap van 1x1m grid verkregen zijn ( $z_{b2}$ ). Verschillen zijn berekend als  $z_{b1} - z_{b2}$ .

### B.2.2 Mediaan of het gemiddelde

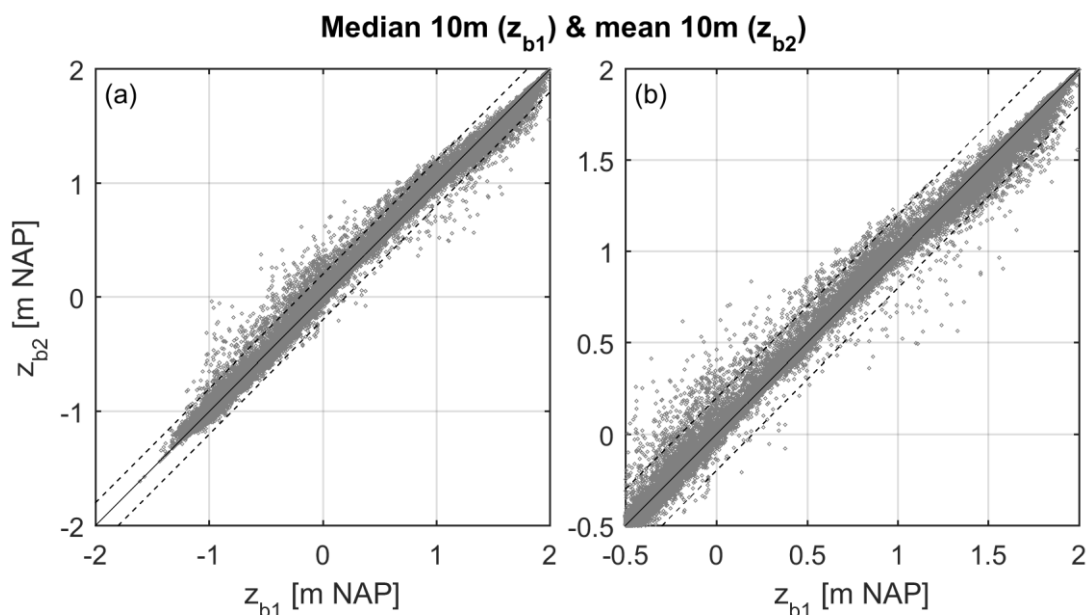
De LAS-punten zijn rechtstreeks geaggregeerd naar een rooster van 10x10m. Deze vergriddingsmethode is op twee verschillende manieren uitgevoerd:

1. Een waarde aan een roostercel toe kennen door de mediaan van alle punten binnen deze cel te berekenen;
2. Een waarde aan een roostercel toe kennen door het gemiddelde van alle punten binnen deze cel te berekenen.

Voor de vergelijking is de dataset van Voorjaar 2010 gebruikt. Deze dataset bevat relatief veel uitschieters en geeft daarmee een duidelijker hoe de twee verwerkingsmethoden een verschillend hoogtebeeld opleveren.

Figuur B.4 toont scatterplots van de bodemhoogte van het kaartbeeld met de mediaan ( $z_{b1}$ ) en het kaartbeeld dat gemaakt is met behulp van het gemiddelde ( $z_{b2}$ ). De figuur toont dat de twee verwerkingsmethoden niet exact dezelfde bodemhoogte opleveren, de punten liggen namelijk niet allemaal op de lijn  $z_{b1} = z_{b2}$ . Daarnaast geven de scatterplots weer dat het kaartbeeld met het gemiddelde een hogere bodemhoogte toekent aan lager gelegen gedeelten van de wadplaten ( $z_b < \text{NAP} + 1 \text{ m}$ ) en een lagere bodemhoogte aan hoger gelegen gedeelten ( $z_b > \text{NAP} + 1 \text{ m}$ ).

De grootste verschillen tussen de mediaan en het gemiddelde zijn te verwachten op locaties waar er een grote spreiding is tussen de LiDAR punten binnen een 10x10m roostercel. De spreiding in bodemhoogte van de LiDAR punten binnen een 10x10m roostercel is groter bij een grotere bodemgradiënt, dit is het geval op de randen van de wadplaten. Omdat het hogere (droge) gelegen gedeelte van de rand van de wadplaat meer metingen (returns) oplevert dan het lagere gedeelte zal het gemiddelde aan de randen van de wadplaten een hogere bodemhoogte opleveren.

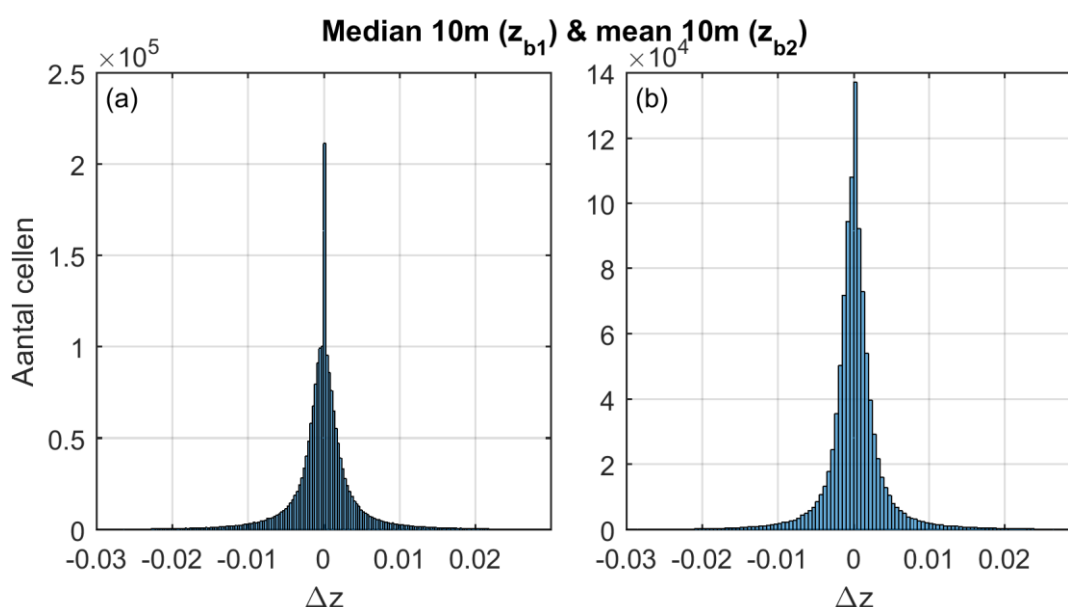


Figuur B.4 Scatterplot van de bodemhoogte van de 10x10m grids van de dataset van Voorjaar 2010, waarbij een waarde aan de roostercel is toegekend als de mediaan ( $z_{b1}$ ) of het gemiddelde ( $z_{b2}$ ) van de punten binnen een roostercel. Scatterplots zijn getoond voor alle bodemhoogtepunten (a) en na verwijderen van punten met een hoogteligging lager NAP -0,5 m (b). Doorgetrokken lijn geeft de relatie  $z_{b1} = z_{b2}$  weer, de gestippelde lijnen geven een verschil van 20 cm weer.

In Figuur B.5 zijn histogrammen van de verschillen getoond en in Tabel B.2 de beschrijvende statistische parameters. Het is aan de figuren en de parameters te zien dat de verschillen normaal verdeeld zijn rond de waarde nul en dat de verdeling smal is. Hoewel de spreiding in verschillen dus groot is (tot ~1,5 m) valt veruit het grootste gedeelte van de verschillen binnen een veel kleinere afwijking ( $\sigma = 1$  cm). De histogrammen en Tabel B.2 geven eveneens weer dat er geen systematische verschuiving optreedt door gebruik van een verwerkingsmethode (bias = 0). De gemiddelde bodemligging zal dus niet zijn veranderd door het gebruik van de mediaan in plaats van het gemiddelde als verwerkingsmethode.

Tabel B.2 Statistiek verschil gemiddelde en mediaan.

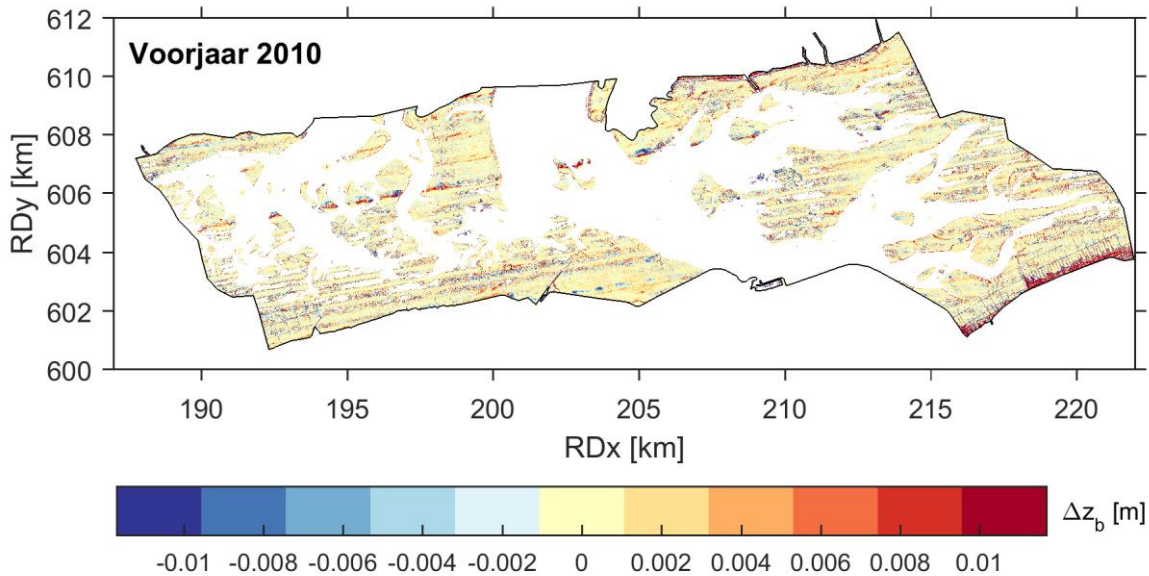
| Maat | $\Delta z_b$<br>(m) | $\Delta z_b (z_b \geq \text{NAP } -0,5 \text{ m})$<br>(m) |
|------|---------------------|---|
| Min  | -0.94               | -0.81   |
| Max  | 0.77                | 0.77  |
| Bias | 0.00                | 0.00  |
| Std  | 0.01                | 0.01  |



Figuur B.5 Histogram van de verschillen van 10x10m grids waarbij een waarde aan de roostercel is toegekend als de mediaan of het gemiddelde van de punten binnen deze roostercel. Histogrammen zijn getoond voor alle bodemhoogtepunten (a) en na verwijderen van punten met een hoogteligging lager dan NAP 0,5 m (b). Verschillen zijn berekend als  $z_{b1} - z_{b2}$ .

Bovenstaande figuren geven aan dat er geen verschil in de gemiddelde bodemligging is als gevolg van het gebruik van de mediaan in plaats van het gemiddelde. Wel zijn er relatief grote verschillen tussen gridcellen maar dit betreft maar een zeer klein gedeelte van de gridcellen (staartjes van de verdeling). In Figuur B.6 is een kaartbeeld getoond van de verschillen om te achterhalen of deze grote afwijkingen geografisch zijn te verklaren. De kleurschaal in Figuur B.6 is gelimiteerd op de waarde van de standaardafwijking. In Figuur B.6 is duidelijk te zien dat de grootste afwijkingen worden veroorzaakt door de kwelderwerken langs de Friese en Groningse kust, waar de palenrijen zorgen voor een grotere spreiding in de dataset. De mediaan geeft hier een lagere bodemhoogte aan en daarmee een betere maat voor het bodemniveau van het wad. Ter plaatse van het Groningerwad (zuidoosten

Zoutkamperlaag) is te zien dat je mediaan juist een hogere bodemhoogte geeft. Dit is waarschijnlijk te koppelen aan het voor komen van (dichte) vegetatie. Daarnaast valt op dat er grot verschillen optreden in één enkele vliegbaan. Deze vliegbaan ligt op de overgang van vliegbanen van twee verschillende meetdagen. Er is hier dus waarschijnlijk een grotere spreiding door een verschil in omstandigheden tijdens de metingen.



Figuur B.6 Kaartbeeld van de verschillen van 10x10m grids waarbij een waarde aan de roostercel is toegekend als de mediaan of het gemiddelde van de punten binnen deze roostercel. Verschillen zijn berekend als  $z_{b1} - z_{b2}$ .



### B.2.3 Met en zonder drempelwaarde

Het aggregeren van LAS-punten naar een roostercel gebeurt door alle punten (na filtering van uitschieters) te gebruiken. De waarde van een roostercel van 10x10m geeft de beste representatie van de bodemhoogte op die locatie als de waarde is gebaseerd op een groot aantal punten die min of meer uniform verspreid zijn over de roostercel. Er is uitgezocht of het hanteren van een drempelwaarde effect heeft op de vergridding van de datasets. De drempelwaarde die gehanteerd is voor het aantal punten binnen een roostercel is 1 punt per vierkante meter ( $m^2$ ), dit komt neer op 100 punten per roostercel.

De roostercellen die meer dan 100 punten bevatten geven exact dezelfde bodemhoogte voor beide methoden, deze worden immers aan de hand van exact dezelfde data en dezelfde methode berekend. Het verschil tussen de twee methoden is de dekking van het kaartbeeld, dit is weergegeven voor alle datasets in Tabel B.3. De tabel geeft aan dat het verschil in dekking tussen de twee methoden klein is voor de recentere datasets, de puntendichtheid van deze datasets is relatief groot. De oudere datasets (2010 t/m 2012) laten een verschil in dekking van ruim 13% zien.

De hypsometrische analyse moet uitgevoerd worden aan de hand van geheel vlakdekkende datasets om een goede vergelijking tussen datasets mogelijk te maken. De interpolatieslag die uitgevoerd wordt is hiervoor nodig. Wanneer een drempelwaarde van 100 punten per roostercel gehanteerd wordt moet voor de oudere datasets aan veel meer roostercellen een waarde toegekend worden door interpolatie.

Tabel B.3 Percentage cellen met waarden binnen de gecombineerde polygoon van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag, zowel voor als na filtering van bodemhoogtepunten < NAP -0,5 m.

| LiDAR opname  | In polygoon | In polygoon  | Vershil | In polygoon<br>( $z_b > -0.5$ m<br>NAP) | In polygoon<br>( $z_b > -0.5$ m<br>NAP) | Vershil<br>( $z_b > -0.5$<br>m NAP) |
|---------------|-------------|--------------|---------|---|---|-------------------------------------|
|               | (1pt/cel)   | (100pts/cel) |         | (1pt/cel)                               | (100pts/cel)                            |                                     |
| Voorjaar 2010 | 92.82       | 57.01        | 35.81   | 50.39                                   | 36.45                                   | 13.94                               |
| Voorjaar 2011 | 80.37       | 54.17        | 26.20   | 50.08                                   | 36.11                                   | 13.96                               |
| Najaar 2011   | 90.42       | 63.97        | 26.45   | 50.75                                   | 38.92                                   | 11.82                               |
| Najaar 2012   | 91.86       | 55.46        | 36.40   | 50.52                                   | 34.00                                   | 16.52                               |
| Najaar 2013   | 98.42       | 79.76        | 18.66   | 52.94                                   | 46.46                                   | 6.48                                |
| Voorjaar 2014 | 99.76       | 92.42        | 7.34    | 53.72                                   | 49.20                                   | 4.52                                |
| Najaar 2014   | 99.83       | 91.65        | 8.18    | 56.45                                   | 53.11                                   | 3.34                                |
| Zomer 2015    | 99.82       | 87.47        | 12.35   | 51.44                                   | 47.94                                   | 3.50                                |
| Najaar 2015   | 99.86       | 85.26        | 14.61   | 63.19                                   | 57.09                                   | 6.10                                |
| Voorjaar 2016 | 98.28       | 84.70        | 13.58   | 51.93                                   | 49.26                                   | 2.68                                |
| Najaar 2016   | 99.67       | 92.19        | 7.48    | 51.05                                   | 50.83                                   | 0.22                                |
| Voorjaar 2017 | 99.91       | 96.13        | 3.78    | 51.48                                   | 51.32                                   | 0.16                                |
| Najaar 2017   | 99.88       | 97.04        | 2.84    | 51.14                                   | 51.12                                   | 0.02                                |

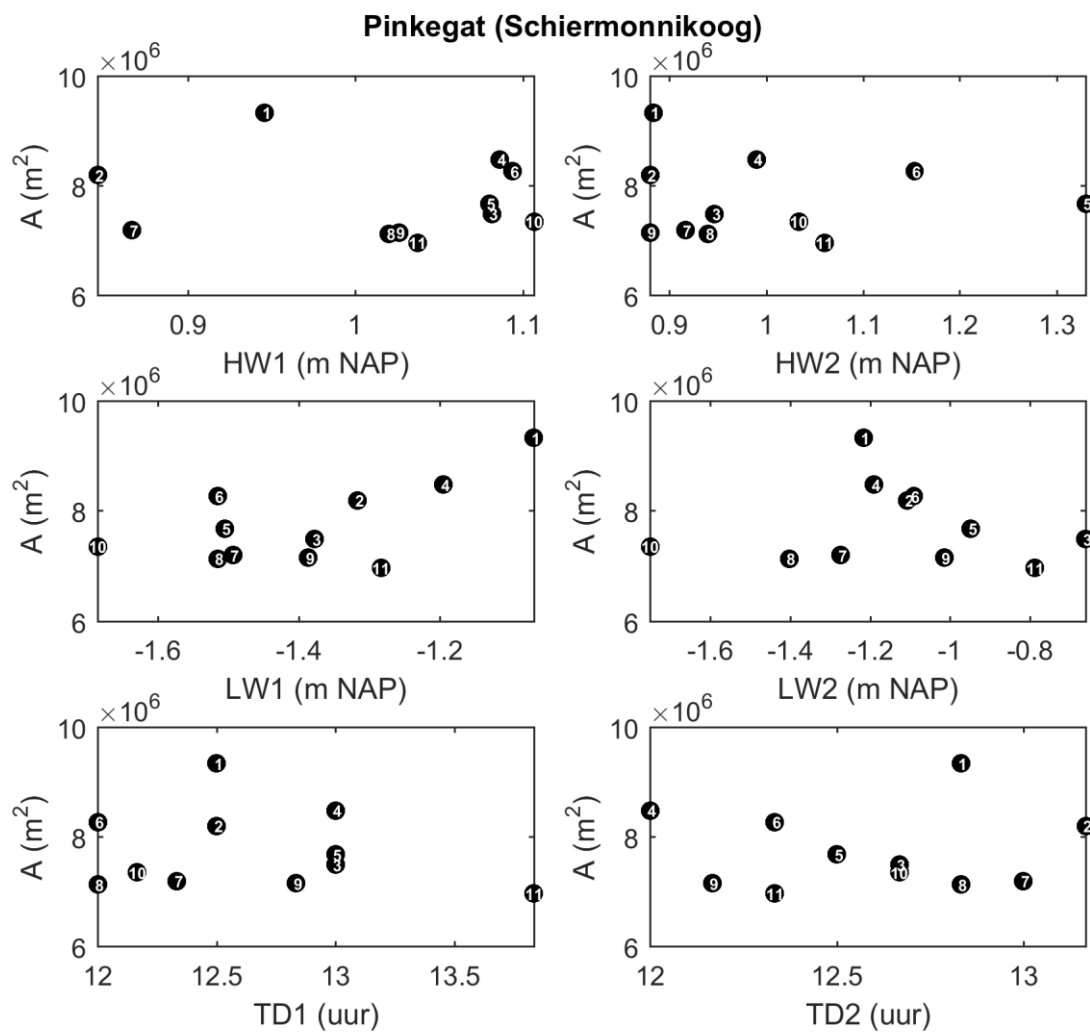
### B.3 Conclusies

De effecten van keuzes in verwerkingsmethoden zijn getoond in deze appendix. De analyse toont dat:

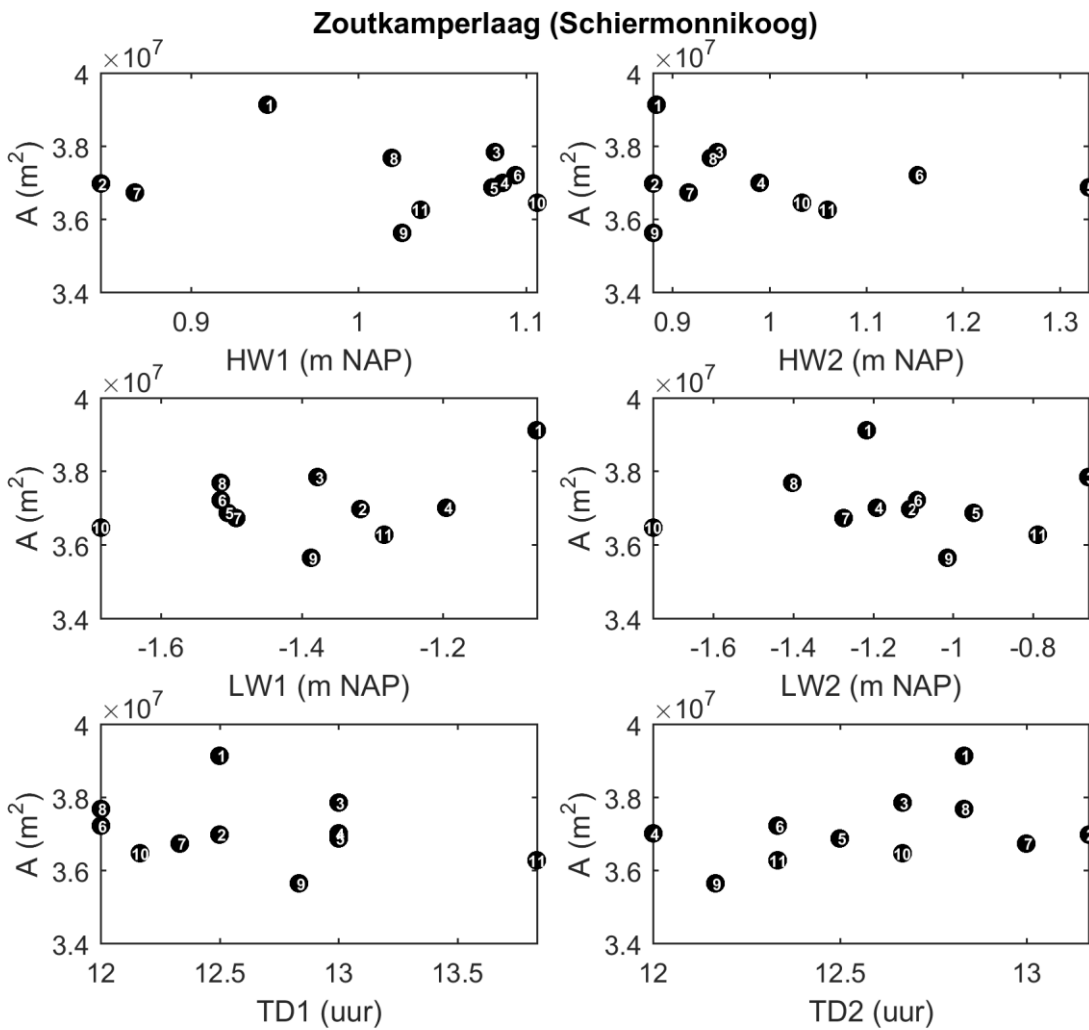
1. Rechtstreeks aggregeren naar een rooster van 10x10m voor het overgrote deel van de datapunten een waarde geeft die vrijwel gelijk is aan de waarde die verkregen zijn via de tussenstap van 1x1m roostercellen. Er zijn enkele uitschieters, deze zijn voornamelijk gelegen op de randen van platen waar de bodemgradiënt groter is. Rechtstreeks vergridden naar een rooster van 10x10 m zorgt ervoor dat elke punt binnen de cel even zwaar mee weegt in de vergridding, deze methode heeft daarom de voorkeur.
2. Het toekennen van een waarde aan een roostercel door de mediaan van alle punten te berekenen, in plaats van het gemiddelde, zorgt niet voor een systematische verschuiving van het hoogtebeeld. Het is daarom niet te verwachten dat deze wijziging in verwerking een (aantoonbaar) effect op het resultaat van de morfologische analyse zal hebben. Deze wijziging kan dus zonder consequenties doorgevoerd worden in de procedure.
3. Een drempelwaarde instellen van 100 punten per gridcel zorgt ervoor dat er (voor de oudere datasets) meer roostercellen zijn zonder waarde. Voor de hypsometrische analyse moeten deze cellen een waarde toegekend krijgen door middel van interpolatie. Het heeft de voorkeur om de waarde van een roostercel te bepalen aan de hand van (weinig) data ten opzichte van interpolatie.

De analyse heeft aangetoond dat het niet te verwachten is dat wijziging 1 (rechtstreeks) en 2 (mediaan) een effect zal hebben op de resultaten van de morfologische analyse. Deze twee wijzigingen zijn daarom doorgevoerd in de verwerkingsprocedure. Wijziging 3 (drempelwaarde) heeft wel een groot effect op de hypsometrische analyse. Voor deze analyse zijn geheel vlakdekkende datasets nodig, het instellen van een drempelwaarde zorgt ervoor dat een groter areaal opgevuld moet worden door middel van interpolatie. Omdat het de voorkeur geniet de waarde van een cel te bepalen op werkelijk gemeten data in plaats van synthetische (geïnterpoleerde) data, is deze wijziging niet doorgevoerd in de verwerkingsprocedure.

## C Correlatiefiguren omgevingsfactoren en areaal



Figuur C.1 Scatterplot van het areaal boven NAP 0,0 m van kombergingsgebied Pinkegat, uitgezet tegen de indicatoren HW1, LW1, TD1 en HW2, LW2 en TD2 (zie Tabel 5.2) berekend aan de hand van meetgegevens bij getijmeetstation Schiermonnikoog.



Figuur C.2 Scatterplot van het areaal boven NAP 0,0 m van kombergingsgebied Zoutkamperlaag, uitgezet tegen de indicatoren HW1, LW1, TD1 en HW2, LW2 en TD2 (zie Tabel 5.2) berekend aan de hand van meetgegevens bij getijmeetstation Schiermonnikoog.