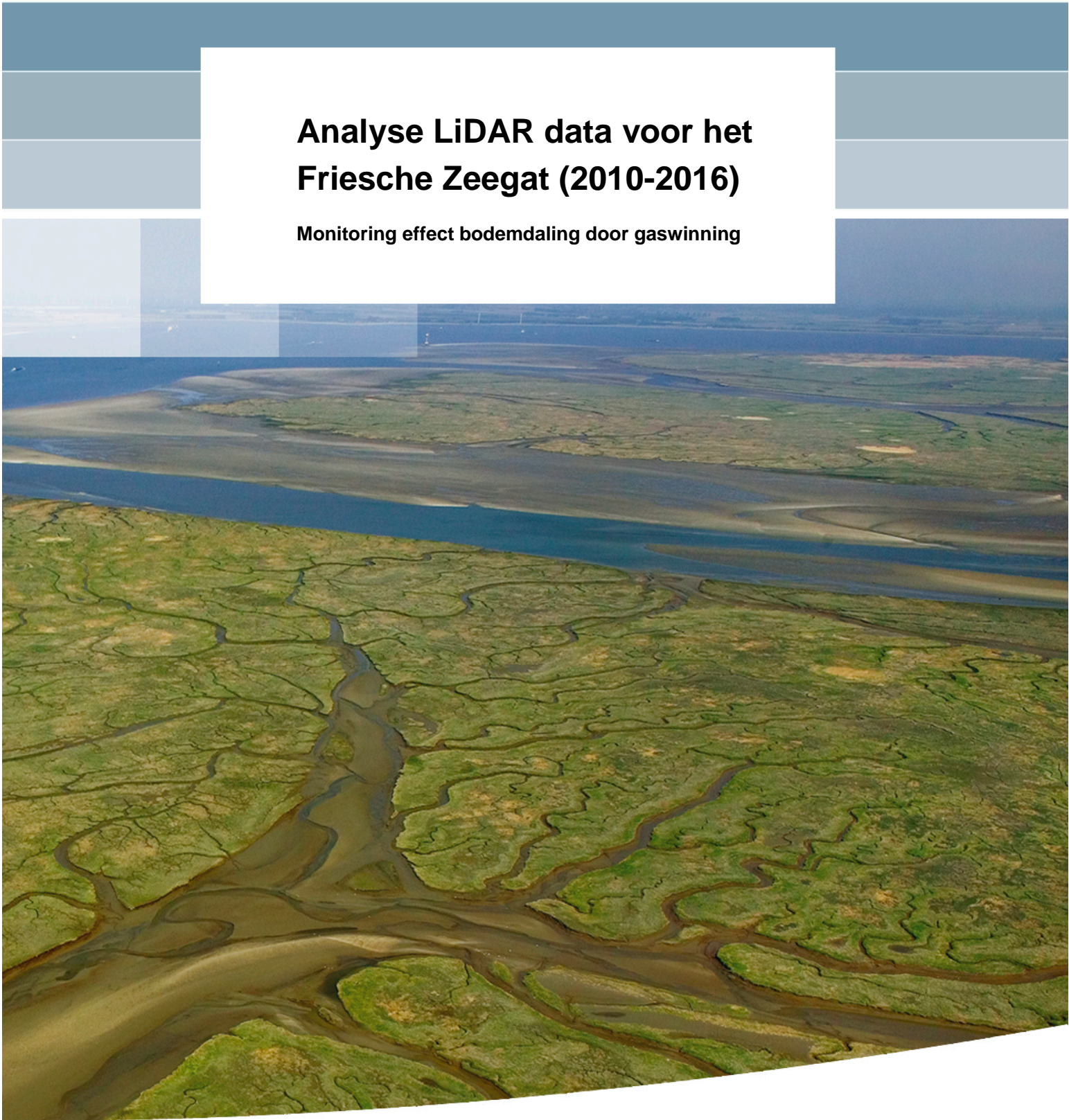


**Analyse LiDAR data voor het  
Friesche Zeegat (2010-2016)**

**Monitoring effect bodemdaling door gaswinning**





# **Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2016)**

**Monitoring effect bodemdaling door gaswinning**

Reinier Schrijvershof  
Kees Nederhoff  
Arjen Haag  
Harry Piening (NAM)

11200469-000



**Titel**

Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2016)

**Opdrachtgever**

Nederlandse Aardolie  
Maatschappij

**Project**

11200469-000

**Kenmerk**

11200469-000-ZKS-0002

**Pagina's**

50

**Trefwoorden**




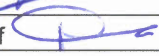
LiDAR, Waddenzee, Friesche Zeegat, bodemdaling, morfologie, lineaire trend analyse, hypsometrische curven, nauwkeurigheid LIDAR data

**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. 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 analyse toont aan dat een groot gedeelte van de bodemhoogteveranderingen binnen de grootte van de nauwkeurigheid van de LiDAR data valt, ondanks de toename van het tijdsinterval tussen de metingen. De bodemhoogteveranderingen die wel groter dan de nauwkeurigheid van de LiDAR zijn kunnen verklaard worden in termen van morfologische ontwikkelingen (geul- en wadplaatmigratie).

**Referenties**

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	april 2017	Reinier Schrijvershof		Zheng Bing Wang		Frank Hoozemans	
		Kees Nederhoff					
		Arjen Haag					
		Harry Piening (NAM)					

**Status**

definitief



## Inhoud

<b>1 Inleiding</b>	<b>1</b>
1.1 Achtergrond	1
1.2 Analyse LiDAR data	2
1.3 Voorgaande analyserapporten	2
1.4 Doelstelling	3
1.5 Leeswijzer	3
<b>2 Aanpak</b>	<b>5</b>
<b>3 Beschrijving en verwerking van de LiDAR data</b>	<b>7</b>
3.1 Algemeen	7
3.2 Beschrijving van de vluchtgegevens	10
3.3 Levering van de LiDAR data	12
3.4 Verwerking van de LiDAR data	12
3.5 Bodemkaarten	14
<b>4 Discussie over de nauwkeurigheid van de LiDAR gegevens</b>	<b>19</b>
4.1 Introductie	19
4.2 Beschrijving van de discussie	19
4.3 Onderzoeken in navolging van de adviezen van de audit-commissie	20
4.3.1 Appendix B; Analyse van individuele LiDAR vliegbanen	20
4.3.2 Appendix C; Analyse van de toepassing van multispectrale beelden voor het scheiden van wad en water	20
4.3.3 Appendix D; Analyse van de a.d.h.v. LiDAR gemeten verandering in wadplaathoogte in Pinkegat en Zouterkamperlaag	21
4.3.4 Implicaties voor de gebruikte nauwkeurigheid	21
4.4 Conclusie	22
<b>5 Erosie en sedimentatie</b>	<b>23</b>
5.1 Erosie/sedimentatiekaarten	23
5.2 Lineaire trendanalyse	32
<b>6 Analyse per deelgebied</b>	<b>35</b>
6.1 Analyse kombergingsgebieden	36
6.2 Analyse deelgebieden	40
<b>7 Conclusies en aanbevelingen</b>	<b>47</b>
7.1 Conclusies	47
7.2 Aanbevelingen	48
<b>8 Referenties</b>	<b>49</b>
<b>Bijlage(n)</b>	
<b>A Appendix A; Bodemkaarten met uitgefilterde waterspiegel</b>	<b>A-1</b>

<b>B Appendix B; Analyse van individuele LiDAR vliegbanen</b>	<b>B-1</b>
B.1 Inleiding	B-1
B.2 Methode	B-1
B.3 Resultaten	B-2
B.4 Conclusies	B-5
<b>C Appendix C; Analyse van de toepassing van multispectrale beelden voor het scheiden van wad en water</b>	<b>C-1</b>
C.1 Inleiding	C-1
C.2 Data	C-1
C.3 Studiegebied	C-1
C.4 Analyse	C-2
C.4.1 Volledig studiegebied	C-2
C.4.2 Focus gebieden	C-3
C.4.3 Mogelijke classificatie methoden	C-17
C.5 Conclusies	C-18
<b>D Appendix D; Analyse van de a.d.h.v. LiDAR gemeten verandering in wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag</b>	<b>D-1</b>

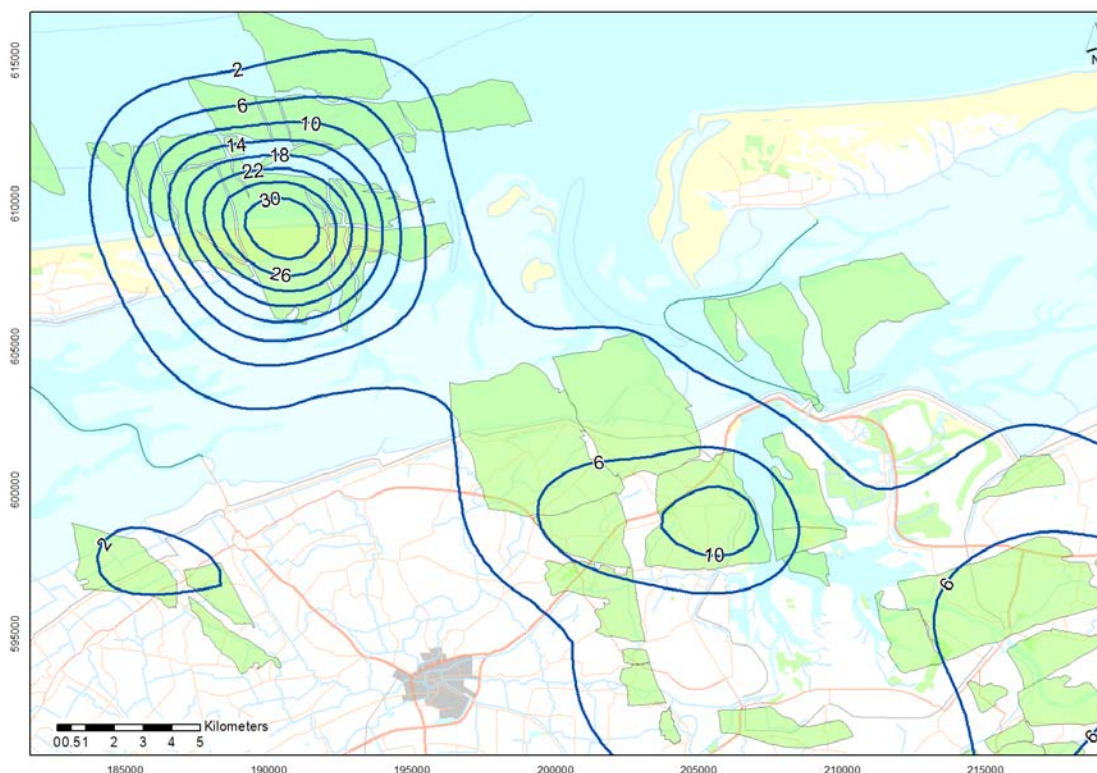


# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het waddengebied. Nabij Ameland wordt er sinds 1987 aardgas gewonnen en de drie productievelden in de Waddenzee (Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen) worden sinds 2007 geëxploiteerd. De verwachte bodemdaling die optreedt als gevolg van deze aardgasexploitatie is weergegeven in Figuur 1.1.

De bodemdaling die optreedt in de kombergingsgebieden van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag kan de ecologische waarde van het gebied beïnvloeden doordat de hoogte van de wadplaten daalt. Als gevolg van de bodemdaling kan het totale areaal droogvallend wad binnen de kombergingsgebieden afnemen. Echter, de wadplaten groeien mee met de relatieve zeespiegelstijging door middel van sedimentatie op de platen. De grootte van de relatieve zeespiegelstijging wordt bepaald door het netto effect van absolute zeespiegelstijging en bodemdaling. De totale bodemdaling kan vervolgens onderverdeeld worden in bodemdaling welke het gevolg is van autonome processen en bodemdaling welke het gevolg is van de gaswinning. De mate van sedimentatie op de platen, en daarmee het droogvallend areaal binnen de kombergingsgebieden, is daardoor afhankelijk van de grootte van bodemdaling als gevolg van de gaswinning in het waddengebied.



Figuur 1.1 Ruimtelijke verdeling van de bodemdaling [in cm] op 1 januari 2014, sinds start productie, volgens de prognose in de Meet en Regelcyclus rapportage 2014 (NAM B.V., 2014a).

Om vast te stellen of de bodemdaling het areaal droogvallend wad 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 monitoringsprogramma 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 een gedeelte van het effect op de abiotiek geëvalueerd aan de hand van morfologische veranderingen van de wadplaten in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag.

## 1.2 Analyse LiDAR data

Het Friesche Zeegat wordt sinds 2010 gemonitord aan de hand van LiDAR opnamen. De LiDAR data wordt ten opzichte van elkaar vergeleken om te onderzoeken of er sinds de start van de metingen een verandering in het areaal droogvallend wad heeft plaatsgevonden als gevolg van relatieve zeespiegelstijging. Relatieve zeespiegelstijging is de toename van het zeeniveau ten opzichte van de bodemhoogte. Relatieve zeespiegelstijging wordt gedefinieerd als het netto effect van absolute zeespiegelstijging en de lokale bodembewegingen. Bodemdaling als gevolg van gaswinning in de Waddenzee kan dus een toename van de relatieve zeespiegel veroorzaken en daarmee het areaal droogvallend wad verkleinen. Sedimentatie op de wadplaten zorgt voor een lokale bodemverhoging en dus een verlaging van de relatieve zeespiegel.

In de huidige rapportage worden drie nieuwe LiDAR opnamen gebruikt om veranderingen van het wadplaatareaal binnen het Friesche Zeegat te onderzoeken. Deze opnamen zijn ingevlogen in het najaar van 2015, het voorjaar van 2016 en het najaar van 2016. In Tabel 1.1 zijn alle LiDAR opnamen met data van acquisitie en referentie naar het analyse-onderzoek weergegeven.

Tabel 1.1 Overzicht van alle LiDAR opnamen en analyses 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	Huidige rapportage
2016 (voorjaar)	5-5-2016, 6-5-2016	
2016 (najaar)	14-9-2016, 15-9-2016, 16-9-2016	

## 1.3 Voorgaande analyserapporten

De LiDAR data wordt sinds de start van de metingen verwerkt en geanalyseerd door Deltares (Schrijvershof en Vroom, 2016; Vroom en Beekhuizen, 2015; Arentz en Vroom, 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang, 2012; Wang et al., 2010).

Met betrekking tot de morfologische veranderingen binnen het Friesche Zeegat zijn in de voorgaande analyserapporten de volgende conclusies getrokken:

- De snelheid van de trendmatige veranderingen van de wadplaathoogte tussen twee Rijkswaterstaat LiDAR metingen (6 jaar) is zodanig dat deze in dezelfde orde grootte

ligt als de nauwkeurigheid van de LiDAR data. De nauwkeurigheid voor het verschil tussen twee metingen dat hierbij wordt gehanteerd is 5 cm (Wang et al., 2010). Door dat er ook fluctuaties bovenop de trendmatige veranderingen zijn kan een trend in veranderingen pas na 3 tot 4 meetperioden (18 – 24 jaar) bepaald worden.

- De morfologische veranderingen die zijn opgetreden in het bekken van het Friesche Zeegat tijdens het interval van de LiDAR opnamen zijn kleiner dan de nauwkeurigheid van de LiDAR meetgegevens (Schrijvershof en Vroom, 2016; Vroom en Beekhuizen, 2015; Arentz en Vroom, 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang, 2012). De meetfrequentie en –duur van de LiDAR opnamen is daarom niet representatief voor de tijdschaal waarop de langjarige trend zich uit. Frequenter meten helpt daarom niet tot het eerder vaststellen van veranderingen, wel kan een frequente meetreeks helpen bij het nauwkeuriger vaststellen van trends in de veranderingen.
- Trends in de morfologische veranderingen die wel goed te onderscheiden zijn aan de hand van LiDAR gegevens worden gedomineerd door geulmigratie en seizoensvariatie (Arentz en Vroom, 2014; Elias et al., 2013).

#### 1.4 Doelstelling

Het doel van de voorliggende rapportage is:

- De LiDAR data toegankelijk maken door ze te visualiseren;
- In kaart brengen van de morfologische veranderingen van de wadplaten in het Friesche Zeegat en daarmee onderzoeken of het areaal droogvallend wad sinds de start van de meetcampagne (2010) is veranderd als gevolg van bodemdaling door gaswinning.
- Een beschouwing geven van de interpretatie van de nauwkeurigheid van de LiDAR meetgegevens en een aanbeveling doen over de grootte van de nauwkeurigheid voor de morfologische analyse.
- Invulling geven aan de adviezen opgesteld door de MER-commissie aan de hand van de voorgaande morfologisch analyse (Schrijvershof en Vroom, 2016).

#### 1.5 Leeswijzer

In Hoofdstuk 2 wordt een algemene beschrijving van de methode van opname, verwerking en analyse van de LiDAR meetgegevens gegeven. In Hoofdstuk 3 wordt voor de meest recente LiDAR opnamen (najaar 2015, voor- en najaar 2016) een beschrijving gegeven van de vluchtgegevens en weerscondities tijdens de opnamen alsmede de verwerking van de gegevens. Het resultaat van de verwerking wordt aan het einde van dit hoofdstuk gevisualiseerd in de vorm van bodemkaarten. Hoofdstuk 4 beschrijft de nauwkeurigheid van de LiDAR gegevens van het Friesche Zeegat en geeft aan welke nauwkeurigheid toegepast dient te worden bij de morfologische analyses van de gegevens. In Hoofdstuk 5 worden de gegevens geanalyseerd door middel van verschilkaarten en een lineaire trend analyse. In Hoofdstuk 6 wordt de analyse aan de hand van hypsometrische curven voor verschillende deelgebieden beschreven. Conclusies en aanbevelingen van de analyse van de LiDAR data van het Friesche Zeegat worden gegeven in Hoofdstuk 7.

De onderzoeken die zijn uitgevoerd naar aanleiding van de adviezen van de MER-commissie zijn gerapporteerd in meerdere appendices. Appendix B beschrijft de analyse naar individuele vliegbanen, in dit hoofdstuk wordt aangeduid of de manier van data inwinnen van invloed is op de nauwkeurigheid van de meetgegevens. Appendix C beschrijft het onderzoek dat verricht is naar de toepassing van multispectrale beelden op de morfologische analyse en interpretatie van de LiDAR gegevens. In Appendix D wordt de integratie van de verschillende meettechnieken die gebruikt worden om de morfologische veranderingen in het Friesche Zeegat te monitoren beschreven.



## 2 Aanpak

De morfologische ontwikkeling van het areaal droogvallend wad in de kombergingen van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag wordt geanalyseerd aan de hand van de meest recente LiDAR opnamen (najaar 2015, voor- en najaar 2016) en alle voorgaande LiDAR opnamen. De aanpak die gehanteerd wordt is in hoofdlijnen gelijk aan de aanpak van voorgaande studies (Schrijvershof en Vroom, 2016; Vroom en Beekhuizen, 2015; Arentz en Vroom, 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang 2012; Wang et al., 2010). Een uitzondering op de aanpak is de voorbereiding van de data.

In Hoofdstuk 3 wordt een beschrijving gegeven van de uitgevoerde LiDAR survey's (gebiedsdekking, vluchtschema en weersomstandigheden). In dit hoofdstuk wordt informatie besproken die relevant is voor de morfologische analyse. Het verwerken van de LiDAR gegevens (waaronder de omzetting van LAS-punten naar een regelmatige rooster van 1x1 m) wordt vervolgens beschreven in Paragraaf 3.4.

De basis van de analyse van de morfologische ontwikkeling wordt gevormd door de 2010 – 2016 LiDAR data die geaggregeerd is naar 1x1 m roostercellen. De 1x1 m datasets worden gemiddeld naar kaartbladen met een 10x10 m resolutie. Door de data naar grotere roostercellen te aggregeren wordt de stochastische fout van de individuele punten sterker uitgefilterd. In Elias et al. (2013) is geconcludeerd dat het effect van verschillende groottes van roostercellen (5 m, 10 m, 20 m) verwaarloosbaar klein is op het resultaat van de morfologische analyse.

Gaten in de 10x10 m dataset worden opgevuld door middel van driehoeksinterpolatie, deze stap levert een aparte dataset met geïnterpoleerde data. De 10x10 m datasets worden gecorrigeerd voor water. Dit wordt gedaan door alle punten die lager liggen dan -0.5 m NAP weg te filteren. Doordat het inwinnen van de data alleen dient te gebeuren wanneer de waterstand lager is dan -0.7 m NAP bij de waterstandmeetstations Nes, Holwerd, Lauwersoog en Schiermonnikoog is de kans klein dat de waterspiegel bij de wadplaten hoger staat dan -0.5 m NAP tijdens de opname. Een uitzondering hierop zijn de plassen die op de wadplaten aanwezig blijven.

Aan de hand van de LiDAR datasets die naar 10x10 m roostercellen zijn geaggregeerd waarbij de gaten niet zijn opgevuld door middel van interpolatie worden er bodemkaarten geproduceerd. Het vergelijken van de meest recente LiDAR opname met de voorgaande opnamen wordt gedaan aan de hand van erosie/sedimentatiekaarten (verschil van de bodemkaarten). Omdat de erosie-sedimentatiekaarten alleen de verschillen tussen twee bodemopnamen geeft is het lastig continue trends in de data te ontdekken. Trends in bodemhoogte worden inzichtelijk gemaakt door een lineaire trend analyse uit te voeren.

Tot slot wordt de wadplaathoogte en het wadplaatareaal geanalyseerd aan de hand van hypsometrische curven en histogrammen. Deze analyse wordt uitgevoerd aan de hand van de 10x10 m dataset waarbij de gaten zijn geïnterpoleerd. Dit wordt gedaan zodat de gebieden die niet tot de waterspiegel worden gerekend een volledige gebiedsdekking hebben. Hypsometrie wordt berekend voor de twee kombergingen van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag en voor vijf deelgebieden die gedefinieerd zijn in Vroom en Beekhuizen (2015).



## 3 Beschrijving en verwerking van de LiDAR data

### 3.1 Algemeen

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

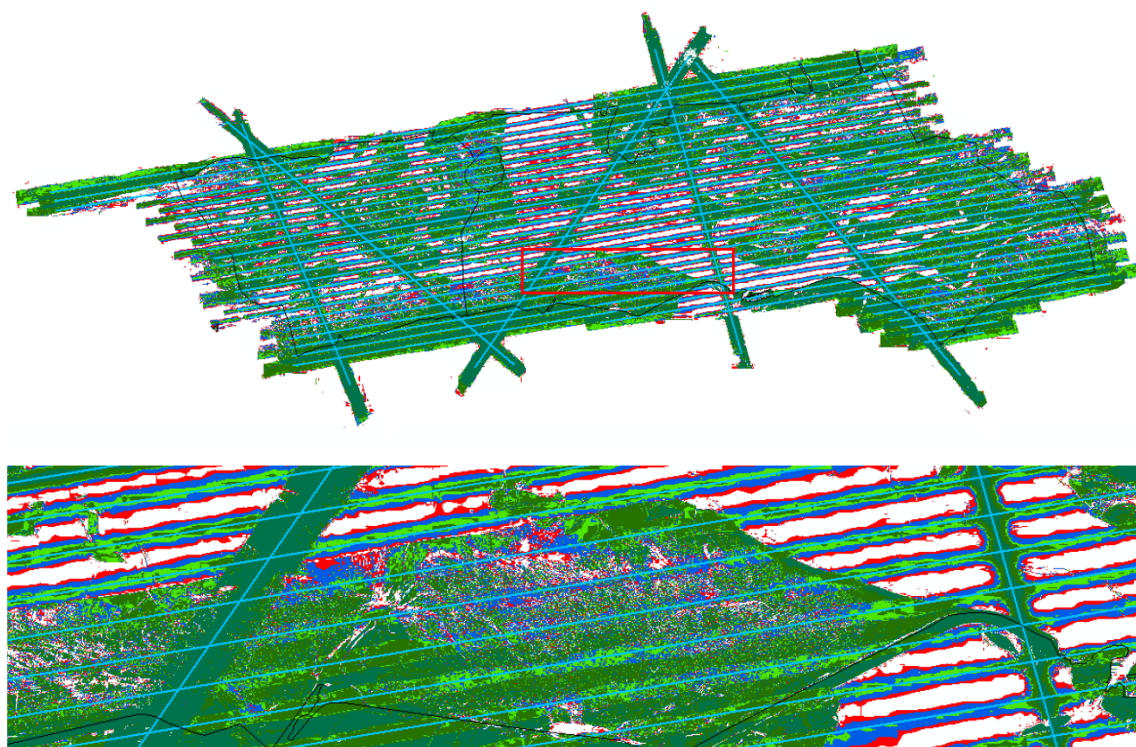
1. het tijdsverschil tussen het uitzenden en ontvangen van een laserpuls,
2. de hoek waaronder de laserpuls wordt uitzonden,
3. de absolute locatie van de sensor die de laserpuls ontvangt.

De mate waarin een oppervlak gedetecteerd kan worden hangt af van de reflectie van het te detecteren oppervlak. De reflectie kan beïnvloedt worden 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 (speculaire reflectie) 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, 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.

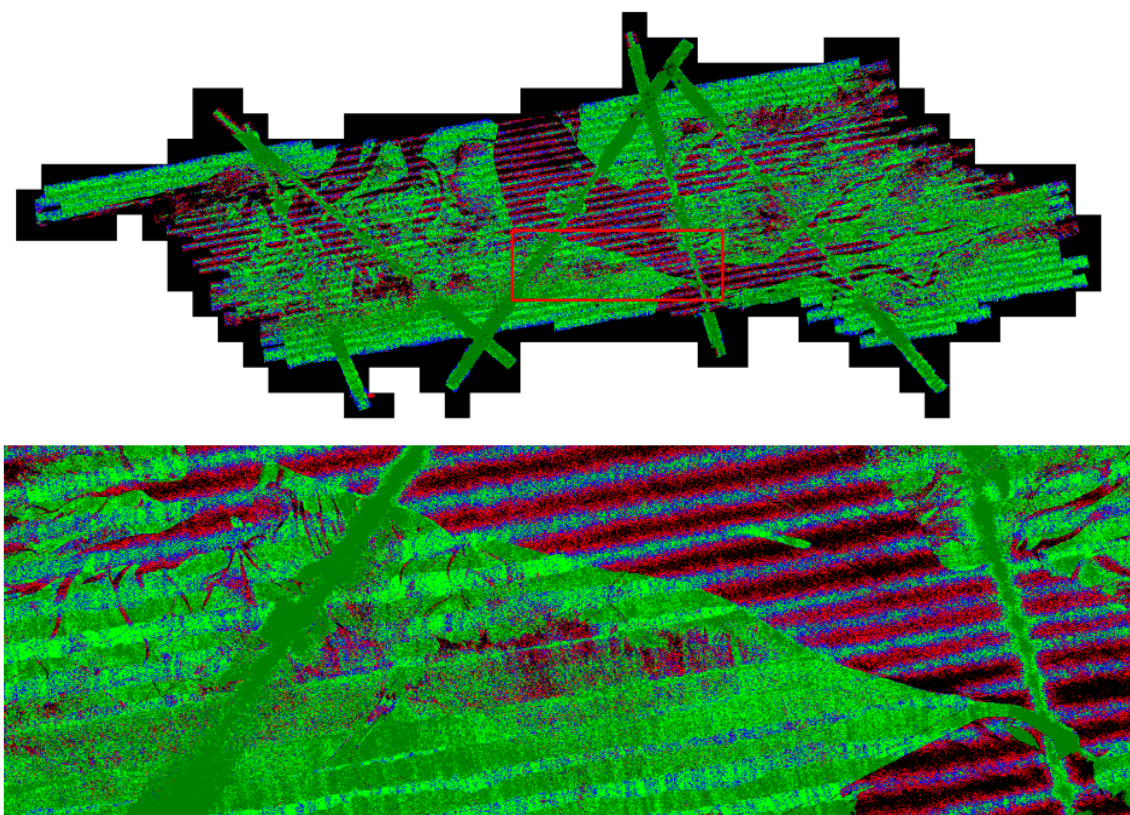
De weersomstandigheden beïnvloeden de reflectie doordat waterdruppels in de atmosfeer de laserpuls absorberen. De laserpuls die het oppervlak bereikt is daardoor minder sterk waardoor de reflectie ook minder sterk is. Het detecteren van de bodem wordt daardoor bemoeilijkt wanneer er regen, bewolking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

De positie van de de sensor ten opzichte van het te detecteren oppervlak is van invloed op de reflectie door dat 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. De puntendichtheid is voor de nieuwe LiDAR opnamen weergegeven in Figuur 3.1 (najaar 2015), Figuur 3.2 (voorjaar 2016) en Figuur 3.3 (najaar 2016). Hier zijn de vliegbanen te zien doordat de puntendichtheid reduceert wanneer een oppervlak onder een grotere hoek van de sensor gedetecteerd wordt dan wanneer het oppervlak zich recht onder de sensor bevindt. De geulen zijn zichtbaar in de figuren doordat er meer verstrooiing van de LiDAR puls plaatsvindt op het wateroppervlak.

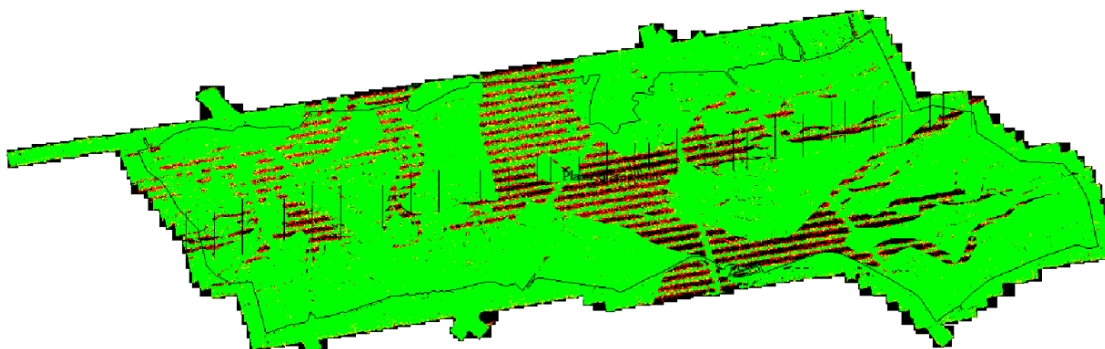


Figuur 3.1 Puntendichtheid van de LiDAR opname van najaar 2015 voor het gehele gebied (boven) en een ingezoomd gedeelte (onder), rode vierkant geeft de locatie van het ingezoomde figuur. Legenda van de kleurenschaal: Wit: geen punten; Rood: 1 punt/m<sup>2</sup>; blauw: 2-3 punten/m<sup>2</sup>; lichtgroen: 4-8 punten/m<sup>2</sup>; donkergroen: >8 punten/m<sup>2</sup> (Eurosense, 2016b).





Figuur 3.2 Puntendichtheid van de LiDAR opname van voorjaar 2016 voor het gehele gebied (boven) en een ingezoomd gedeelte (onder), rode vierkant geeft de locatie van het ingezoomde figuur. Legenda van de kleurenschaal: Zwart: geen punten; Rood: 1 punt/m<sup>2</sup>; blauw: 2-3 punten/m<sup>2</sup>; lichtgroen: 4-8 punten/m<sup>2</sup>; donkergroen: >8 punten/m<sup>2</sup> (Eurosense, 2016c).



Figuur 3.3 Puntendichtheid van de LiDAR opname van najaar 2016 voor het gehele gebied. Zwart: geen punten; rood: 1 punt/m<sup>2</sup>; geel: 2-3 punten/m<sup>2</sup>; groen: 4 of meer punten/m<sup>2</sup> (Aerodata, 2016).

### 3.2 Beschrijving van de vluchtgegevens

In deze paragraaf worden de vluchtomstandigheden van deze nieuwe datasets besproken. Voor de oudere datasets zijn deze gegevens besproken in de voorgaande analyse rapporten (zie Tabel 1.1).

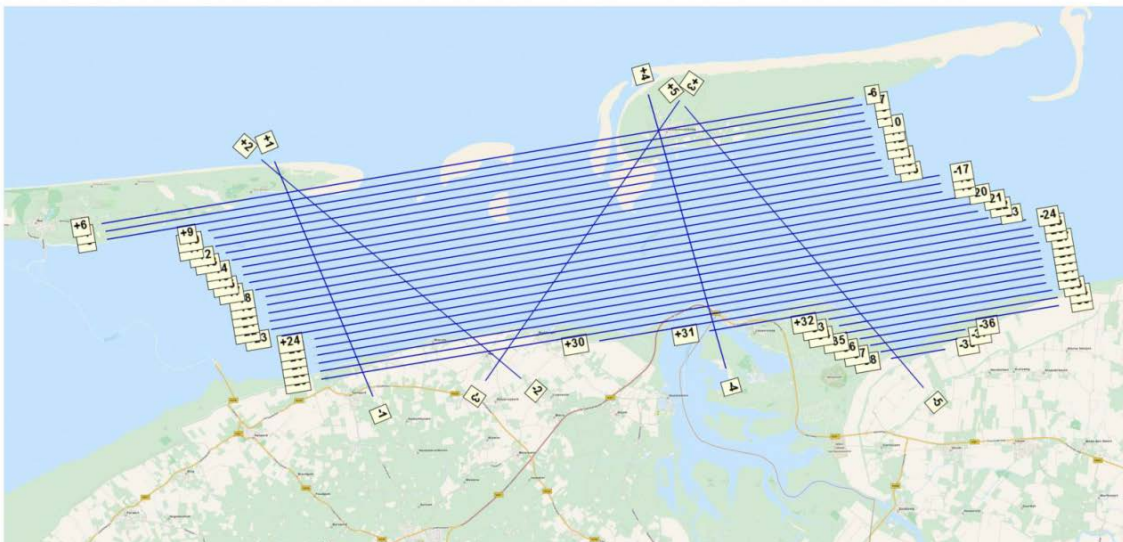
De LiDAR opname van het najaar van 2015 is uitgevoerd door Eurosense op 26 oktober en 8 en 23 november 2015. De gedetailleerde specificaties van deze survey zijn gerapporteerd in Eurosense (2016a) en Eurosense (2016b). De vluchtgegevens die relevant zijn voor de analyse van de dataset worden hieronder samengevat weergegeven. De administratie van de vlieglijnen is weergegeven in Figuur 3.4 en de vlieglijnen met datum van acquisitie in Figuur 3.5.

Op 26 oktober zijn als eerste de noordelijke vlieglijnen (6 - 8), en daarna de meest zuidelijke vlieglijnen (24 - 38) ingevlogen. De vlieglijnen zijn op deze dag allemaal binnen het getijventer gevlogen (Eurosense, 2016a). Op 27 oktober waren de weersomstandigheden der mate slecht (mist) waardoor de survey niet afgemaakt kon worden.

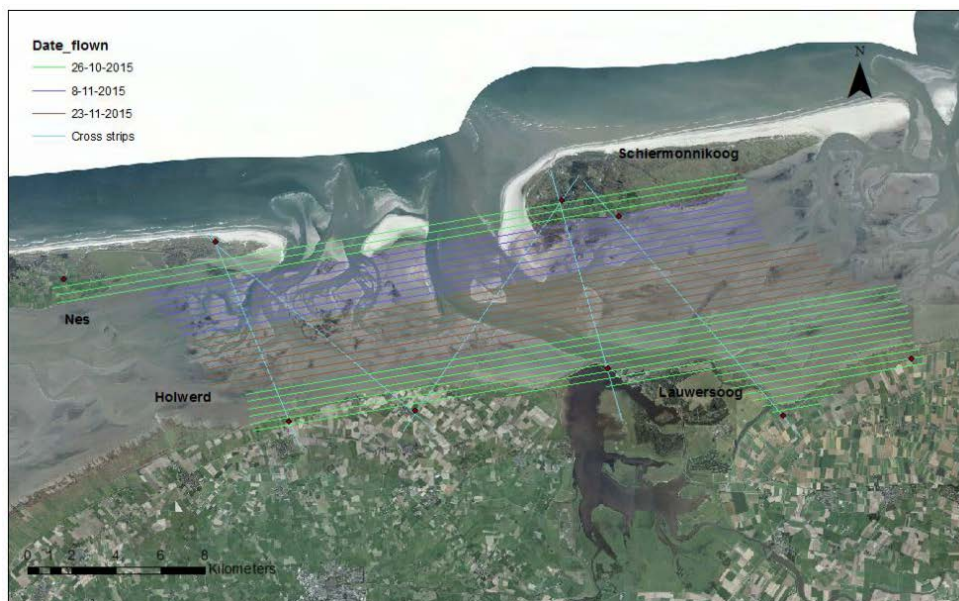
Op 8 november is een poging gedaan de survey af te ronden. De vlieglijnen 9 t/m 15 zijn ingevlogen maar daarna moest de survey gestaakt worden vanwege slecht weer. De survey is op deze dag begonnen met vlieglijn 9 maar is 18 minuten te vroeg gestart waardoor er dus buiten het getijvenster gevlogen is.

Op 23 november is de LiDAR survey afgerond. Deze dag is er bij de start echter een vertraging opgelopen van 2 uur door een technisch mankement. Om de survey af te kunnen ronden is er ongeveer één uur te lang doorgevlogen. Als gevolg zijn de vlieglijnen 21 t/m 23 buiten het getijvenster gevlogen.

De vliegbanen die de productiebanen kruisen (cross-strips, Figuur 3.5) zijn dagelijks gevlogen waarbij vliegbaan 1-3 voorafgaand en vliegbaan 3-5 na de survey gevlogen zijn. Vliegbaan 3 is hierbij in tegengestelde richting gevlogen.



Figuur 3.4 Administratie van vlieglijnen voor de opname van najaar 2015 (Eurosense, 2016a).



Figuur 3.5 Vlieglijnen en moment van acquisitie voor de opname van najaar 2015. De vliegbanen die de productiebanen kruisen zijn dagelijks ingewonnen (Eurosense, 2016b).

De LiDAR opname van het voorjaar van 2016 is uitgevoerd door Eurosense op 5 en 6 mei 2016. De survey is gerapporteerd in Eurosense (2016c). De administratie van de vlieglijnen en de datum van acquisitie is weergegeven in Figuur 3.6.

Het weer was tijdens de survey's van 5 en 6 mei erg goed, met goed zicht en een heldere hemel. Het getijvenster is bepaald aan de hand van de waterstandstations Lauwersoog, Nes, en Schiermonnikoog. De data van het waterstandstation Holwerd kon niet gevonden worden door Eurosense waardoor deze data verkregen is door middel van interpolatie.

In Eurosense (2016c) worden de getijtabellen weergegeven evenals de start- en landtijden van het vliegtuig. Het rapport geeft enkel niet de exacte tijden waarop het invliegen van de vliegbanen is begonnen en beëindigd. Aan de hand van de geleverde vluchtgegevens is het daarom niet te bepalen of alle vliegbanen binnen het getijvenster zijn ingewonnen.



Figuur 3.6 Administratie en datum van acquisitie van de vlieglijnen gevlogen voor de opname van voorjaar 2016. Blauwe lijnen zijn gevlogen op 5 mei, rode lijnen op 6 mei. De vliegbanen die de productiebanen kruisen zijn dagelijks gevlogen (Eurosense, 2016c).

De LiDAR opname van het najaar van 2016 is uitgevoerd door Aerodata op 14, 15 en 16 september 2016. De LiDAR gegevens zijn verzameld met een Riegl LMS-780 scanner. De LiDAR survey is gerapporteerd in Aerodata (2016), een overzicht van de ligging van de vlieglijnen is niet weergegeven maar is gelijk aan Figuur 3.6. Het moment van opname is per vlieglijn in tabelvorm weergegeven in het rapport.

Op de eerste dag van de survey is er iets te vroeg begonnen met vliegen waardoor de eerste twee lijnen (33 en 20) buiten het getijdenster gevlogen zijn. Op 15 september is vlieglijn 33 opnieuw gevlogen evenals 15 tot en met 17. Op 16 september zijn de vlieglijnen 5 en 15 t/m 32 gevlogen. De lijnen 15 tot en met 17 zijn die dag te laat gevlogen en dus met een waterstand boven -0.7 m NAP. Deze lijnen zijn vervangen door de vlieglijnen die op 15 september al waren gevlogen. De complete dataset bestaat uit vlieglijnen die allemaal binnen het getijdenster zijn gevlogen.

### 3.3 Levering van de LiDAR data

De LiDAR data van de opnamen van najaar 2015 en voor- en najaar 2016 zijn aangeleverd door NAM als ruwe LAS-punten (XYZIRGB bestanden). De LAS-data bevatten alle punten, d.w.z. 0-5 punten per vierkante meter. De LAS-punten worden aangeleverd in LAS-formaat 1.2 en bevatten ook informatie als vluchtlijn, tijd, return nummer, intensiteit, scanhoek en RGB. Naast LAS-punten zijn de voor- en najaar 2016 opnamen ook in ASCII 1m x 1m formaat geleverd.

### 3.4 Verwerking van de LiDAR data

De LAS-data van de nieuwe LiDAR datasets is door Deltares omgezet naar een regelmatig 1x1 m rooster ten behoeve van de morfologische analyse. De omzetting is uitgevoerd voor alle nieuwe datasets. Het omzetten van LAS-punten is uitgevoerd met behulp van de PDAL library voor de C++ codeertaal, een library specifiek geschikt voor het verwerken van grote puntenwolken. De methode van verwerking kan als volgt worden samengevat:

1. De LAS-punten van de verschillende vliegbanen worden samengevoegd tot één dataset en vervolgens opgedeeld in vakken (tiles) van 500x500 m.
2. Voor ieder vak worden alle punten die hoger dan +2 m NAP liggen uitgefilterd. De punten worden vervolgens ingedeeld naar een regelmatig rooster van 1x1 m.
3. Aan elke cel van 1x1 m wordt een waarde gegeven door het gemiddelde van de LAS-punten in deze cel te berekenen.
4. De data wordt weggeschreven als ASCII 1x1 m data per vakken van 500x500 m.

Er is bij deze methode gekozen om een waarde aan een cel van 1x1 m toe te kennen door het gemiddelde van de LAS punten te nemen die zich binnen deze cel bevinden (stap 3). Er is gekozen voor het gemiddelde van de punten in een cel omdat voorgaande datasets op eenzelfde manier geaggregeerd zijn (Fugro Geospatial B.V., 2014a; Fugro Geospatial B.V., 2014b; Fugro Geospatial B.V., 2015). Op deze manier is de voorbereiding zoveel als mogelijk gelijk aan de vorige datasets. Echter, de mediaan van de punten binnen een roostercel van 1x1 m geeft een robuustere waarde met betrekking tot uitschieters (die ook nog binnen het hoogtebereik tot +2 m NAP liggen).

De methode die wordt gehanteerd om de geaggregeerde 1x1 m data te verwerken is vrijwel gelijk aan de methode zoals deze beschreven staat in Schrijvershof en Vroom (2016). Eén

uitzondering hierop is dat er tijdens de aggregatie van 1x1m roostercellen naar kaartbladen van 10x10m meter geen uitschieters ( $> +2$  m NAP) worden uitgefilterd. Dit is immers tijdens de omzetting van LAS-punten naar een regelmatige rooster van 1x1 m al gebeurd.

Het percentage van de 10x10m cellen die een waarde hebben (de dekking) binnen de polygoon van het Friesche Zeegat is weergegeven in Tabel 3.1. Het valt op dat de dekking sinds voorjaar 2011 bijna continue is toegenomen (tweede kolom). Een oorzaak van deze verbetering is een andere scanner (sinds survey najaar 2013) en de aanpassing in het vluchtschema op zo een manier dat er lager gevlogen wordt en vliegbanen voor 50% met elkaar overlappen.

De dekking van de datasets waar de waterspiegel is uitgefilterd (derde kolom van de tabel) geeft aan welk gedeelte van het Friesche Zeegat binnen de polygoon uit wadplaat bestaat met een hoogteligging  $> -0,5$  m NAP en welk gedeelte lager is dan deze hoogtegrens. Dit getal zou nagenoeg gelijk zijn voor verschillende datasets bij een perfecte dekking. Een verandering van dit getal ten opzichte van andere jaren kan drie verschillende oorzaken hebben:

- De dataset is niet geheel dekkend voor de wadplaten;
- Er zijn morfologische veranderingen (erosie, sedimentatie, geulmigratie, bodemdaling) opgetreden die het areaal wad boven  $-0,5$  m NAP hebben beïnvloed;
- Een ingemeten gebied wordt in de dataset tot wadplaat gerekend en in andere jaren niet (waterspiegel stond te hoog tijdens inmeten).

De LiDAR opname van najaar 2015 heeft een uitzonderlijk grote dekking voor de dataset waar de waterspiegel al uitgefilterd is. Omdat een gedeelte van de lijnen buiten het getijdenster zijn ingevlogen is het goed mogelijk dat de hoge dekking wordt veroorzaakt doordat een gedeelte van de geulen als wadplaat wordt gerekend, omdat niet de wadplaten maar de waterspiegel is ingemeten.

Het areaal wad in de datasets waarbij de gaten zijn opgevuld door middel van interpolatie (vierde kolom Tabel 3.1) is niet ieder jaar gelijk en toont zelfs een trendmatige afname wanneer de LiDAR opnamen van najaar 2014 en najaar 2015 niet beschouwd worden. Uit deze afname kan niet direct geconcludeerd worden dat het areaal droogvallend wad in het Friesche Zeegat afneemt. In de laatste kolom van Tabel 3.1 is het verschil in dekking tussen de geïnterpoleerde dataset en de dataset die niet is geïnterpoleerd weergegeven. Duidelijk is te zien dat sinds het gebruik van een nieuwe scanner (najaar 2013, Riegl Q680i scanner) het geïnterpoleerde areaal aanzienlijk kleiner is geworden. Dit betekent dat de oudere datasets meer cellen bevatten waarbij de bodemhoogte is bepaald aan de hand van interpolatie.

De LiDAR meettechniek zal lokale depressies van de wadplaten moeilijker kunnen detecteren dan lokale verhogingen, de lokale verhogingen hebben namelijk een droger oppervlak dan de depressies. Het interpoleren van de bodemkaarten zorgt er voor dat lokale depressies die niet ingemeten zijn een te hoge bodemligging toegekend kunnen krijgen. Bij de interpretatie van de gegevens moet er dus rekening mee gehouden worden dat bij de oudere datasets een veel groter oppervlak opgevuld is door middel van interpolatie en meer cellen dus een hoge bodemligging kunnen hebben. Een goede vergelijking kan in principe alleen plaatsvinden tussen datasets waarbij het verschil in geïnterpoleerd areaal niet heel groot is, dit is het geval voor de datasets van najaar 2013 tot en met heden.

Tabel 3.1 Percentage cellen met waarden binnen de gecombineerde polygoon van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag, zowel voor als na filtering van de waterspiegel.

LiDAR opname	Dekking in [%]			Vershil [%]
	In polygoon	In polygoon + filtering water	In polygoon + filtering water geïnterpoleerde datasets	Vershil geïnterpoleerd – niet geïnterpoleerd zonder waterspiegel
Voorjaar 2010	92,63	50,16	53,34	3,18
Voorjaar 2011	80,37	49,97	53,18	3,21
Najaar 2011	90,47	50,69	53,12	2,43
Najaar 2012	94,73	50,50	52,69	2,19
Najaar 2013	98,38	52,84	53,29	0,45
Voorjaar 2014	98,48	52,95	53,77	0,82
Najaar 2014	98,79	55,44	56,03	0,59
Zomer 2015	99,82	51,33	51,50	0,17
Najaar 2015	99,87	62,99	63,11	0,12
Voorjaar 2016	98,28	51,85	52,13	0,28
Najaar 2016	99,66	50,91	50,99	0,08

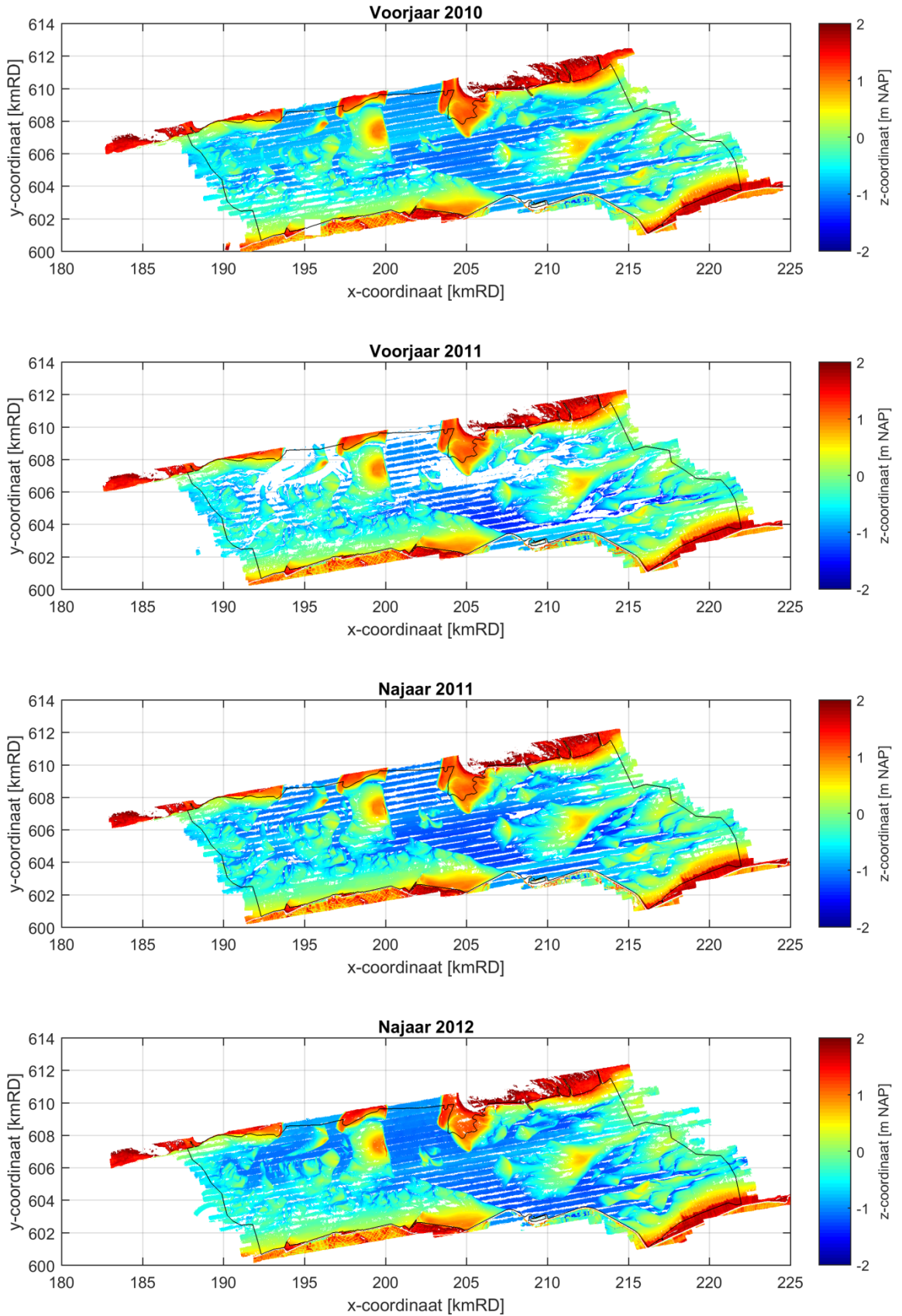
### 3.5 Bodemkaarten

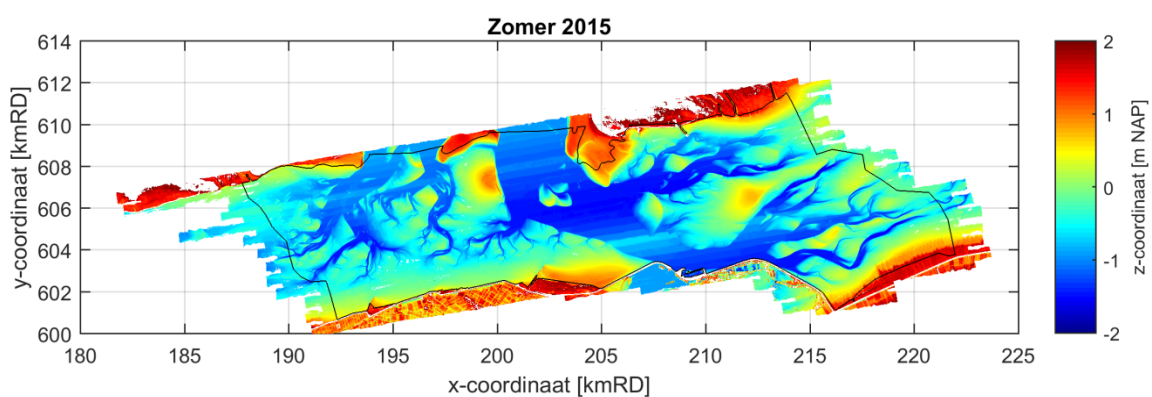
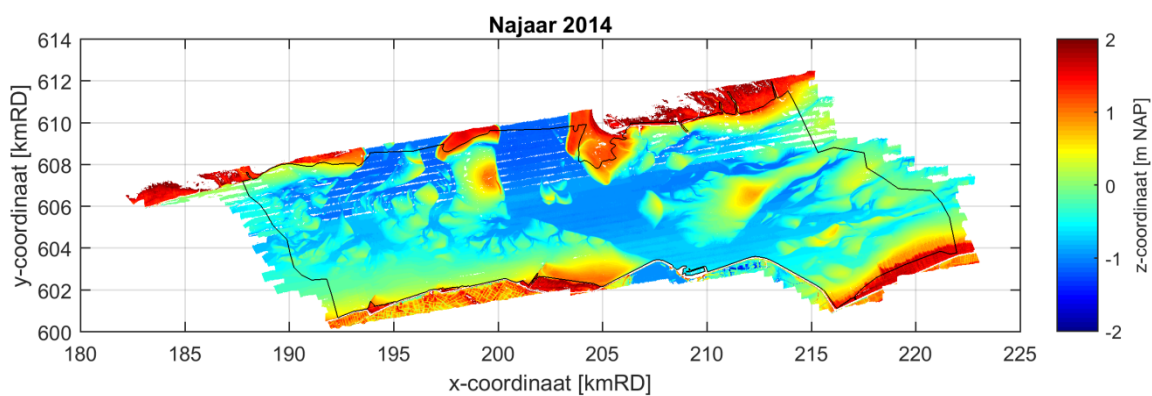
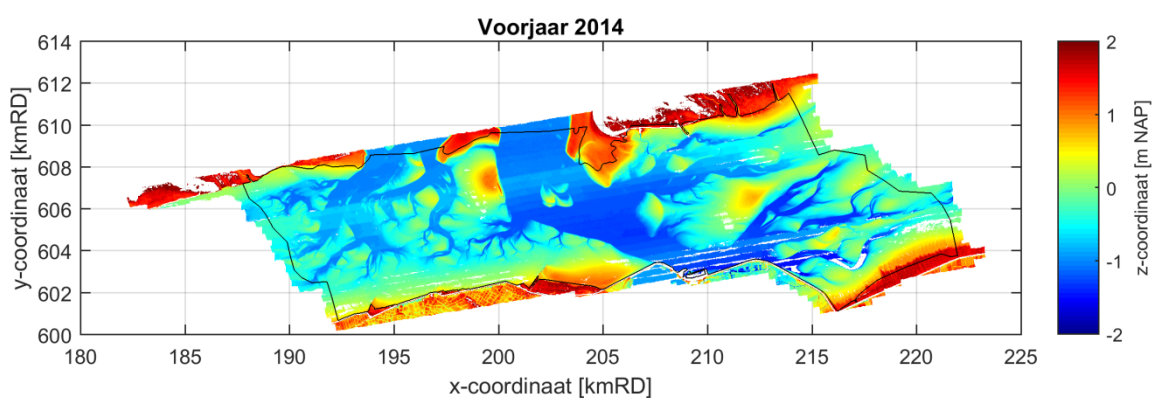
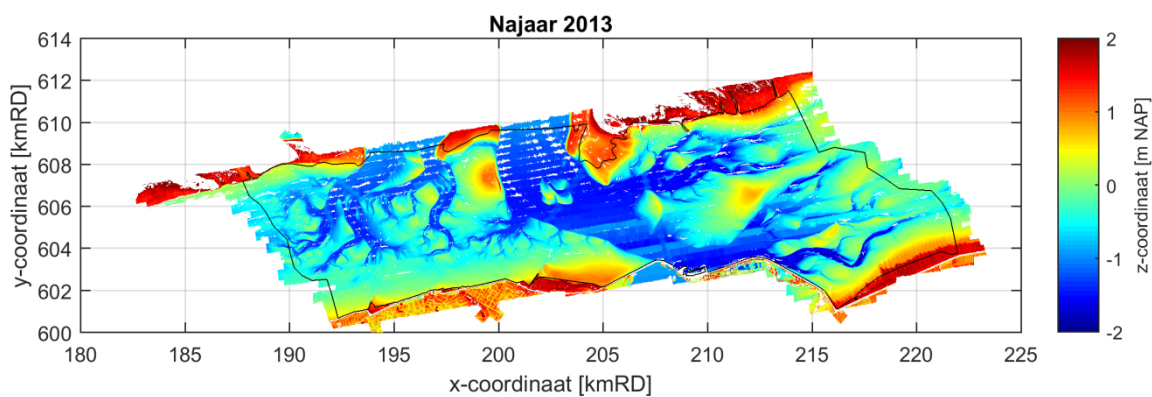
De bodemkaarten (Digital Elevation Models, DEM) die zijn geproduceerd aan de hand van 10x10 m datasets zijn weergegeven in Figuur 3.7. De bodemkaarten van de datasets waarbij de waterspiegel is uitgefilterd staan in Figuur A.1 en de geïnterpoleerde bodemkaarten waar de waterspiegel verwijderd is in Figuur A.2.

De bodemkaart van de LiDAR opname van najaar 2015 laat een duidelijk afwijkend patroon zien voor de vlieglijnen 9 tot en met 23 (zie ook Figuur 3.4). Deze vlieglijnen zijn op 8 en 23 november ingewonnen. In de geul van het Friesche Zeegat is ook een bodemhoogte van ongeveer 0 m NAP ingewonnen. Omdat er op deze locatie geen wadplaten zijn en de vlieglijnen 21 t/m 23 buiten het getijdenster ingewonnen zijn kan er met zekerheid gezegd worden dat op deze locaties niet de hoogte van de wadplaten maar de hoogte van de waterspiegel is ingemeten. De dataset lijkt in het noorden en het zuiden (de data die op 26 oktober is ingewonnen) wel correct te zijn. Bij de morfologische analyses moet er dus rekening mee gehouden worden dat de dataset als geheel incorrect is, voor specifieke deelgebieden kan de data wellicht wel gebruikt worden.

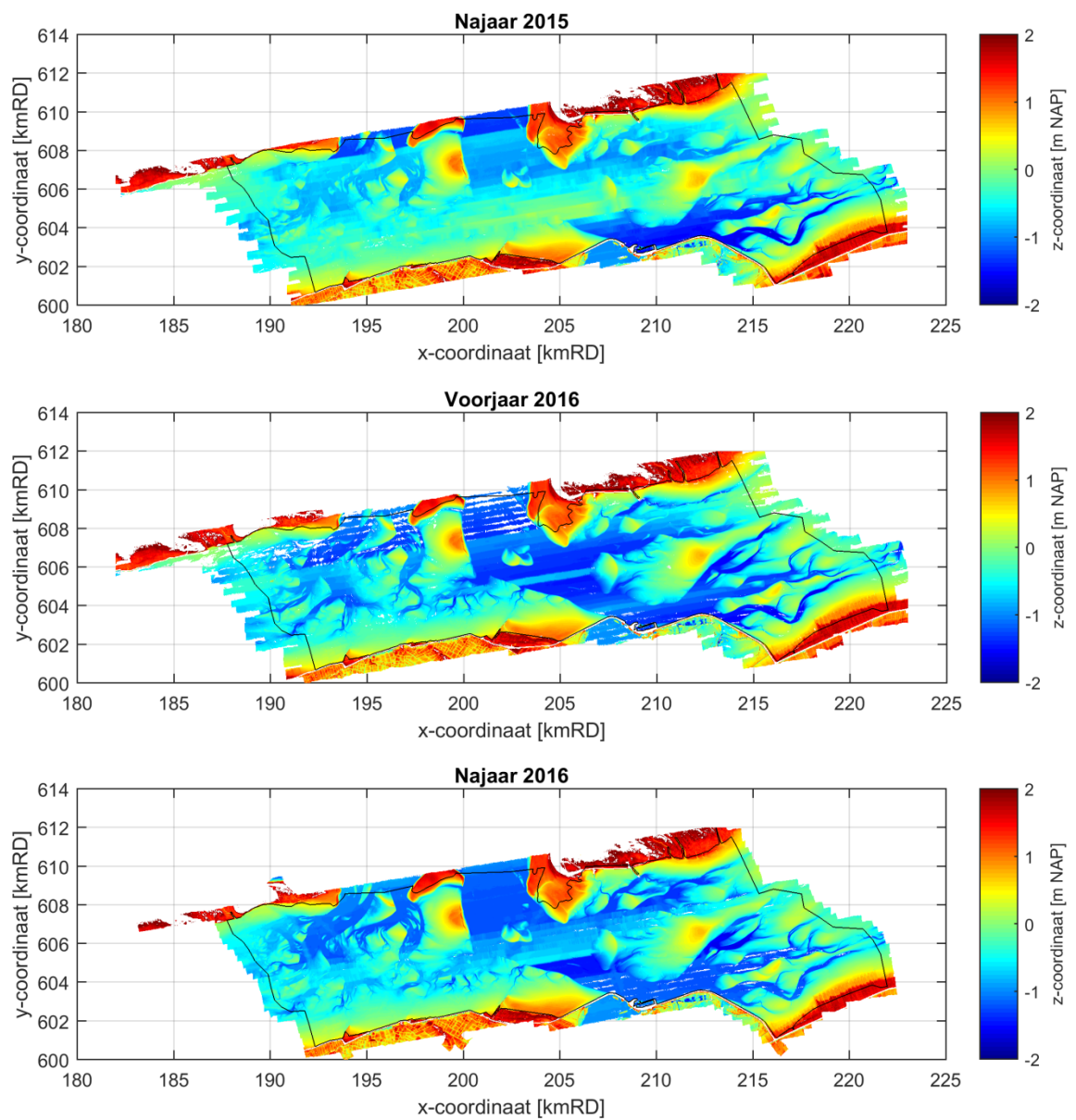
De bodemkaart van de LiDAR opname van voorjaar 2016 laat een vrijwel complete dekking van het gebied binnen het polygoon zien. In de geulen is er echter wel oppervlak dat niet geheel bedekt wordt door de LiDAR data. De reflectie van de LiDAR data is onder andere afhankelijk van de hoek ten opzichte van de sensor en het materiaal. Doordat het water de laserpuls absorbeert en de hoek ten opzichte van de sensor langs de randen van de vliegbanen groot is, is het aantal gereflecteerde punten niet groot genoeg om de hoogte op te meten. Duidelijk is te zien dat dit niet het geval is voor dezelfde vliegbanen boven het drooggevallen wad, hier is een complete dekking te zien (zie ook Figuur A.1).

De bodemkaart van de LiDAR opname van najaar 2016 laat een complete dekking zien en ook de bodemkaart waar de waterspiegel is uitgefilterd (Figuur A.1) lijkt een correcte weergave van de bodemhoogte in het Friesche Zeegat te zijn.









Figuur 3.7 Visualisatie van alle LiDAR opnamen (april 2010 t/m september 2016) op een 10m x 10m rooster.



## 4 Discussie over de nauwkeurigheid van de LiDAR gegevens

### 4.1 Introductie

De nauwkeurigheid van de LiDAR data is van invloed op de kwaliteit van de LiDAR data en bepaald in belangrijke mate de toepassing van de data. In het verleden zijn er uitgebreide discussies over de nauwkeurigheid van de data geweest door dat de definitie van de nauwkeurigheid zoals beschreven door de meetdienst (bv. Fugro Geospatial B.V., 2015) onvoldoende duidelijk is voor gebruik in de morfologische analyses zoals uitgevoerd door Deltares. De voornaamste reden hiervoor is dat met de gestelde nauwkeurigheid patronen zichtbaar zijn in het verschil tussen twee metingen die niet te verklaren zijn in termen van morfologische dynamiek (streeppatronen) of bodemdaling.

De vragen die jaarlijks tijdens de analyse terugkeren zijn:

1. Hoe moeten de opgegeven systematische en stochastische meetfouten worden geïnterpreteerd?
2. Wat is de nauwkeurigheid van een individueel kaartbeeld na aggregatie naar 10 x 10 m?
3. Wat is de nauwkeurigheid van de verschilkaarten?

### 4.2 Beschrijving van de discussie

Op 1 april 2014 is er een bijeenkomst geweest tussen NAM, Fugro (meetdienst), Deltares en Rijkswaterstaat om de nauwkeurigheid van de LiDAR data te bespreken. Deze bijeenkomst heeft een gezamenlijk memo opgeleverd waarin de nauwkeurigheid van de LiDAR data besproken wordt.

Er is een poging gedaan de nauwkeurigheid voor de morfologische analyse empirisch te bepalen door middel van de verschilkaarten. Een dergelijke empirische bepaling levert dat er een interval in de kleurenbalk van 25 cm nodig is om de streeppatronen in de verschilkaarten weg te filteren. Deze observatie geeft aan dat er geen indicatie is dat het verschil tussen twee metingen groter kan zijn dan 12,5 cm (Piening, 2014). De meetdienst (Fugro) claimt echter een nauwkeurigheid van een geaggregeerd kaartbeeld van kleiner dan 6 cm. Het memo concludeert dat de nauwkeurigheid van het verschil van twee opnamen tussen de 6 en 12,5 cm moet liggen.

In navolging van de voorgaande morfologische analyse (Schrijvershof en Vroom, 2016) is er overleg geweest tussen Deltares, NAM en de Audit-commissie. Uit deze bespreking is de mogelijkheid naar voren gekomen om een benadering van de meetnauwkeurigheid van de verschilkaarten te bepalen als de standaardafwijking van de verschillen. In Schrijvershof (2016) is deze methode toegepast. Door de verdeling van bodemhoogteveranderingen te bepalen kan de nauwkeurigheid van de verschilkaart benaderd worden als de standaardafwijking van de verschillen. Deze methode geeft een maximale benadering van de meetfout. De benadering geeft enkel een maximale waarde doordat de verschillen tussen twee LiDAR opnamen veroorzaakt worden door werkelijke bodemhoogteverschillen (morfologische veranderingen) en verschillen die het gevolg zijn van de nauwkeurigheid van het LiDAR meetsysteem.

Aan de hand van de verschilkaarten van opeenvolgende LiDAR opnamen van voorjaar 2010 tot en met najaar 2013 is er bepaald dat de gemiddelde standaardafwijking van een verschilkaart 7,23 cm is. De nauwkeurigheid van een individueel kaartbeeld is de nauwkeurigheid van de verschilkaart gedeeld door  $\sqrt{2}$ . De nauwkeurigheid van een individuele kaart is dan 5,11 cm.

#### 4.3 Onderzoeken in navolging van de adviezen van de audit-commissie

In navolging van de voorgaande morfologische analyse van de LiDAR data heeft de audit-commissie enkele adviezen gegeven voor onderzoeken die de kwaliteit van de LiDAR data van het Friesche Zeegat kunnen verbeteren of een beter begrip van de nauwkeurigheid van de data kunnen geven. Deze onderzoeken zijn uitgewerkt in Appendices B tot en met D. De belangrijkste bevindingen van de onderzoeken zijn hieronder kort benoemd.

##### 4.3.1 Appendix B; Analyse van individuele LiDAR vliegbanen

In Appendix B staat het onderzoek beschreven dat uitgevoerd is naar individuele vliegbanen. De onderzoeksvraag van de studie is: kan de nauwkeurigheid van de LiDAR data verbeterd worden als parallelle vliegbanen in dezelfde richting worden gevlogen in plaats van tegengestelde richting?

Het onderzoek toont aan dat er geen significant verschil op te merken is in de standaardafwijking (fout) tussen verschilpunten van aangrenzende vliegbanen die in dezelfde richting gevlogen zijn ten opzichte van banen die in tegengestelde richting gevlogen zijn. Het onderzoek geeft geen benadering van de nauwkeurigheid van de LiDAR data maar toont wel dat de nauwkeurigheid van twee opeenvolgende opnamen op het lage gedeelte van de wadplaten veel kleiner (onnauwkeuriger) is dan hoger op de wadplaten. De reden hiervoor is waarschijnlijk te wijten aan de grotere temporele variatie in waterstand en de versterkte verstrooiing van de LiDAR puls op de lagere vochtigere gedeeltes van de wadplaten. Het water op de platen is het voornaamste probleem voor LiDAR data om een accurate representatie van de bodemhoogte te geven (Brzank et al., 2008; Mason et al., 2006). Het water op de platen draagt dus bij aan de onnauwkeurigheid van de LiDAR data van een individueel geaggregeerd kaartbeeld en van de verschilkaarten.

##### 4.3.2 Appendix C; Analyse van de toepassing van multispectrale beelden voor het scheiden van wad en water

Appendix C beschrijft het onderzoek dat uitgevoerd is aan de hand van de multispectrale beelden welke gelijktijdig ingewonnen zijn tijdens de LiDAR opname van najaar 2016. De analyse toont aan dat het mogelijk moet zijn om een classificatie van water en wad uit te voeren op basis van de Near Infrared (NIR) band. Deze band geeft namelijk het duidelijkste onderscheid tussen water en land. De ruimtelijke resolutie van de multispectrale beelden is in principe ruim voldoende om deze classificatie te gebruiken voor de morfologische analyse van de LiDAR data.

De classificatie toepassen op de morfologische analyse is echter niet direct te implementeren. De classificatie zou gebruikt kunnen worden om alleen de droge oppervlakken van de wadplaten te identificeren. Door middel van deze identificatie zou alleen de LiDAR data van de droge wadplaten gebruikt kunnen worden en daarmee een grotere nauwkeurigheid van de LiDAR data bewerkstelligd kunnen worden. De morfologische analyse is echter gericht op verschillen tussen de LiDAR opnamen sinds 2010. Multispectrale beelden

zijn niet beschikbaar voor de oudere LiDAR opnamen. Belangrijk is echter dat de waterstand en de locaties van water op de platen bij iedere LiDAR opname verschillen. Als gevolg is het oppervlak dat vergeleken kan worden tussen verschillende opnamen niet gelijk. Als gevolg zou er met iedere LiDAR opname een kleiner oppervlak beschikbaar zijn om de analyse over uit te voeren.

#### 4.3.3 Appendix D; Analyse van de a.d.h.v. LiDAR gemeten verandering in wadplaahtoogte in Pinkegat en Zouterkamperlaag

In Appendix D staat de analyse beschreven die uitgevoerd is naar de integratie van de verschillende meettechnieken die gebruikt worden om de wadplaten in het Friesche Zeegat te monitoren. Hier wordt alleen het gedeelte van het onderzoek besproken dat betrekking heeft of de LiDAR data.

In Figuur 1.5.1-a tot en met Figuur 1.5.1-c is duidelijk te zien dat LiDAR metingen in het bereik -0,5 – 0 m NAP een minder nauwkeurige overeenkomst vertonen met de sedimentgrid data dan LiDAR metingen boven 0 m NAP. De sedimentgrid data meet de werkelijke bodemhoogte relatief nauwkeurig terwijl de LiDAR data alleen de bodemhoogte exact kan weergeven wanneer er geen water op de plaat staat. Wanneer dit wel het geval is geeft de LiDAR data een overschatting van de werkelijke bodemhoogte.

Figuur 1-5.2-b toont een uitvergroting van het profiel dat over de strekdam is getrokken. Het hoogste gedeelte van het profiel ligt niet altijd op dezelfde plek doordat er kleine verschillen in horizontale positie kunnen optreden tussen verschillende geaggregeerde LiDAR opnamen. De figuur toont dat het hoogste gedeelte van de strekdam varieert tussen de ~1,98 (voorjaar 2011) en ~2,07 (voorjaar 2016) m NAP. Wanneer de opnamen van 2014 ook worden beschouwd is de spreiding in hoogteligging nog groter (~1,98 – 2,12 m NAP). De strekdam is niet onderhevig aan sedimentatie of erosie en ook kan het uitgesloten worden dat er een verschil in bodemhoogte is door water op de strekdam. De analyse toont aan dat de bodemhoogte van droge oppervlakken tussen de 5 – 10 cm kan verschillen tussen twee geaggregeerde LiDAR bodemopnamen. Het noord-zuid profiel dat over de dijk is getrokken toont eenzelfde variatie in bodemhoogte tussen verschillende LiDAR opnamen. Voor vlakke oppervlakken zonder vegetatie wordt eenzelfde variatie in hoogte (standaardafwijking) voor LiDAR data gehanteerd (Davenport et al., 2004 en Baltsavias, 1999a,b).

#### 4.3.4 Implicaties voor de gebruikte nauwkeurigheid

De nauwkeurigheid van de LiDAR data van de geaggregeerde 10x10 m kaartbeelden die is vastgesteld in Schrijvershof (2016) is 5,11 cm. De onderzoeken in Appendices B en D tonen echter aan dat deze nauwkeurigheid alleen behaald kan worden op droge oppervlakken op de hoge delen van de wadplaten en dan is de berekende nauwkeurigheid zelfs dicht bij de ondergrens van wat de verschillende onderzoeken aantonen (5 – 10 cm). Wanneer de data van najaar 2014 wel beschouwd wordt is de grootte van de meetfout zelfs tot 14 cm. Op de lagere gedeeltes van de wadplaten zijn plassen met water aanwezig waardoor de LiDAR data een te hoge inschatting van de bodemhoogte kan geven, getuige de vergelijking met de sedimentgrids. Daarnaast is de temporele variatie van de waterspiegel op de lagere gedeelte van de wadplaten hoger waardoor er een verschil kan optreden tussen twee verschillende LiDAR metingen met een kort tijdsinterval, getuige de analyse van de individuele vliegbanen. De nauwkeurigheid van de LiDAR data van 5,11 centimeter heeft voornamelijk betrekking op de droge hoge delen. De grotere onnauwkeurigheid op de lagere gedeeltes is niet het gevolg van het LiDAR meetsysteem, maar het gevolg van natuurlijke processen.

#### 4.4 Conclusie

De uitgevoerde onderzoeken geven aan dat de nauwkeurigheid van geaggregeerde kaartbeelden tussen de 5 en 10 cm moet liggen voor de hoge droge gedeelten van de wadplaten. De lagere gedeelten worden onnauwkeuriger ingemeten door de temporele variabiliteit van het water op de platen. Voor de morfologische analyse is er echter behoefte aan een eenduidige invulling van de nauwkeurigheid van de LiDAR data. Deltares heeft daarom de volgende interpretatie op de drie vragen die in de introductie zijn gesteld:

1. Bronnen van meetfouten
  - a. De stochastische meetfout.

Dit is de hoogfrequente ruis van het LiDAR meetsysteem. De stochastische meetfout wordt voor het overgrote deel weggefilterd door uitschieters uit de data te verwijderen en de meetpunten te aggregeren naar een regelmatig rooster (1x1 m en 10x10 m). Daar waar veel meetpunten per vierkante meter aanwezig zijn (centrale gedeelte vliegbanen) wordt deze beter uitgemiddeld dan daar waar de puntendichtheid lager is (randen van vliegbanen).
  - b. De systematische meetfout, deze heeft twee bronnen
    - De laagfrequente navigatiefout van het GPS-systeem. Deze fout is constant over korte perioden van enkele seconden waarbij de GPS en vliegomstandigheden niet significant veranderen, maar zal wel significant veranderen binnen een vliegstrook en tussen vliegstroken. Deze fout valt niet weg door aggregatie naar een regelmatig rooster.
    - De systematische die over de gehele survey gelijk is. Deze fout wordt in principe geëlimineerd door inpassing op de controlegrids (GCP-punten).

De meetfouten hebben invloed op de nauwkeurigheid van een individueel punt na aggregatie, en op de nauwkeurigheid van een geaggregeerd kaartbeeld en van een verschilkaart als geheel. De nauwkeurigheid van een geaggregeerd kaartbeeld en verschilkaart is de nauwkeurigheid die van belang is voor de morfologische analyse van de wadplaten.

2. Voor de nauwkeurigheid van een individueel kaartbeeld na aggregatie naar een 10 x 10 m rooster wordt een grootte van 5,11 cm aangehouden zoals bepaald in Schrijvershof (2016).
3. Voor de nauwkeurigheid van een verschilkaart tussen twee LiDAR opnamen wordt een grootte van 7,23 cm aangehouden zoals bepaald in Schrijvershof (2016).

Deze nauwkeurigheden zullen gebruikt worden in de huidige morfologische analyse van de wadplaten.

## 5 Erosie en sedimentatie

### 5.1 Erosie/sedimentatiekaarten

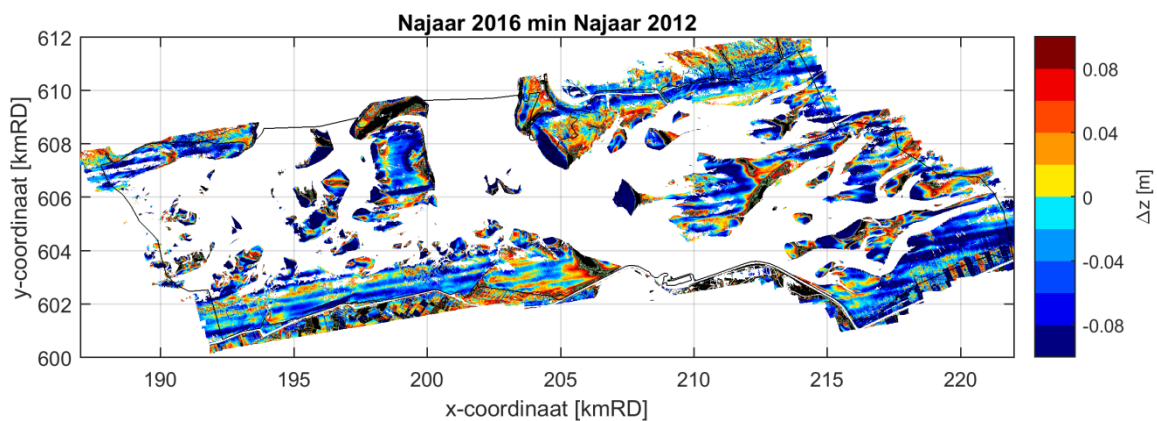
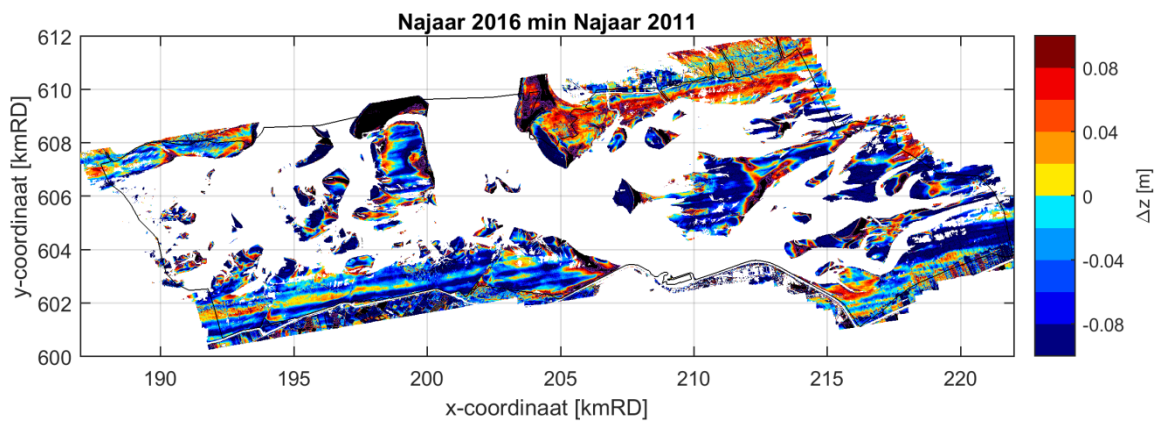
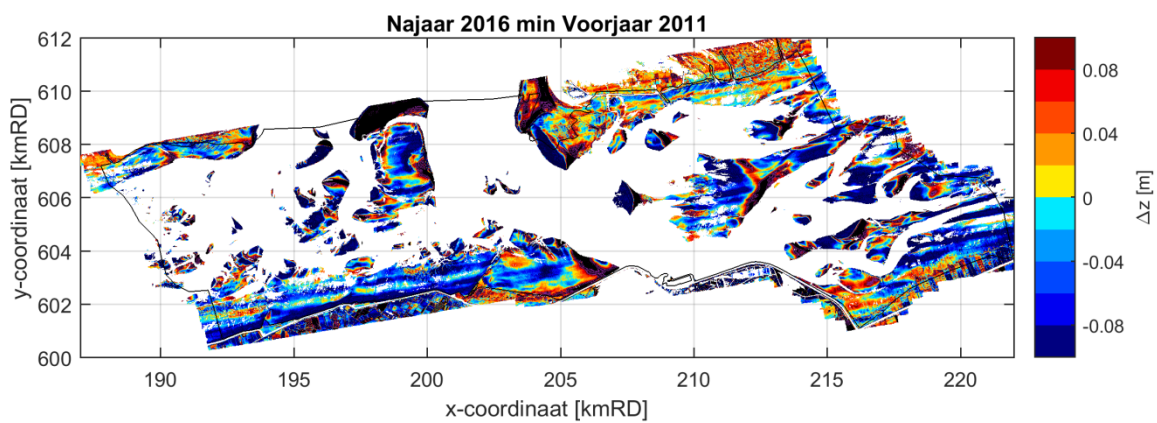
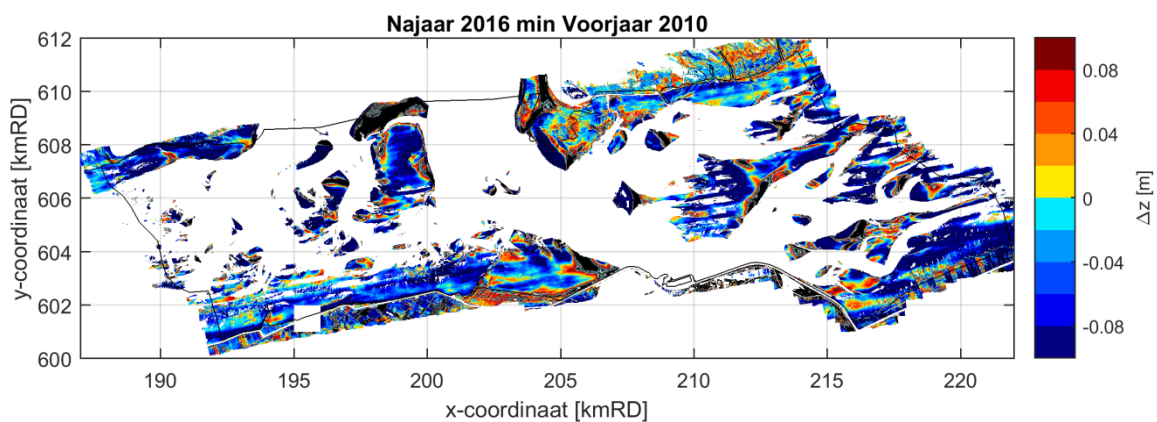
De meest recente LiDAR opname (najaar 2016) wordt vergeleken met alle voorgaande LiDAR opnamen door middel van erosie-sedimentatiekaarten. De kaarten laten voor het gehele gebied van het Friesche Zeegat zien waar de LiDAR data aantoont dat er een verlaging dan wel verhoging van de bodemhoogte heeft plaatsgevonden. De kaarten zijn weergegeven in Figuur 5.1.

Het valt duidelijk op dat in veel van de kaarten de strepen in de richting van de vliegbanen te onderscheiden zijn. Dit geldt zowel voor de oudere opnamen (2010 t/m 2012) als recentere opnamen (2016). Het wel of niet kunnen onderscheiden van vliegbanen in de LiDAR datasets is een gevolg van de puntendichtheid aan de randen van de vliegbanen en het verwerkingsalgoritme dat wordt toegepast om de vliegbanen ten opzichte van elkaar te corrigeren. De patronen hebben geen betekenis in termen van morfologische ontwikkeling en worden daarom in dit hoofdstuk verder niet besproken.

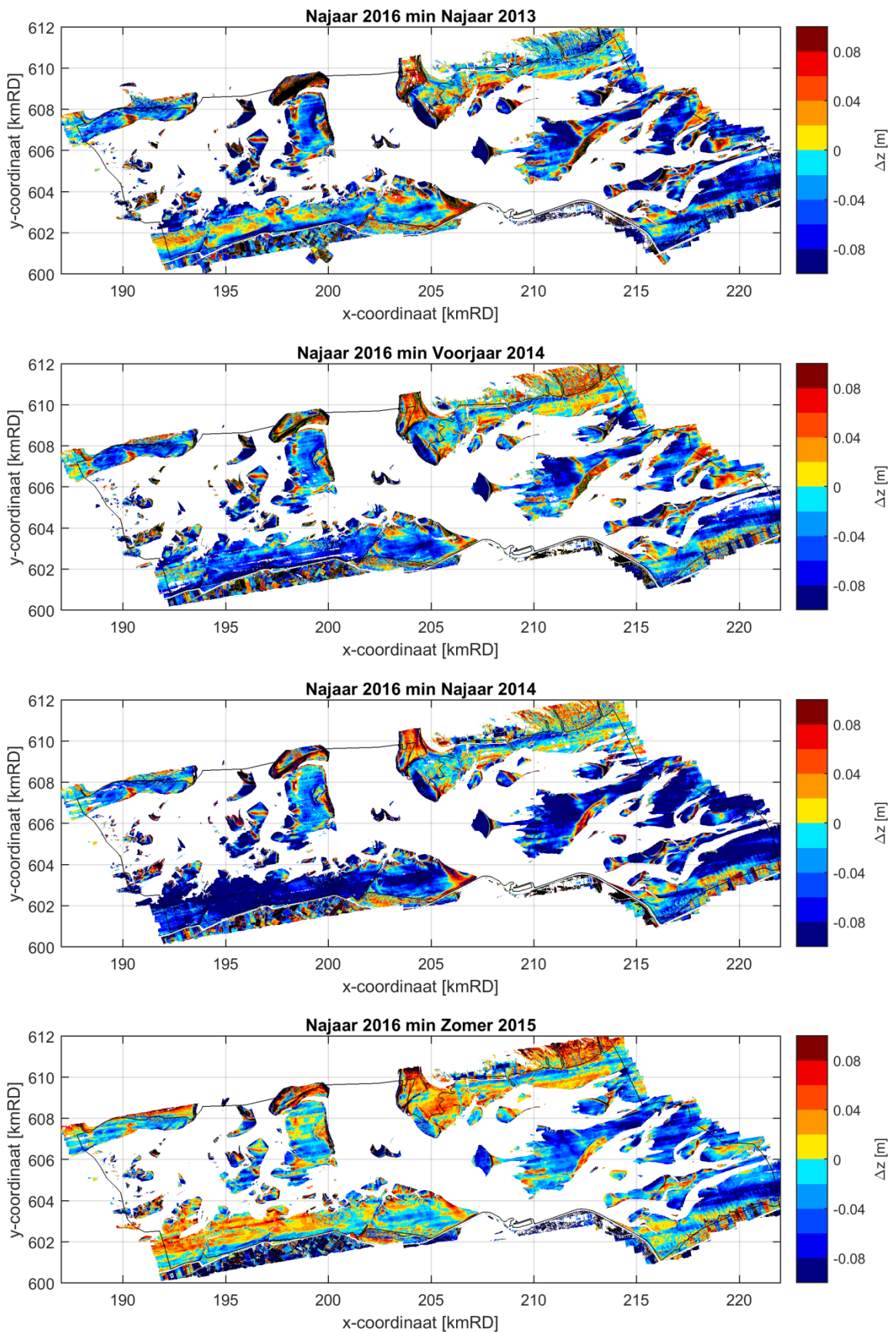
De verschilkaart van Najaar 2016 en Voorjaar 2016 toont een afwijkend patroon aan waarbij er voornamelijk erosie in het oostelijke gedeelte en sedimentatie in het westelijke gedeelte waar te nemen is. Een dergelijk erosie-sedimentatiepatroon dat over het gehele bekken waar te nemen is, is niet te verklaren aan de hand van morfologische verandering en daarom moet er geconcludeerd worden dat er een fout zit in minstens één van de twee datasets. Figuur 5.2 toont de verschilkaart van de opname van Voorjaar 2016 en Voorjaar 2014. Deze verschilkaart laat eenzelfde patroon zien in tegengestelde richting (de lijn in de figuur toont de omkanteling). Het kan daarom geconcludeerd worden dat de LiDAR opname van voorjaar 2016 een fout bevat. Het is mogelijk dat de fout is ontstaan tijdens het verwerken van de LiDAR data bij de stap waar bij het kaartbeeld wordt gecorrigeerd aan de hand van de GCP-punten. Het kaartbeeld lijkt hier een kanteling te zijn ondergaan waardoor het westelijke gedeelte naar beneden is gekanteld en het oostelijke gedeelte naar boven.

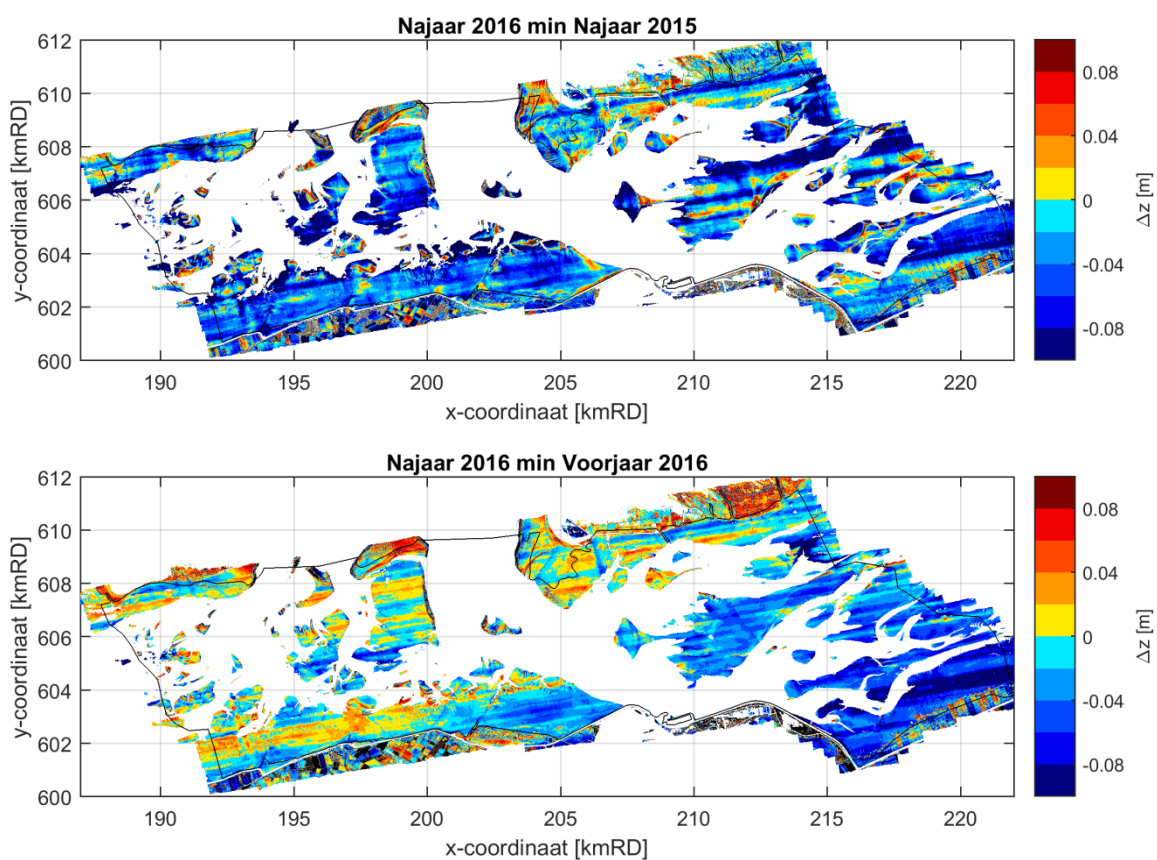
Een foutieve correctie aan de hand van de GCP-punten is tijdens de voorgaande analyse van de LiDAR meetgegevens als mogelijke oorzaak genoemd voor de lage bodemligging in het Pinkegat (Schrijvershof en Vroom, 2016). De LiDAR survey's van Zomer 2015, Najaar 2015 en Voorjaar 2016 zijn ingewonnen door Eurosense. De survey van Zomer 2015 is echter verwerkt door Fugro. Het is wel waarschijnlijk dat alle drie deze datasets op eenzelfde manier verwerkt zijn en dezelfde fout bevatten. De grootte van de afwijking lijkt echter niet groter dan nauwkeurigheid van de LiDAR data maar dit verklaart niet waarom er een systematische verschuiving van het hele kaartbeeld is waar te nemen.

Tijdens voorgaande analyserapporten zijn de erosie-sedimentatiepatronen van de LiDAR data vergeleken met de patronen zoals deze volgen vanuit de Rijkswaterstaat data (Iodigen en LiDAR gecombineerd). De Rijkswaterstaat data geeft een duidelijker beeld van de lange-termijn trends en laat zien dat de erosiesnelheid welke berekend is over de meest recente metingen (2005 – 2012) in de orde van 2 tot 3 cm/jaar ligt en dat er geen verschil in snelheid is te onderscheiden ter plaatse van de gaswinningsgebieden (Vroom en Beekhuizen, 2015). Het is echter lastig de Rijkswaterstaat data met de huidige LiDAR data te vergelijken doordat deze data op een andere manier verwerkt is en het niet duidelijk op welke manier de verwerking wordt uitgevoerd. De Rijkswaterstaat data is daarom niet toegevoegd aan dit rapport.

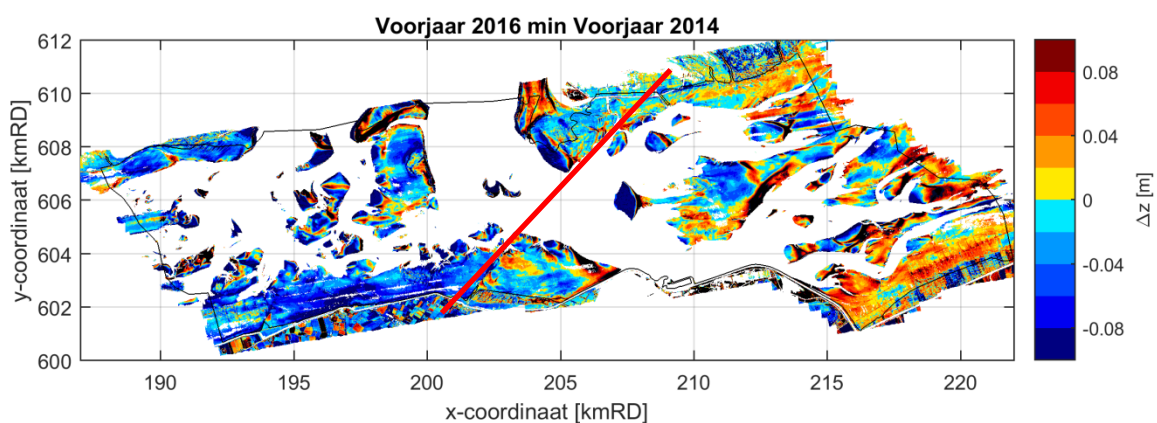








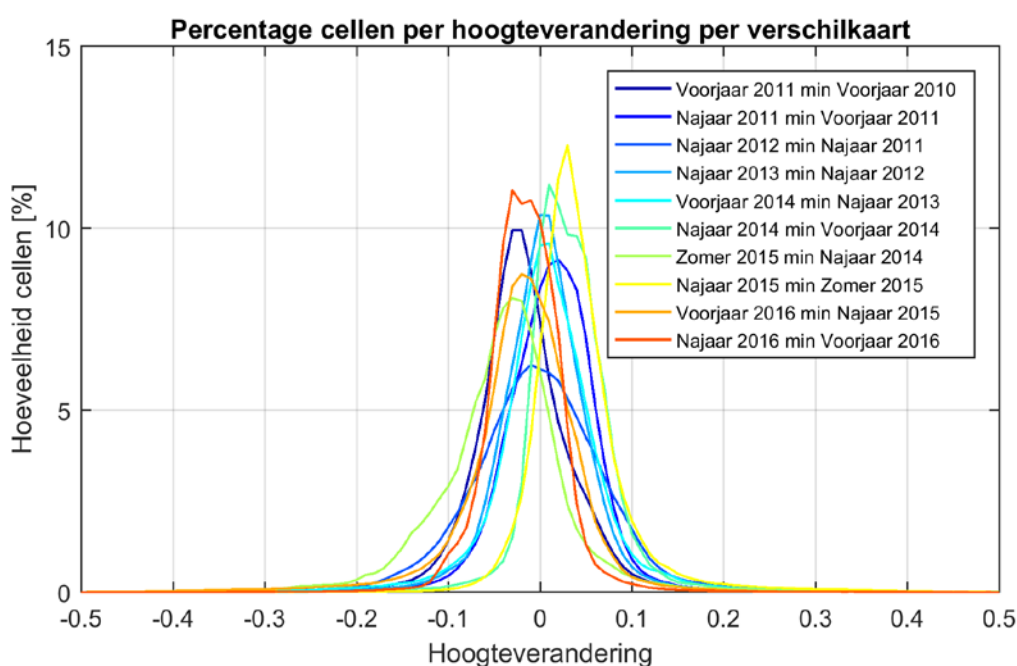
Figuur 5.1 Verschilkaarten van alle LiDAR opnamen (april 2010 t/m mei 2016) ten opzichte van de LiDAR opname van september 2016.



Figuur 5.2 Verschilkaart van de LiDAR opname van voorjaar 2016 ten opzichte van de LiDAR opname van zomer 2015

Figuur 5.3 geeft de verdeling van de bodemhoogteverschillen van iedere verschilkaart van opeenvolgende LiDAR opnamen. De figuur geeft aan dat de bodemhoogteverschillen ongeveer normaal verdeeld zijn. Het gemiddelde van de verschilkaart Najaar 2015 – Zomer 2015 (zie ook Tabel 5.1) toont een positieve bias doordat de te hoge bodemligging (inmeten van de waterspiegel) veel positieve verschillen als gevolg heeft.

Tabel 5.1 geeft naast het gemiddelde ook de standaardafwijking (standaard-deviatie) van de verschillen. De standaardafwijking geeft aan wat de maximale grootte van de meetfout van een verschilkaart kan zijn omdat de verschilkaart zowel bodemhoogteverschillen bevat die het gevolg zijn van de ruis van het meetsysteem als morfologische verandering (Schrijvershof, 2016). De standaardafwijking van de verschilkaarten van opeenvolgende bodemopnamen geeft dus een indicatie van de toe te passen meetfout voor de morfologische analyse. De standaardafwijking voor de verschilkaarten ligt tussen de 4,8 en 9,0 centimeter. Vanuit praktische overwegingen wordt de nauwkeurigheid van de LiDAR meetgegevens voor de morfologische analyse gebruikt zoals deze in Hoofdstuk 4 beschreven is.



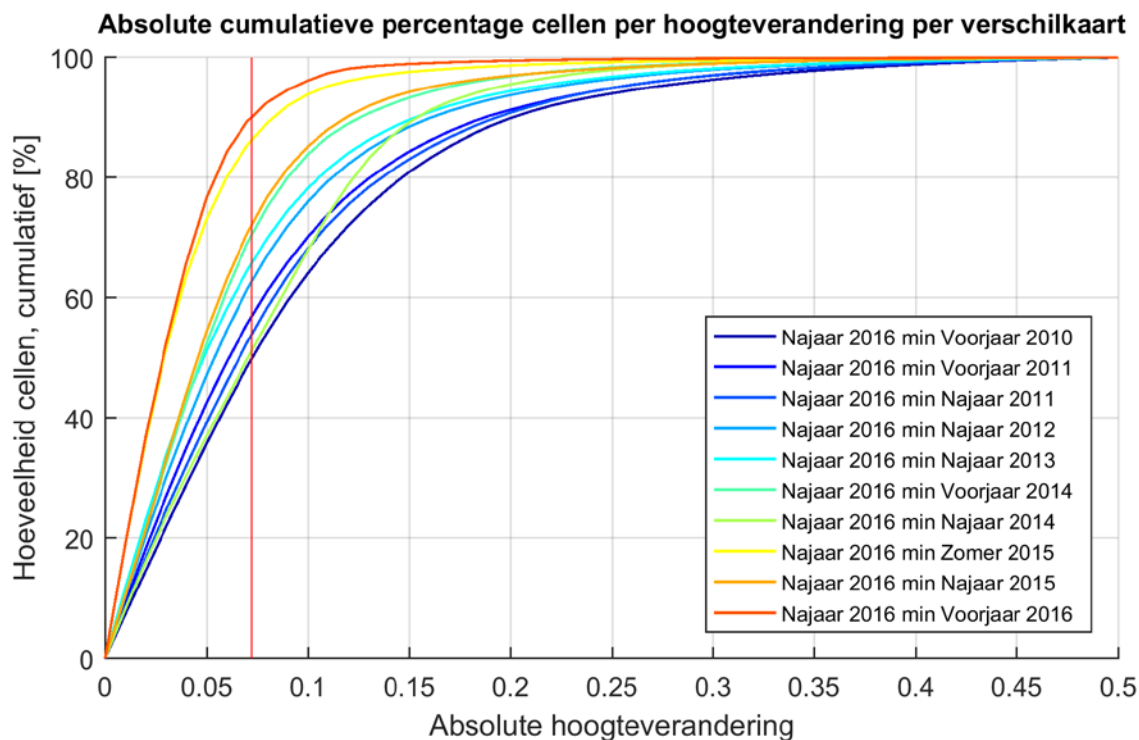
Figuur 5.3 Normaalverdeling van de verschilkaarten van opeenvolgende LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat.

Tabel 5.1 Gemiddelde en afwijking van de verschilkaarten van opeenvolgende LiDAR opnamen.

Verschilkaart	$\mu$	$\sigma$
Voorjaar 2011 – Voorjaar 2010	-0,0218	0,0726
Najaar 2011 - Voorjaar 2011	0,0073	0,0607
Najaar 2012 – Najaar 2011	-0,0048	0,0904
Najaar 2013 – Najaar 2012	-0,0007	0,0655
Voorjaar 2014 – Najaar 2013	0,0038	0,0722
Najaar 2014 – Voorjaar 2014	0,0276	0,0489
Zomer 2015 – Najaar 2014	-0,0440	0,0819
Najaar 2015 – Zomer 2015	0,0361	0,0601
Voorjaar 2016 – Najaar 2015	-0,0249	0,0757
Najaar 2016 – Voorjaar 2016	-0,0211	0,0477

In Figuur 5.4 is het cumulatieve percentage van de absolute verschillen van de meest recente bodemopname met alle voorgaande bodemopnamen weergegeven. De figuur geeft aan welk percentage van de cellen (alleen cellen met een waarde) een bodemhoogteverandering betreft die kleiner is een specifieke absolute hoogteverandering. Doordat de morfologische veranderingen binnen een getijdebekken groter zijn over een langere periode zijn de bodemhoogteverschillen tussen bodemopnamen met een langere tussenperiode groter. In Figuur 5.4 is dit duidelijk zichtbaar doordat de verschilkaart met een langere tussenperiode lager ligt. Een groter tijdsinterval tussen twee metingen zorgt er dus voor dat voor een groter gedeelte van het Friesche Zeegat trends in de bodemhoogte opgemerkt kunnen worden. De figuur duidt ook aan dat alle absolute verschillen kleiner zijn dan 0,5 m.

De rode verticale lijn duidt de nauwkeurigheid aan zoals deze toegepast dient te worden voor de morfologische analyse van verschilkaarten (Hoofdstuk 4). Het is uit de figuur op te maken dat voor de verschilkaart van Najaar 2016 en Voorjaar 2010 ongeveer 50% van de verschillen binnen de nauwkeurigheid van de LiDAR data valt ( $< 7,3$  cm). Voor de verschilkaart van Najaar 2016 – Voorjaar 2016 is het aandeel van de bodemhoogteverschillen dat kleiner is dan  $7,3$  cm ongeveer 90%.

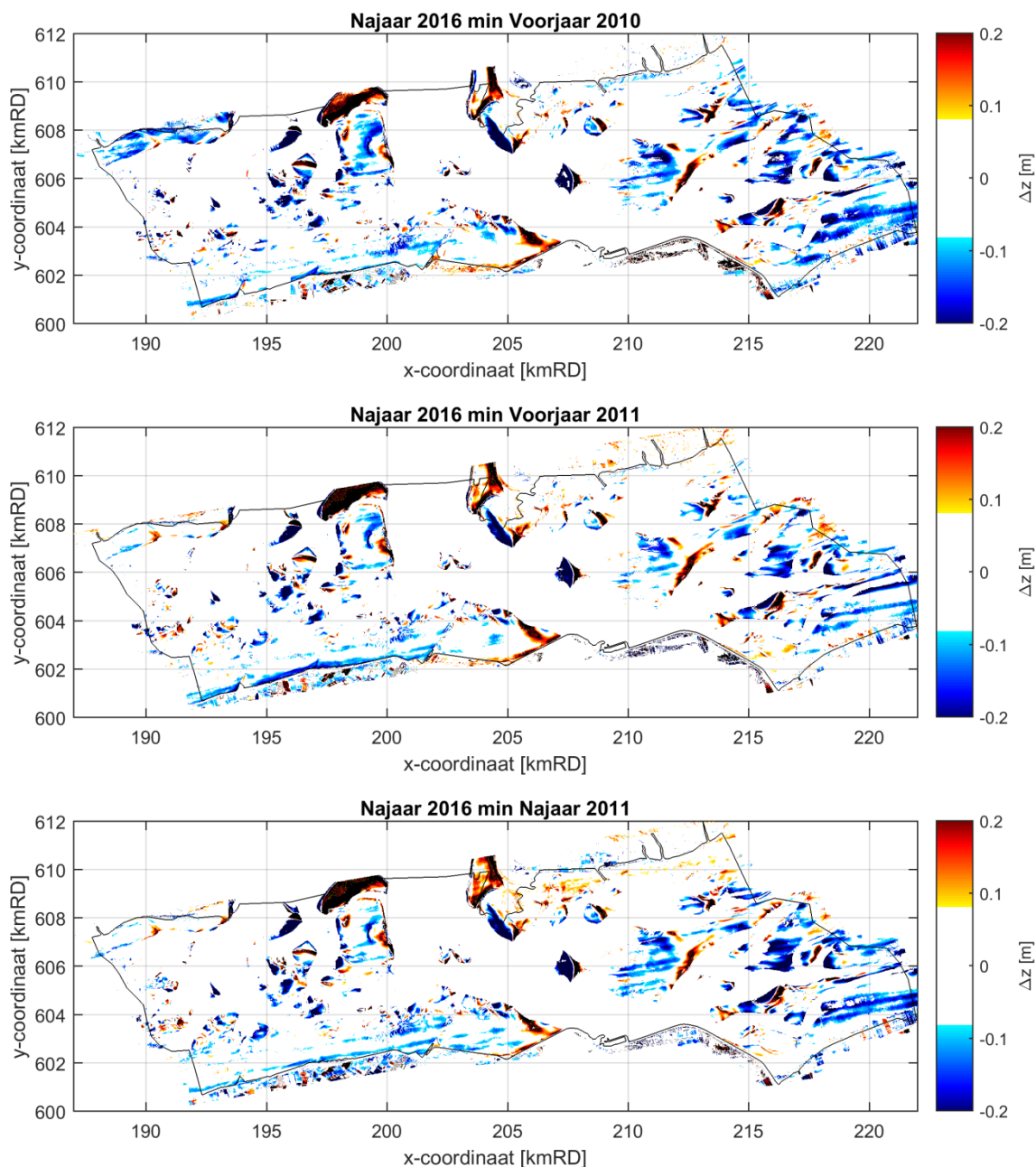


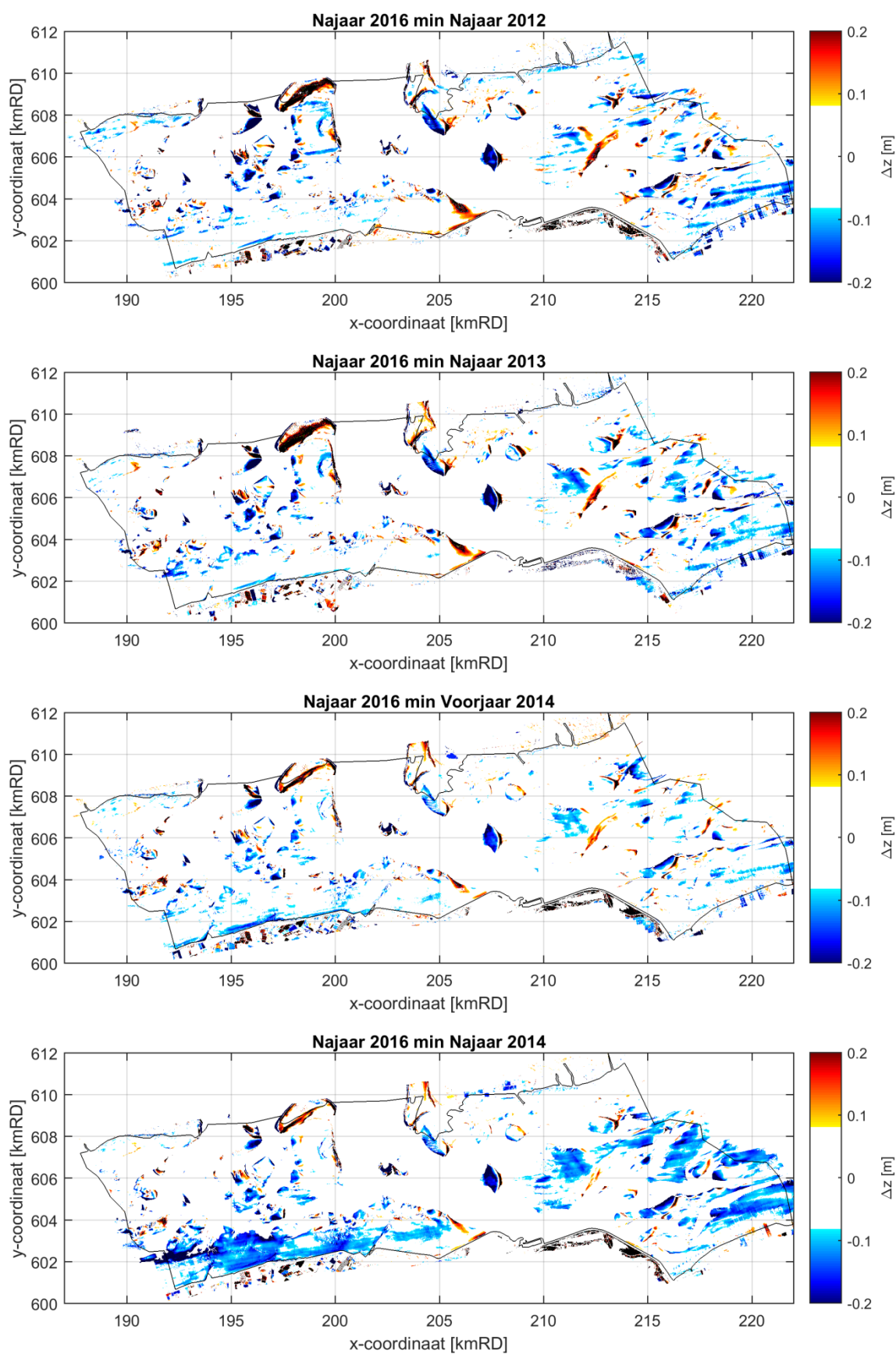
Figuur 5.4 Cumulatieve percentage van de absolute hoogteverandering binnen de polygoon van het Friesche Zeegat [in m]. Verticale rode lijn in de figuur geeft de grootte van de meetfout, zoals beschreven in Hoofdstuk 4.

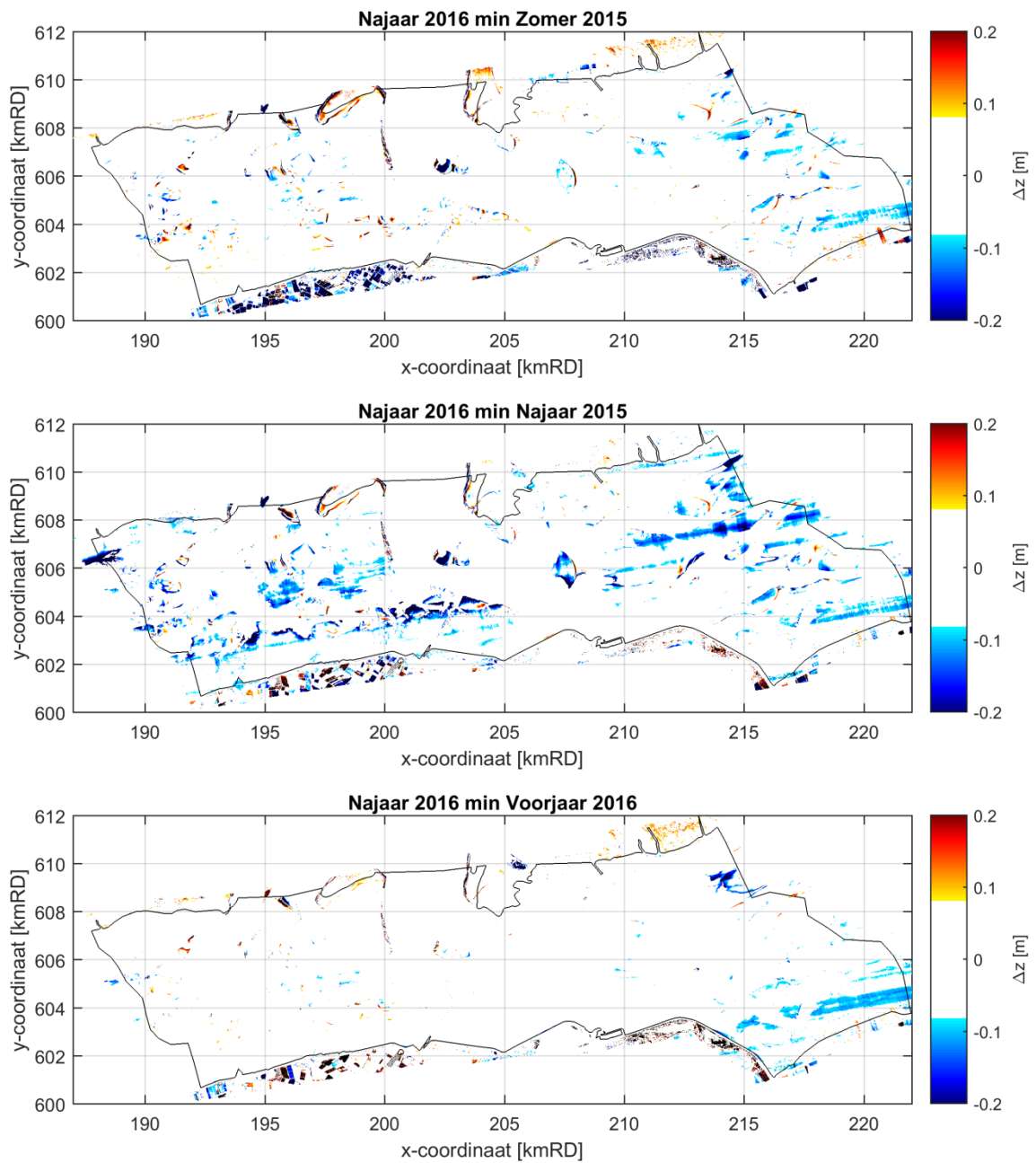
De erosie-sedimentatiekaarten van de meest recente LiDAR opname met alle voorgaande opname kunnen worden weergegeven aan de hand van een kleurenbalk die alleen bodemhoogteverschillen weergeeft die niet binnen de grootte van de nauwkeurigheid van het LiDAR gegevens valt. Deze verschilkaarten tonen alleen de bodemhoogteverschillen die verklaarbaar zouden moeten zijn aan de hand van morfologische veranderingen (Figuur 5.5).

De aangepast erosie-sedimentatiekaarten van de kombergingen laten zien dat er voornamelijk sedimentatie op het Rif (ten noorden van de Engelsmanplaat), aan de zuidwestzijde van het Brakzand en aan de noordoostzijde van de Eilander bult plaatsvindt. De verschilkaarten laten voornamelijk erosie op het centrale gedeelte van de platen zien.

Daarnaast is in deze kaarten ook nog een 'eroderend' gedeelte te zien op de verschilkaarten met de LiDAR opname van najaar 2014 en najaar 2015, dit is het gevolg van de waterspiegel inmeten tijdens deze survey's. De bodemhoogteverschillen die hier door veroorzaakt worden zijn dus groter dan 7,23 cm en zullen ook zichtbaar blijven in de analyses wanneer de verschillen kleiner dan de meetnauwkeurigheid uitgefilterd worden.







Figuur 5.5 Verschilkaarten van alle LiDAR opnamen (april 2010 t/m mei 2016) ten opzichte van de LiDAR opname van najaar 2016 met de kleurenbalk aangepast aan de grootte van de toegepaste meetfout.

## 5.2 Lineaire trendanalyse

In het verleden werd een analyse uitgevoerd van erosie-sedimentatiesnelheden door het tijdsinterval tussen twee LiDAR opnamen mee te nemen in de berekening van de bodemhoogteverschillen. Een nadeel van verschilkaarten is dat de kaarten enkel een verschil tussen twee bodemopnamen weergeven. Trends in de bodemhoogte geven een duidelijker beeld van veranderingen over een specifiek tijdsinterval.

Door een lineaire trend te bepalen aan de hand van alle datasets kan een duidelijker beeld verkregen worden van de trends in de bodemligging. Een voordeel van deze methode is dat alle datasets worden meegenomen in het bepalen van de trend en dat uitschieters een beperkter effect hebben op de berekende trend dan dat deze hebben op verschilkaarten. Een nadeel is dat trends die bepaald zijn aan de hand van enkele datapunten een verkeerd beeld van een trend kunnen geven en dat naarmate wadplaten het GHW niveau bereiken de trend niet lineair zal zijn, een lineaire trend blijft echter toch een goede eerste benadering.

Een lineaire trend analyse is uitgevoerd voor alle LiDAR datasets en weergegeven in Figuur 5.6. De richtingscoëfficiënt geeft in de figuur de bodemhoogteverandering (erosie of sedimentatie) in millimeters per jaar. Alle LiDAR datasets zijn gebruikt om de lineaire trend te bepalen omdat de datasets met aanwijsbare fouten ook correctie informatie leveren voor gedeelten van het Friesche Zeegat. Daarnaast heeft een enkele uitschieter een beperkt effect op de berekende trend.

De  $R^2$ -waarde van de regressie is in de figuur onder de trend weergegeven, deze waarde geeft een indicatie of de lineaire trend een juiste benadering is van de trend in bodemhoogte. De trend geeft niet meteen een indicatie van de betrouwbaarheid van de trend. Wanneer de trend over een beperkt aantal punten is berekend geeft deze namelijk een verkeerde inschatting doordat de  $R^2$ -waarde altijd hoog zal zijn.

De figuren geven aan dat de meest duidelijke signalen in bodemhoogteveranderingen aan de randen van de platen zijn waar te nemen, deze zijn het gevolg van migratie van de geulen en platen. De lineaire trend lijkt op deze locaties ook een juiste benadering van de trend ( $R^2$ ).

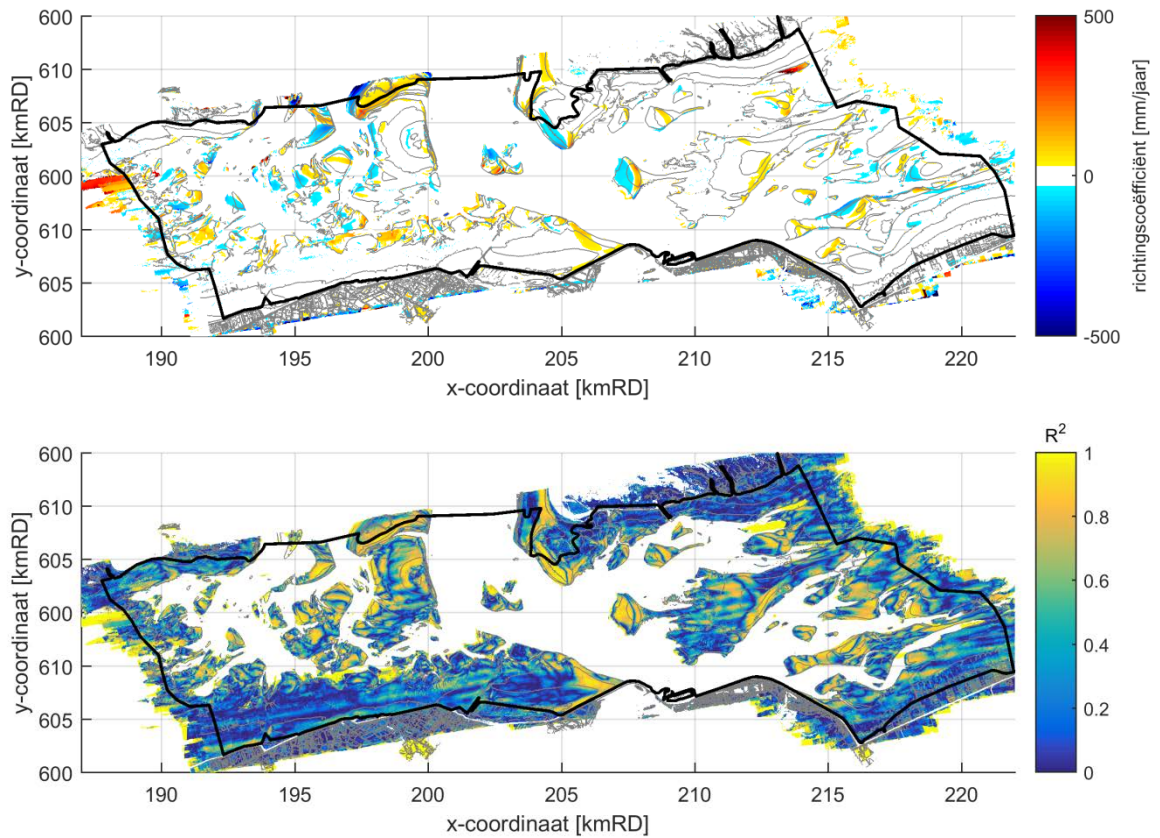
Morfologische veranderingen die duidelijk blijken uit de analyse zijn:

- De migratie van het Roode Hoofd in westelijke richting
- Erosie aan de zuidoostzijde van het Brakzand
- Erosie van de Oude Wal, aan de zuidwestzijde van Schiermonnikoog
- Migratie van Het Rif in zuidelijke richting
- Erosie van de Hoek van de Bant aan de westzijde van de voormalige toegang van het Lauwersmeer

Daarnaast is er een duidelijk patroon van zowel erosie als sedimentatie (dit kan ook migratie zijn) van de wadplaten in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Het gebied dat gekenmerkt wordt door sedimentatie lijkt ongeveer even groot te zijn als de gebieden die gekenmerkt worden door sedimentatie. Aan de hand van de lineaire trend analyse wordt het duidelijk dat er geen structurele trend van erosie over het gehele oppervlak van beide kombergingsgebieden is waar te nemen.

Het sterk sedimenterende gebied aan de westzijde van de polygoon van het Friesche Zeegat is zeer waarschijnlijk het gevolg van een trendberekening over een beperkte dataset. De onderste figuur geeft aan dat een lineaire trend een goede benadering is hier, de oorzaak hiervan is waarschijnlijk dat de trend over twee datapunten berekend wordt.





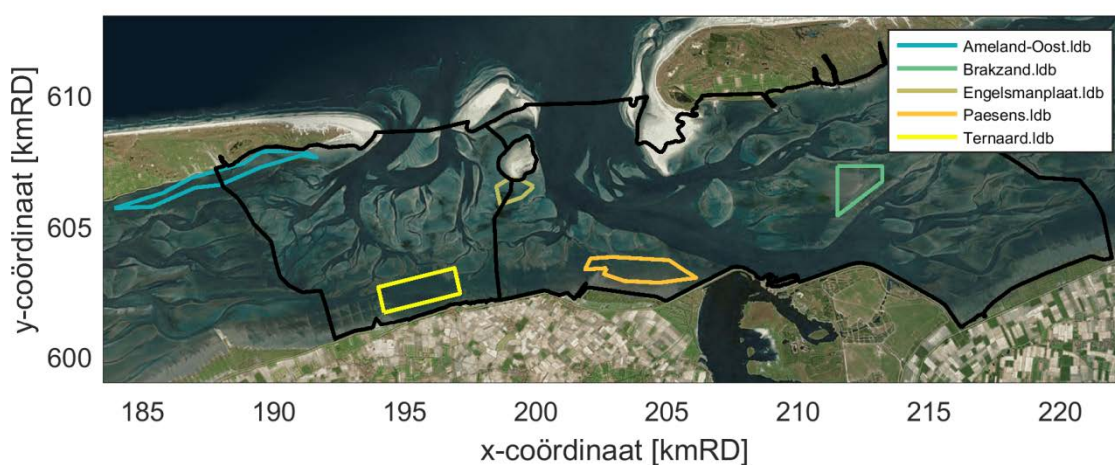
Figuur 5.6 Boven: Erosie-sedimentatietrends bepaald aan de hand van lineaire trend analyse waarbij de contourlijnen zijn weergegeven van de meest recente LiDAR opname op -0,5; 0; 0,5 en 1 m NAP. De richtingscoëfficiënt geeft de bodemhoogteverandering in mm/jaar. Onder: Determinatiecoëfficiënt van de regressie ( $R^2$ , onder)



## 6 Analyse per deelgebied

Het areaal droogvallend wad dat ingemeten is met iedere LiDAR survey wordt inzichtelijk gemaakt aan de hand van hypsometrische curven en histogrammen waarbij het areaal per gediscretiseerde bodemhoogteklasse wordt weergegeven. De arealen worden berekend over een specifiek gebied dat wordt aangegeven door middel van polygoon (Figuur 6.1). De polygoon van de kleinere deelgebieden zijn gedefinieerd in Vroom en Beekhuizen (2015). Het oppervlak dat wordt omsloten door de polygoon is berekend en weergegeven in Tabel 6.1.

De hypsometrische curven geven voor iedere bodemhoogte aan hoe groot het totale oppervlak is dat kleiner is dan deze waarde en de histogrammen geven het totale oppervlakte dat zich binnen een specifiek hoogteinterval bevindt. Het oppervlakte van de curven begint niet altijd bij 0 m<sup>2</sup>, dit komt doordat een gedeelte van het polygoon bestaat uit geulen, waarvoor de data uitgefilterd is. Het polygoon Ameland-Oost valt gedeeltelijk buiten het polygoon van het Friesche Zeegat. Als gevolg hier van is er voor een gedeelte van het polygoon dus geen data beschikbaar maar dit heeft geen effect op de berekening van de hypsometrische curven en histogrammen.



Figuur 6.1 Polygoon waarover de hypsometrische curven worden berekend: Pinkegat en Zoutkamperlaag (zwart) en de vijf deelgebieden gedefinieerd in Vroom en Beekhuizen (2015).

Tabel 6.1 Oppervlakte van de gebruikte polygoon

Polygoon	Oppervlakte (m <sup>2</sup> )	Oppervlakte (km <sup>2</sup> )
Friesche Zeegat	210974307,74	210,97
Pinkegat	61340491,29	61,34
Zoutkamperlaag	147965525,56	147,97
Ameland-Oost	2814306,98	2,81
Brakzand	2125000,00	2,13
Engelsmanplaat	868022,50	0,87
Paesens	2751383,13	2,75
Ternaard	2997300,00	3,00

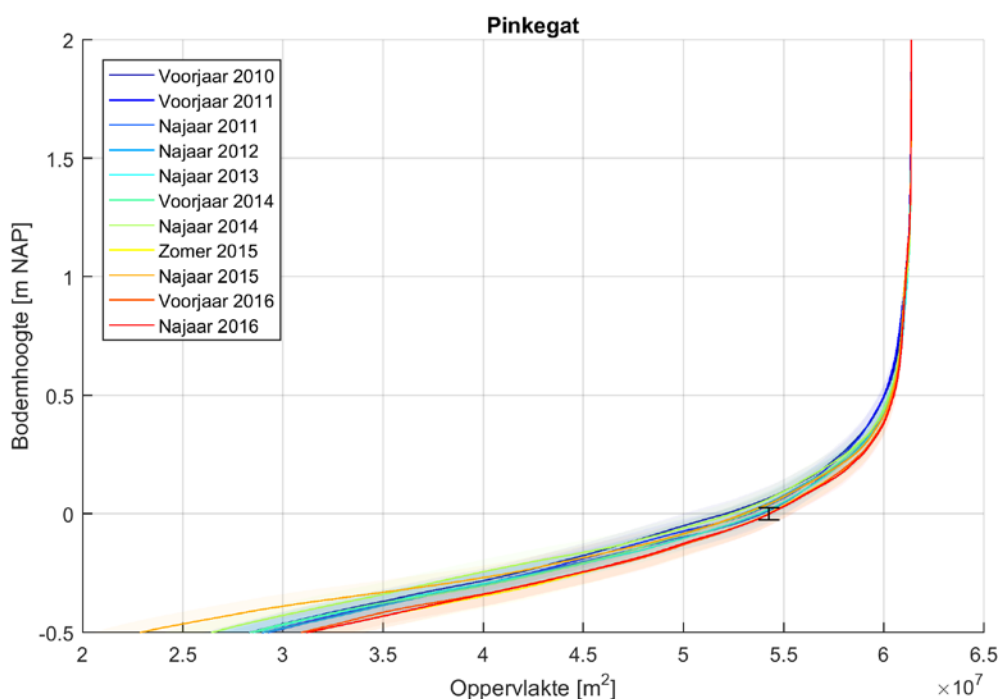
## 6.1 Analyse kombergingsgebieden

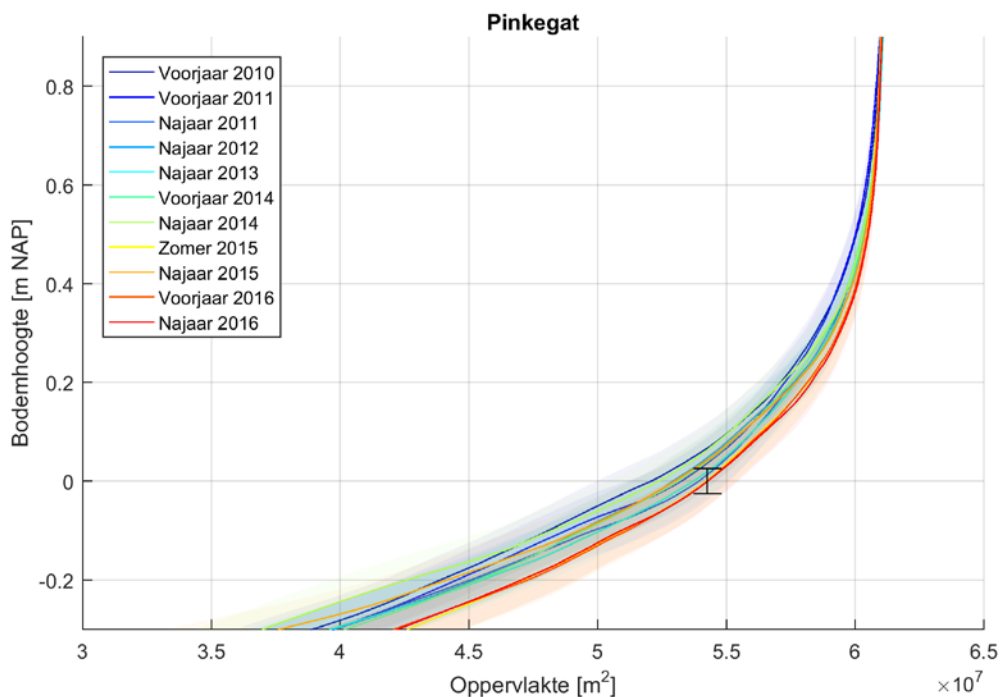
De hypsometrische curven en histogrammen van de bodemhoogte voor het Pinkegat zijn weergegeven in Figuur 6.2 en Figuur 6.3.

Het valt op dat de hypsometrische curve voor het voorjaar van 2010 een duidelijk hogere bodemligging aanduidt dan de overige curven (wanneer najaar 2014 en najaar 2015 genegeerd worden). De bodemkaart van deze LiDAR opname dekt een kleiner oppervlak dan de recentere opnamen (Tabel 3.1) en daardoor is een groter oppervlak opgevuld door middel van interpolatie. Een gevolg van de interpolatieslag is dat cellen een hoge bodemligging toegekend kunnen krijgen. Een goede vergelijking kan dus alleen plaatsvinden tussen de LiDAR opnamen vanaf najaar 2013 omdat het gebied dat opgevuld is door middel van interpolatie niet heel veel verschilt.

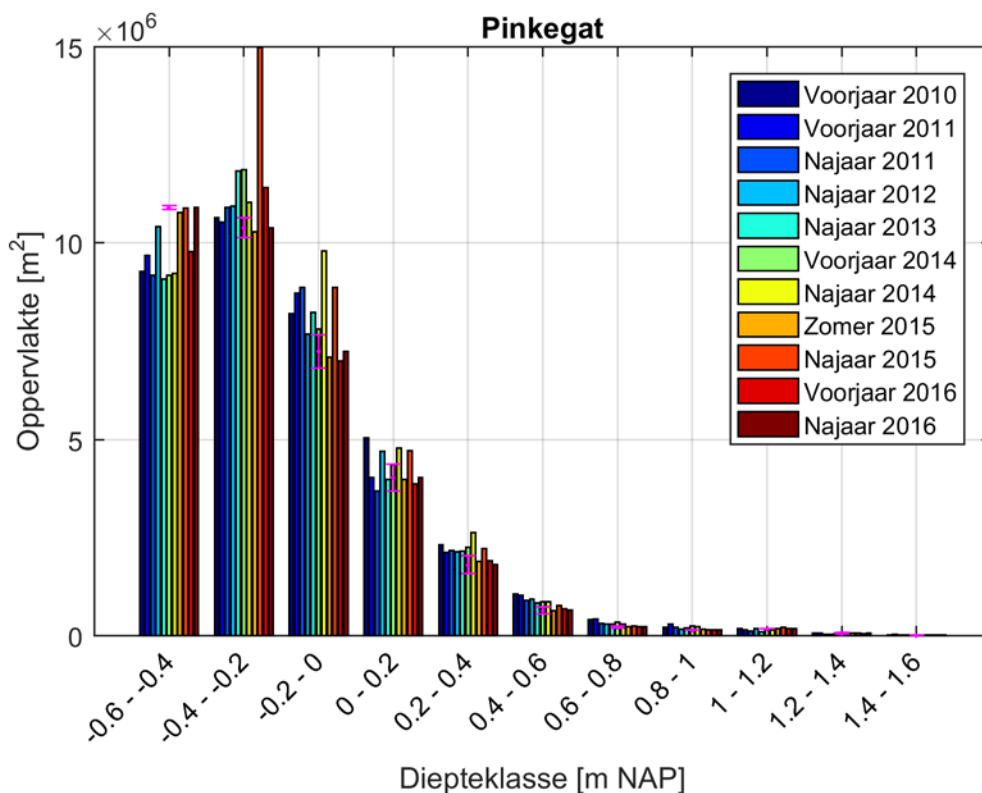
De curve van de opname van najaar 2015 toont een duidelijke afwijking doordat deze boven de overige curven ligt. De oorzaak van deze verschuiving is het inmeten van de waterspiegel (zie ook Figuur 3.7). In de histogrammen is de uitschieter nog duidelijker zichtbaar door het grotere oppervlak voor iedere hoogteklaas.

De hypsometrische curven van zomer 2015, voorjaar 2016 en najaar 2016 vallen geheel onder de curven van voorgaande jaren, ook vergeleken met curven die eenzelfde geïnterpoleerd oppervlak bevatten. De lagere ligging van de curven betekent dat het areaal droogvallend wad binnen het kombergingsgebied is afgenomen sinds de start van de monitoringscampagne. Echter, de mogelijk foutieve GCP-correctie van de LiDAR opname van voorjaar 2016 kan hier een rol spelen. In Hoofdstuk 5.1 is aangetoond dat tijdens de verwerking van deze LiDAR opname er waarschijnlijk een kanteling van de gegevens heeft plaatsgevonden of een dussdanige manier dat het westelijke gedeelte van het Friesche Zeegat lager is komen te liggen en het oostelijke gedeelte hoger. Voor de LiDAR opname van najaar 2016 zijn er momenteel geen aanwijsbare kenmerken dat de correctie niet goed is uitgevoerd.



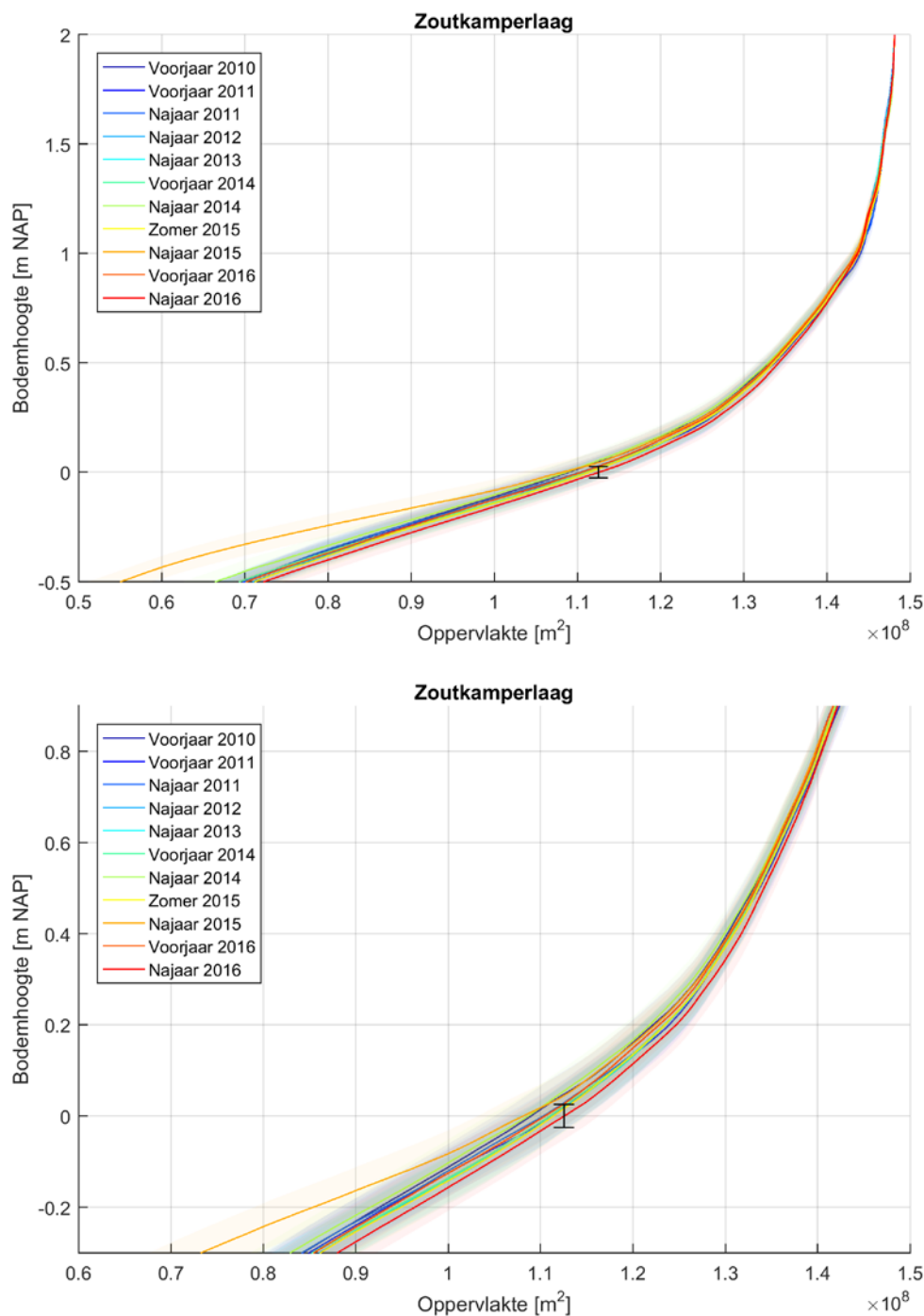


Figuur 6.2 Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Pinkegat voor alle LiDAR opnamen voor het gehele hoogtebereik van de verwerkte metingen (boven) en ingezoomd (onder). Foutmarge van iedere curve is aangegeven door middel van de arcering.

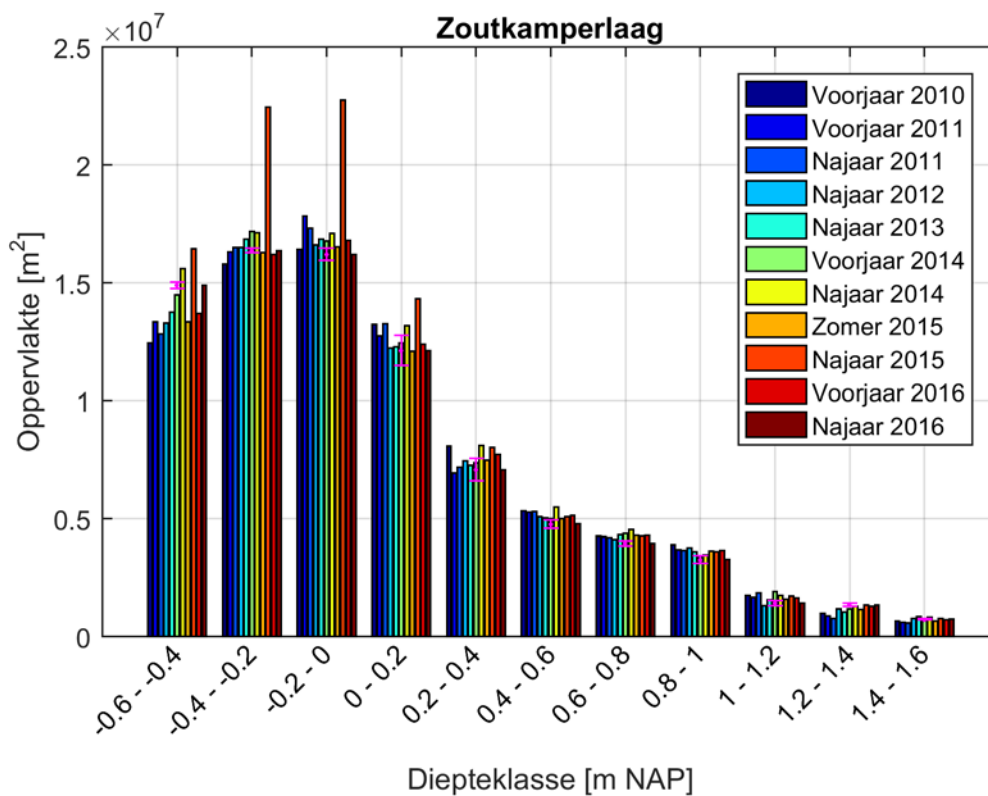


Figuur 6.3 Histogram van de oppervlakte per diepteklasse voor het kombergingsgebied Pinkegat. De paarse foutenbalk geeft de nauwkeurigheid voor de LiDAR opname van het najaar van 2016 aan.

De hypsometrische curven en histogrammen van de het kombergingsgebied Zoutkamperlaag tonen zeer kleine verschillen. Aangezien deze verschillen kleiner zijn dan de nauwkeurigheid van de LiDAR meetgegevens zoals deze toegepast dient te worden voor de morfologische analyse (Hoofdstuk 2), is er geen conclusie te trekken over de verandering binnen dit kombergingsgebied.



Figuur 6.4 Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag voor alle LiDAR opnamen voor het gehele hoogtebereik van de verwerkte metingen (boven) en ingezoomd (onder). Foutmarge van iedere curve is aangegeven door middel van de arcering.



Figuur 6.5 Histogram van de oppervlakte per diepteklasse voor het kombergingsgebied Pinkegat. De parse foutenbalk geeft de fout voor de LiDAR opname van het najaar van 2016 aan.

## 6.2 Analyse deelgebieden

De hypsometrische curven en histogrammen van de bodemhoogteklassen van alle deelgebieden zijn weergegeven in Figuur 6.6 tot en met Figuur 6.10. De resultaten worden hieronder per deelgebied 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 najaar 2015 (in dit gebied was deze dataset wel correct). Aan de hand van de histogrammen is het duidelijk dat er veranderingen zijn waar te nemen tussen de verschillende LiDAR opnamen maar een systematische verandering per hoogteklaas is niet te onderscheiden.

### Deelgebied Ternaard

De hypsometrische curven van de survey's van voorjaar 2016 en najaar 2016 vallen boven de curve van de opname van zomer 2015. Dit kan aan de histogrammen opgemerkt worden doordat er van zomer 2015 naar de nieuwe survey's (najaar 2015 genegeerd) een kleine afname is van het areaal binnen de lage hoogteklassen (-0,6 – -0,4 en -0,4 – -0,2) en een kleine toename binnen de hoge hoogteklassen (-0,2 – 0 en 0 – 0,2). Het kan dus gesteld worden dat de bodem van zomer 2015 uitzonderlijk laag was in de meetgegevens, en als een uitschieter beschouwd worden. De mogelijke foutieve GCP-correctie kan de oorzaak zijn van de lage bodemligging.

### Deelgebied Engelsmanplaat

De hypsometrische curven van de Engelsmanplaat laat een duidelijke trendmatige verlaging van de gehele curve zien. Dit is ook te zien in de histogrammen waar een toenemende trend zit in de hoogteklassen -0,4 – -0,2 en -0,2 – 0; een gelijkblijvende trend in de hoogteklaas 0 – 0,2 en een afnemende trend in de hoogteklaas 0,2 – 0,4 en 0,4 – 0,6. 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 Zoutkamperlaag veroorzaakt door de afsluiting van Lauwerszee (Wang, 2007). De curven en histogrammen 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

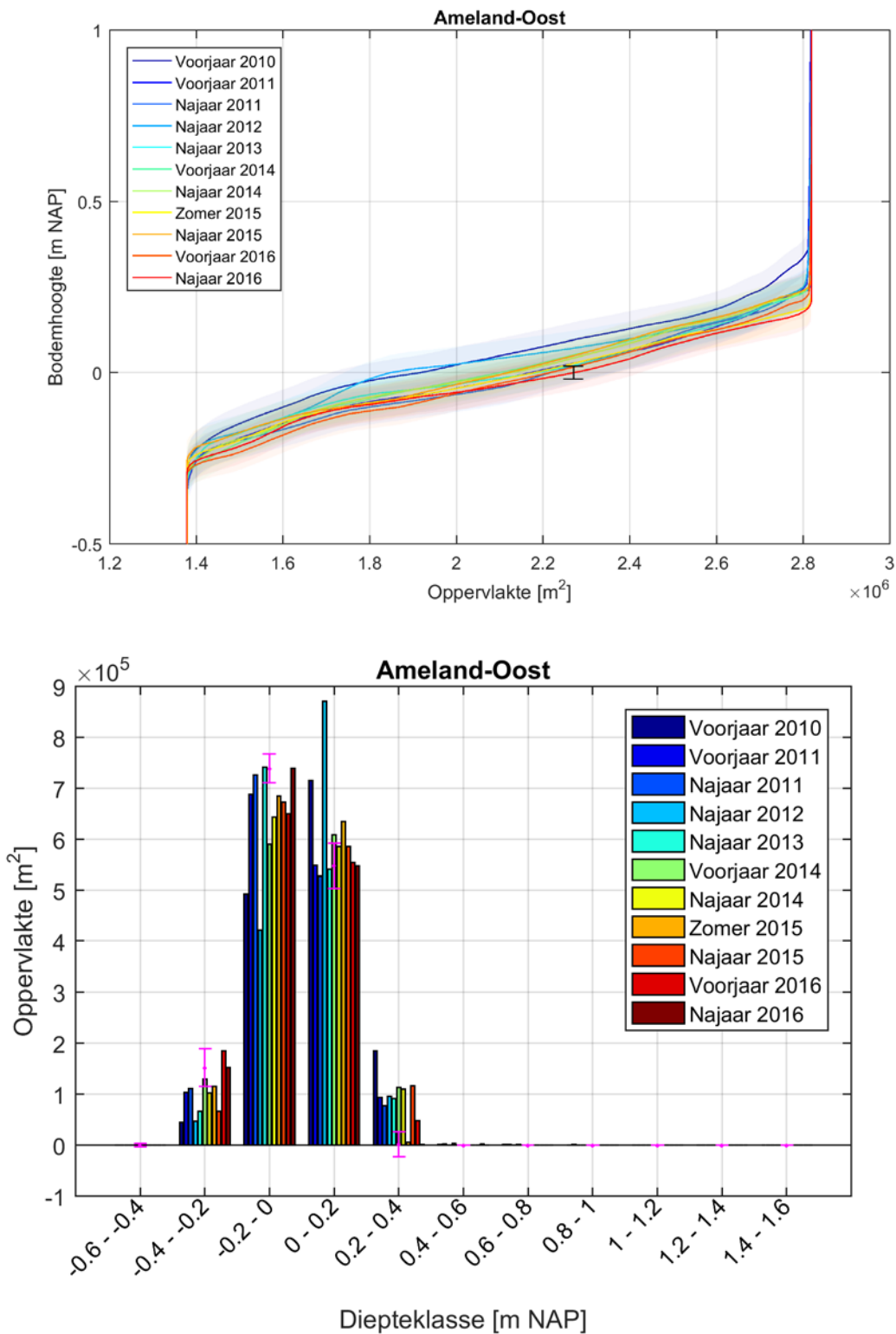
De curven en histogrammen van het deelgebied Paesens tonen geen duidelijke eenduidige trend tussen de verschillende LiDAR opnamen. Aan de hand van de LiDAR gegevens kan dus niet bepaald worden of het areaal droogvallend wad binnen de polygoon Paesens veranderd is als gevolg van morfologische veranderingen.

### Deelgebied Brakzand

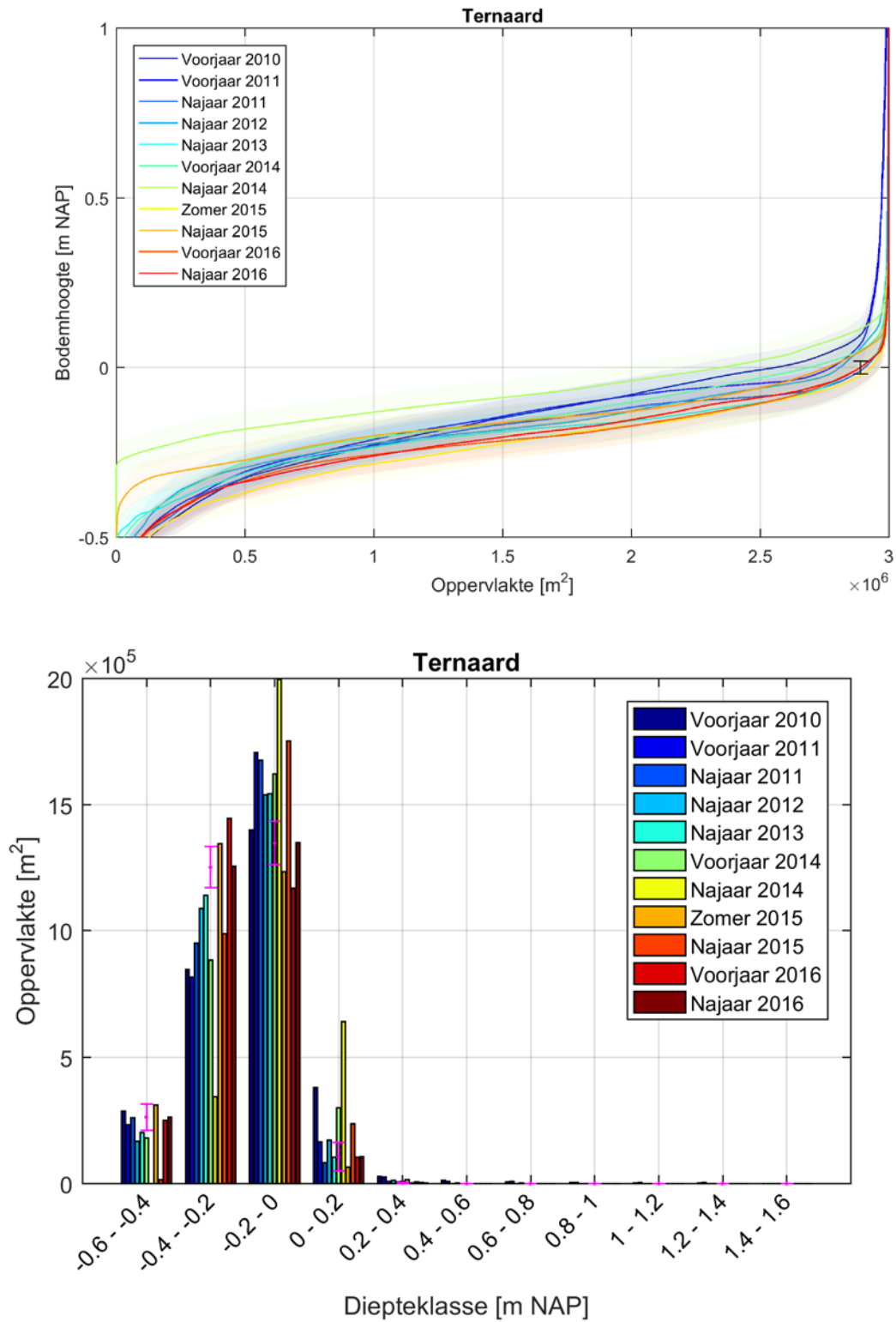
De hypsometrische curven van het Brakzand lijken enige vorm van systematiek aan te duiden. Het areaal onder 0,4 m NAP neemt toe door de jaren. Het areaal boven de 0,4 m NAP lijkt af te nemen, hoewel deze trend minder duidelijk is. Dit komt overeen met de observaties van de erosie-sedimentatiekaarten waar er sedimentatie aan de zuidoostelijke plaatrand plaatsvindt en erosie op de plaat zelf. Wanneer de hoogteklassen binnen het hoogtebereik 0,2 t/m 0,8 beschouwd worden van de histogrammen is deze zelfde trend waarneembaar.



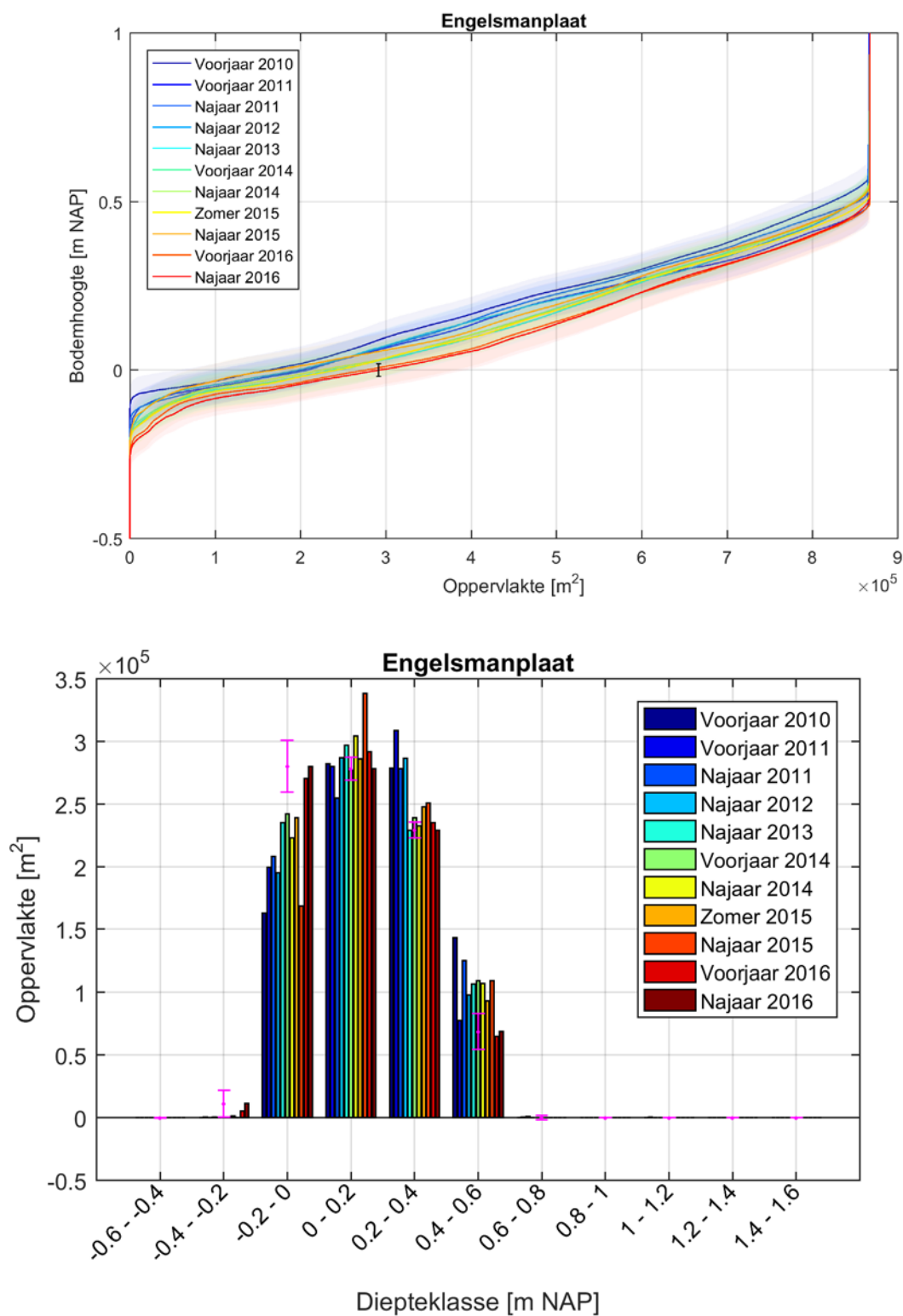
In Hoofdstuk 4 is agetoond dat LiDAR data op de lagere gedeelte van de wadplaten minder nauwkeurig de werkelijke bodemhoogte weergeeft dan op de hogere gedeelten van de wadplaten. Voor de analyses van de deelgebieden betekent dit dat de LiDAR data voor de deelgebieden Engelsmanplaat, Paesens en Brakzand met grotere betrouwbaarheid bekeken kunen worden dat de lagere gebieden (Ameland-Oost en Ternaard).



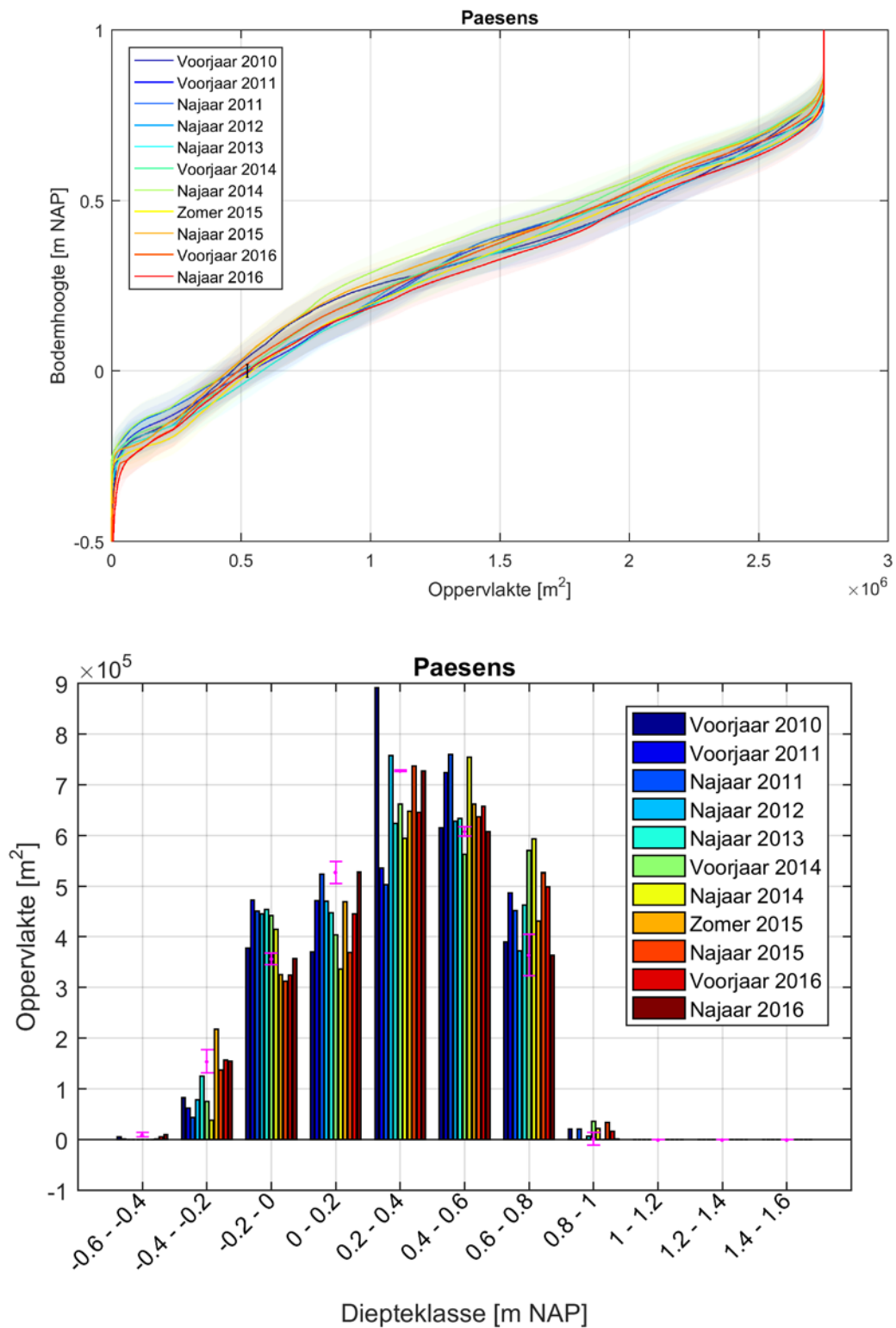
Figuur 6.6 Hypsometrische curve en histogram voor het deelgebied Ameland-Oost. Foutmarge van de curven is aangegeven door middel van de arcering.



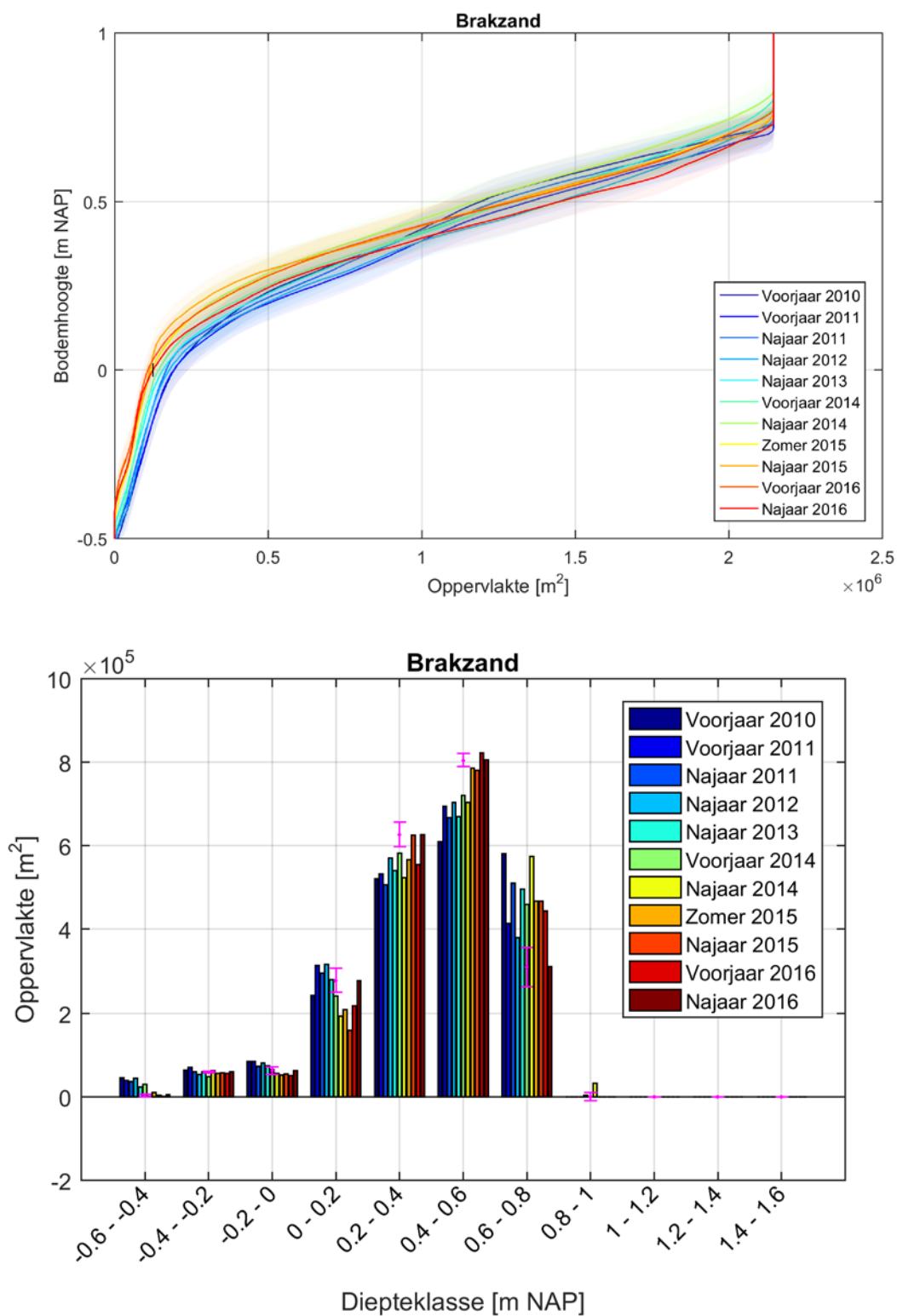
Figuur 6.7 Hypsometrische curve en histogram voor het deelgebied Ternaard. Foutmarge van de curven is aangegeven door middel van de arcering.



Figuur 6.8 Hypsometrische curve en histogram voor het deelgebied Engelsmanplaat. Foutmarge van de curven is aangegeven door middel van de arcering.



Figuur 6.9 Hypsometrische curve en histogram voor het deelgebied Paesens. Foutmarge van de curven is aangegeven door middel van de arcering.



Figuur 6.10 Hypsometrische curve en histogram voor het deelgebied Brakzand. Foutmarge van de curven is aangegeven door middel van de arcering.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

### 7.1 Conclusies

LiDAR meetgegevens van de wadplaten in het Friesche Zeegat worden sinds 2010 verzameld. In het najaar van 2015 en het voorjaar en najaar van 2016 zijn er drie nieuwe LiDAR vluchten uitgevoerd. Met deze gegevens zijn er in totaal 11 LiDAR opnamen van het Friesche Zeegat, in deze rapportage zijn deze vergeleken ten opzichte van elkaar om vast te stellen of er trends in verandering van het areaal droogvallend wad waar te nemen zijn die gerelateerd kunnen worden aan bodemdaling als gevolg van de gaswinning.

De conclusies die getrokken kunnen worden aan de hand van de uitgevoerde analyse zijn:

- Een groot gedeelte van de bodemhoogteveranderingen valt binnen de grootte van de nauwkeurigheid van de LiDAR data. Ondanks dat de periode van de meetgegevens steeds langer wordt en de nauwkeurigheid van de LiDAR data gelijk blijft kunnen de veranderingen nog niet verklaard worden in termen van morfologische ontwikkeling. Uitzondering hierop zijn de duidelijk zichtbare bodemveranderingen die gekoppeld kunnen worden aan geul- en wadplaatmigratie.
- De hypsometrische curven van de recente LiDAR opnamen (zomer 2015, voorjaar 2016, najaar 2016) voor het kombergingsgebied Pinkegat liggen beduidend lager dan de curven van voorgaande jaren. De lagere ligging kan betekenen dat het areaal droogvallend wad is afgenomen. Echter, een gedeelte van de recente meetgegevens bevat opvallende fouten in de datasets. Het is op het moment niet duidelijk wat de precieze oorzaak is van deze fouten, nader onderzoek naar de verwerking van de datasets zou dit aan moeten tonen.
- Het deelgebied Engelsmanplaat toont een duidelijke trend in verlaging van het oppervlak van het wad. De oorzaak van deze afname kan verklaard worden door het cyclisch gedrag van het morfologische systeem bestaande uit het Rif en de Engelsmanplaat. Daarnaast is de zandhonger van de geulen versterkt door het afsluiten van de Lauwerszee.
- De kwaliteit van de LiDAR gegevens wordt sterk beïnvloedt door de heersende weerscondities. Het is belangrijk een goede dataset te verzamelen in een zo kort mogelijke tijd, zodat het verschil in bodemhoogte als gevolg van morfologische veranderingen uitgesloten kan worden. Een LiDAR survey in het voorjaar biedt betere kansen op het verkrijgen van een goede dataset ten opzichte van een survey in het najaar omdat het weer over het algemeen stabiel is en de kans op een heldere hemel met een lage luchtvochtigheid en weinig bewolking groter is.
- Er is geen significant verschil op te merken in de afwijking (fout) tussen verschilpunten van aangrenzende vliegbanen die in dezelfde richting gevlogen zijn ten opzichte van banen die in tegengestelde richting gevlogen zijn. De analyse toont wel aan dat de weerscondities tijdens moment van opname van sterke invloed op de kwaliteit van de LiDAR data zijn en dat het lage gedeelte van de wadplaten veel minder nauwkeurig ingemeten kan worden dan het hogere deel van de wadplaten. De reden hiervoor is de grotere temporele variabiliteit van het water op de lagere gedeeltes ten opzichte van de hogere gedeeltes van de wadplaten.
- Het is mogelijk om een classificatie van water en wad uit te voeren op basis van de Near Infrared (NIR) band van multispectrale beelden. Deze band geeft namelijk het duidelijkste onderscheid tussen water en land. De classificatie toepassen op de morfologische analyse is echter niet direct te implementeren omdat de analyse de

verschillen tussen de beschikbare LiDAR datasets beschouwd en omdat er in voorgaande survey's geen multispectrale beelden zijn opgenomen.

- De vergelijking van LiDAR data met andere meettechnieken toont aan dat de nauwkeurigheid van de aggregeerde kaartbeelden tussen de 5-10 cm ligt voor droog wadoppervlak.

## 7.2 Aanbevelingen

- De oorzaak van de 'omkanteling' van de LiDAR opname van Voorjaar 2016 (en mogelijk ook Zomer 2015) moet onderzocht worden. Indien deze omkanteling veroorzaakt wordt door de verwerking dienen de datasets opnieuw verwerkt te worden.
- De LiDAR opnamen van najaar 2015 en voor- en najaar 2016 zijn door Deltares omgezet van LAS-punten naar een regelmatig rooster van 1x1 m door punten binnen een cel te middelen. Om eventuele verschillen in voorbewerking van de verschillende datasets uit te kunnen sluiten zouden alle datasets opnieuw geaggregeerd moeten worden. Een robuustere waarde kan dan verkregen worden door niet het gemiddelde maar de mediaan van de punten aan een cel toe te kennen. Verschillen in de correctie van de vliegbanen ten opzichte van elkaar en GCP-correcties van het gecombineerde kaartbeeld zullen echter blijven bestaan.
- Om meer kans te hebben op een LiDAR dataset van goede kwaliteit zou een LiDAR vlucht alleen uitgevoerd moeten worden wanneer er heldere en stabiele weerscondities zijn. In het voorjaar is de kans op goed weer groter.

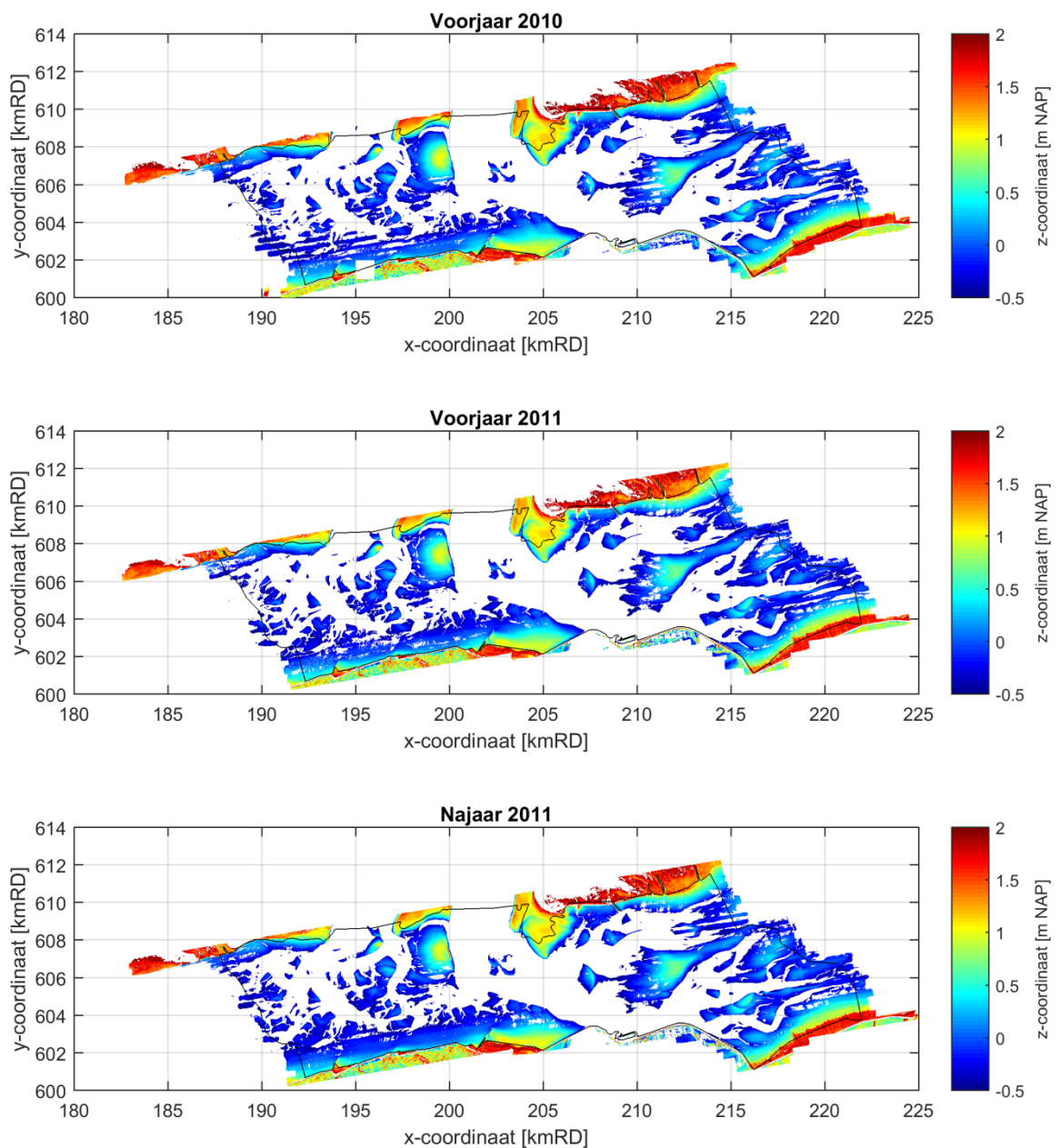


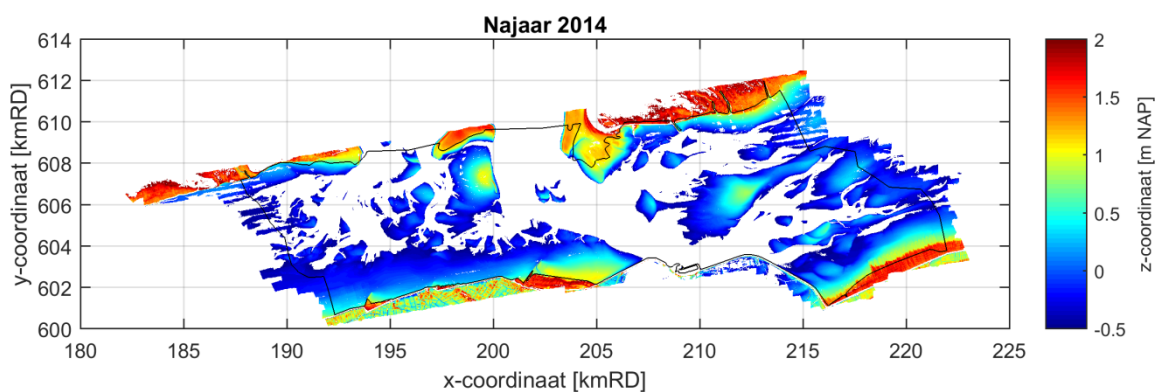
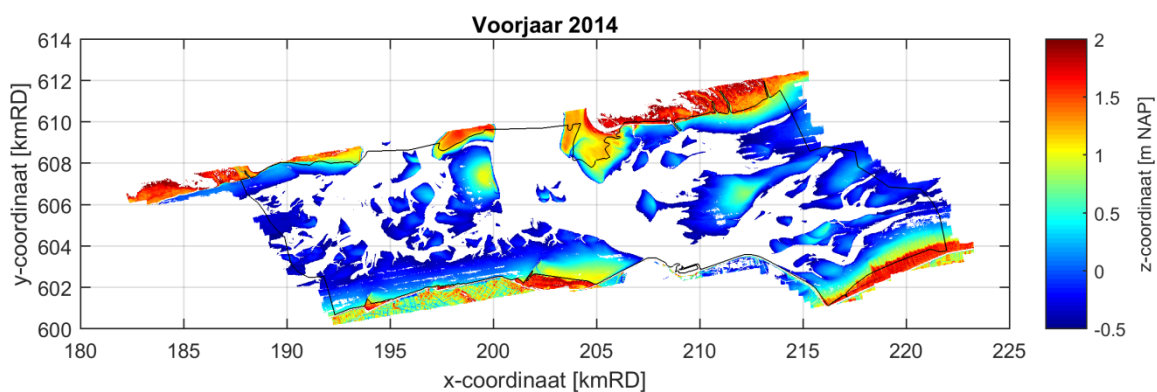
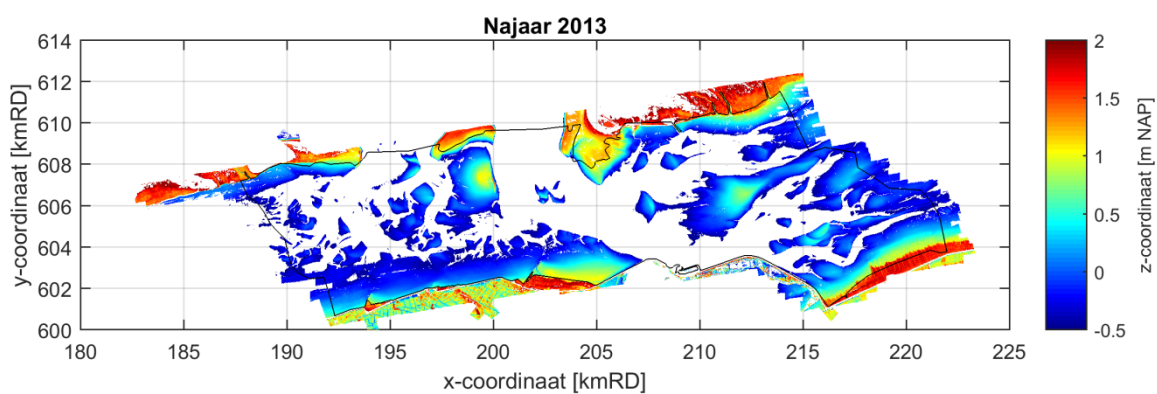
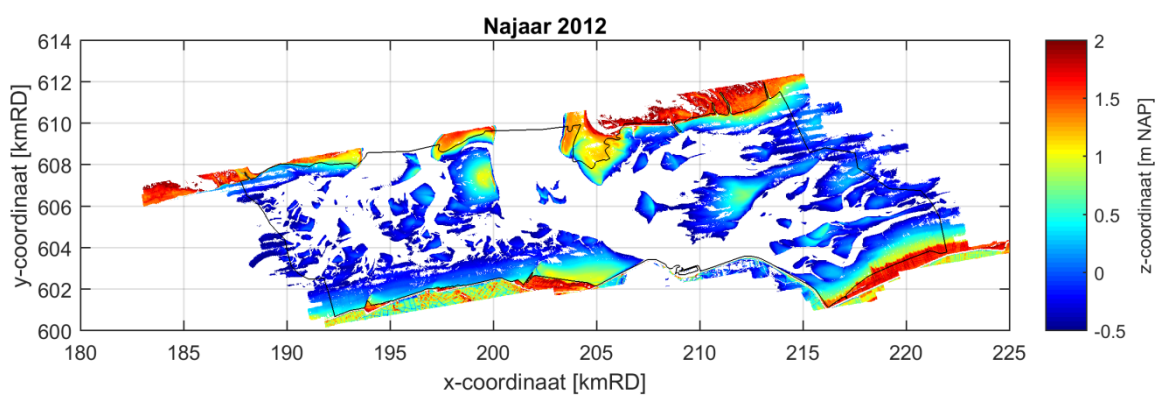
## 8 Referenties

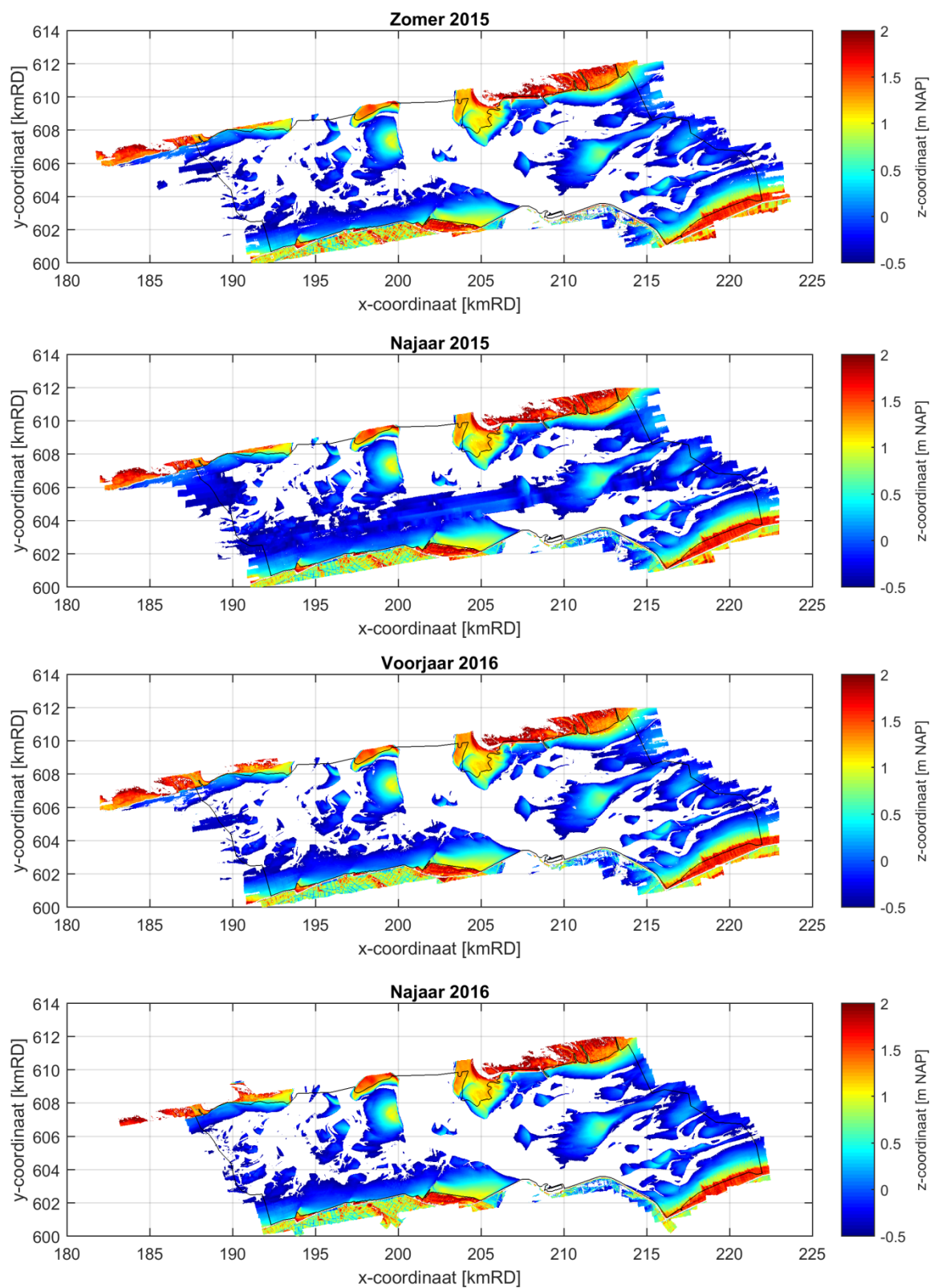
- Aerodata, 2016. QUALITY REPORT W ADDENZEE. Rapport QN16-0156/JLE.
- Arentz, L. & Vroom, J., 2014. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2013): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1209136-000.
- Baltsavias, E.P., 1999a. Airborne laser scanning systems: existing systems and firms and other resources. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2–3), 164–198.
- Baltsavias, E.P., 1999b. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54 (2–3), 199–214.
- Brzank, A., Heipke, C., Goepfert, J., Soergel, U. 2008. Aspects of generating precise digital terrain models in the Wadden Sea from lidar – water classification and structure line extraction. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 63 (2008) 510-528.
- Cronin, K. & Wang, Z.B., 2012. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat. Rapport 1204654-000.
- Davenport, I.J., Holden, N., Gurney, R.J., 2004. Characterising errors in airborne laser altimetry data to extract soil roughness. *IEEE Transactions on GeoScience and Remote Sensing* 42 (10), 2130–2141.
- Donchyts, G., Schellekens, J., Winsemius, H., Eisemann, E. & van de Giesen, N. (2016). 30 m Resolution Surface Water Mask Including Estimation of Positional and Thematic Differences Using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: A Case Study in the Murray-Darling Basin, Australia. *Remote Sensing*, 8(5), 386.
- Elias, E., Bing Wang, Z. & 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. Rapport WVI/16.016.
- Eurosense, 2016b. Report Lidar Survey Waddenzee Autumn survey 2015. Rapport WVI/16.016.
- Eurosense, 2016c. Report Lidar Survey Waddenzee Spring survey 2016. Rapport WVI/16.048.
- Fugro Geospatial B.V., 2015. Waddenzee LiDAR Survey July 2015.
- 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.
- Mason, D.C., Scott, T.R., Wang, H., 2006. Extraction of tidal channel networks from airborne

- scanning laser altimetry. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 61 (2), 67-83.
- McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.*, 17, 1425–1432.
- Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., 2014. Gaswinning vanaf de locaties Moddergat , Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2014.
- Otsu, N. (1979). A threshold selectionmethod from gray-level histograms. *IEEE Trans. Syst.Man. Cybernet.* 9: 62–66.
- Piening, H., 2014. Memo Lidar nauwkeurigheid. , (april), pp.1–2.
- Ryu, J.-H., Won, J.S. & Min, K.D. (2002). Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat. A case study in Gomso Bay, Korea. *Remote Sensing of Environment*, 83, 442–456.
- Schrijvershof, R., 2016. Meetfout van de LiDAR gegevens van het Friesche Zeegat. Memo 1221249-000.
- Schrijvershof, R. & Vroom, J., 2016. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2015). 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., Cronin, K. & Ormondt, M., 2010. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat. Rapport 1202285-000.
- Wang, Z.B., 2007, Morfologische ontwikkeling van het Rif en de Engelsmanplaat, Analyse naar de mogelijke invloed van bodemdaling, WL | Delft Hydraulics, Rapport Z3973.

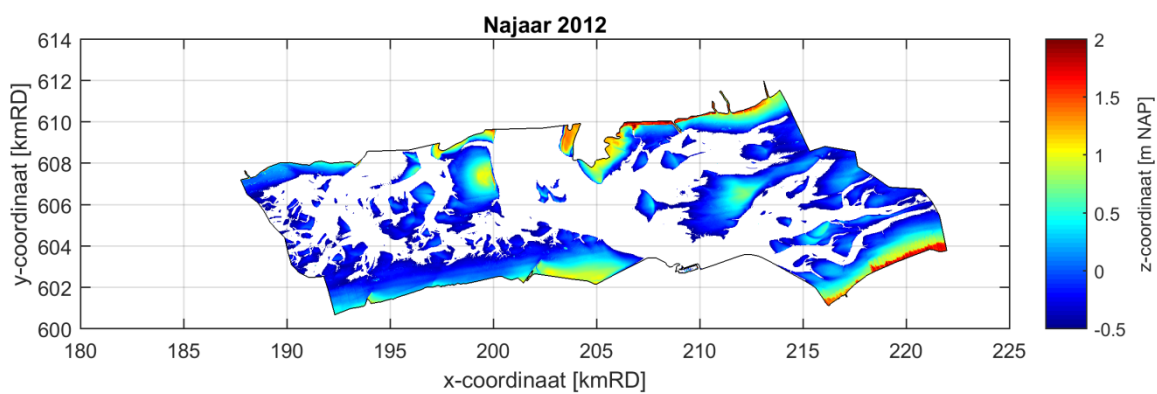
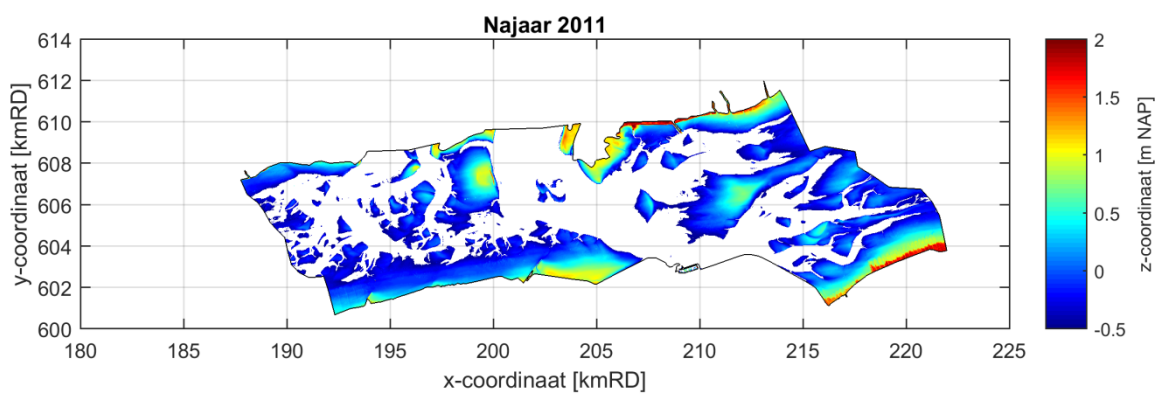
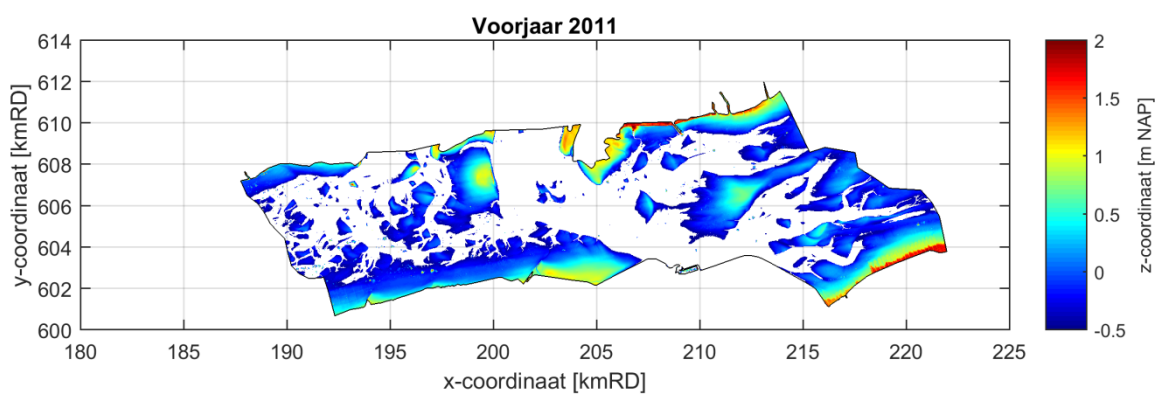
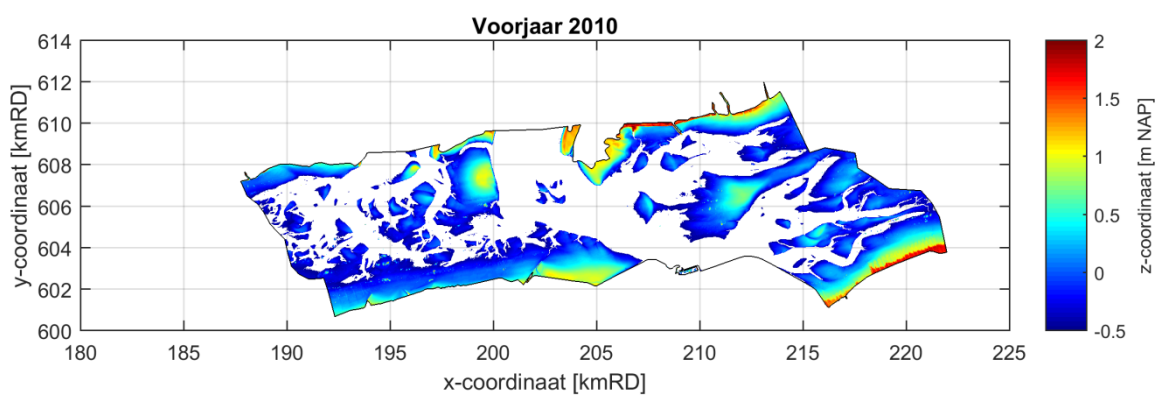
## A Appendix A; Bodemkaarten met uitgefilterde waterspiegel

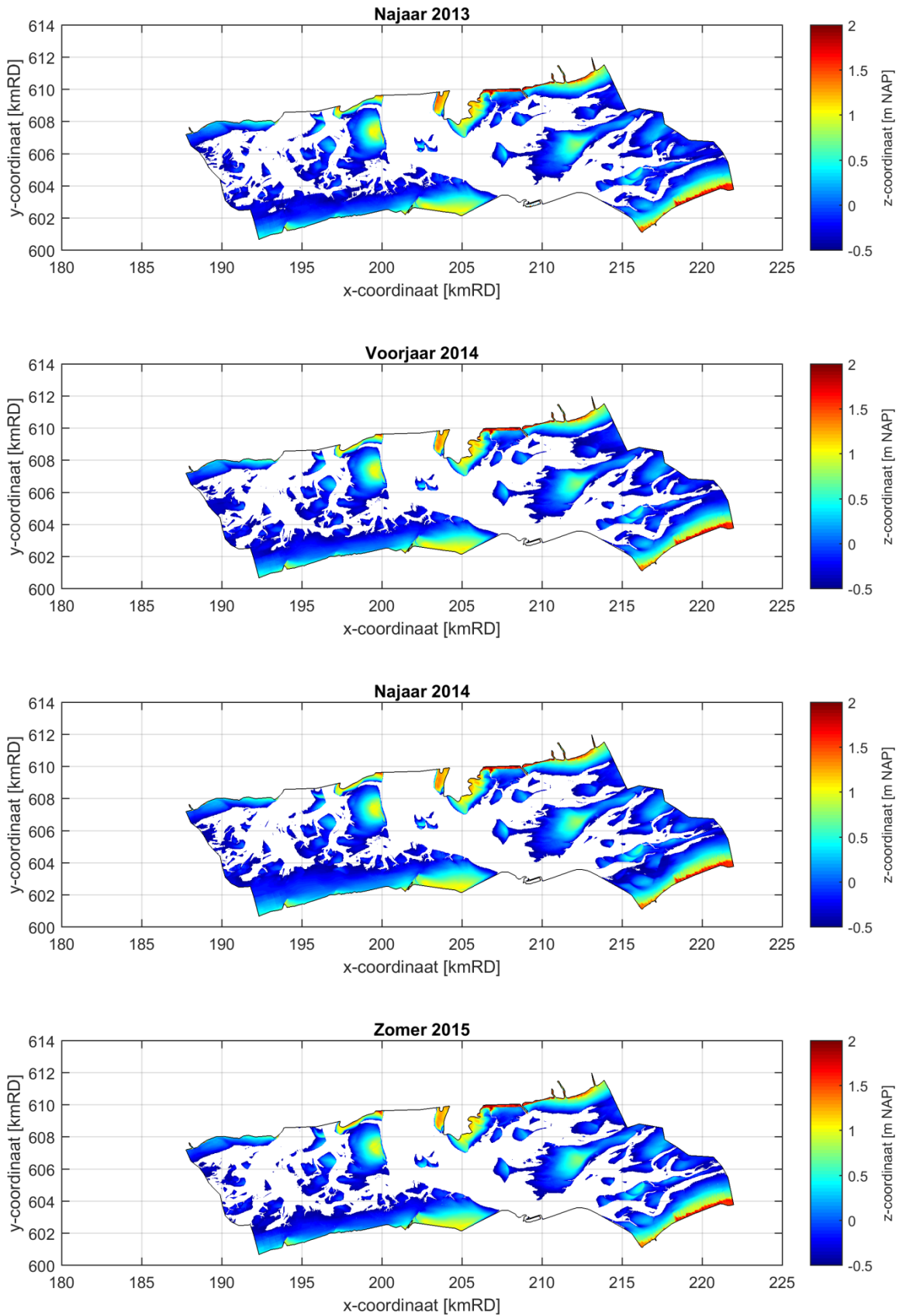


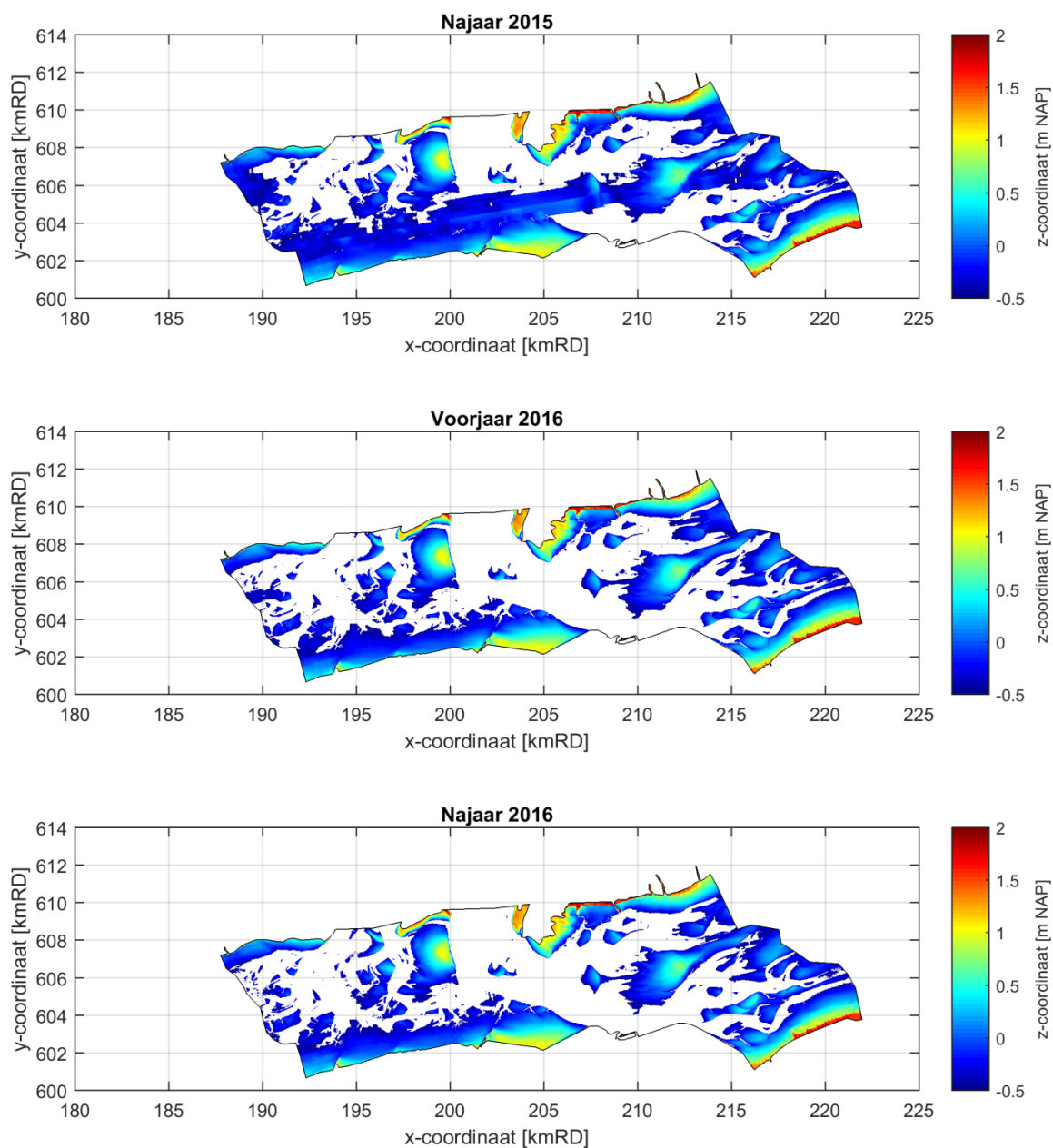




Figuur A.1 Visualisatie van alle LiDAR opnamen (april 2010 t/m september 2016) op een 10m x 10m rooster. De waterspiegel (bodemhoogtepunten < -0.5 m NAP) is uitgefilderd in de bodemkaarten.







Figuur A.2 Visualisatie van alle LiDAR opnamen (april 2010 t/m september 2016) op een 10m x 10m rooster waarbij gaten zijn opgevuld door middel van driehoeksinterpolatie. De waterspiegel (bodemhoogtepunten < -0.5 m NAP) is uitgefilterd in de bodemkaarten.



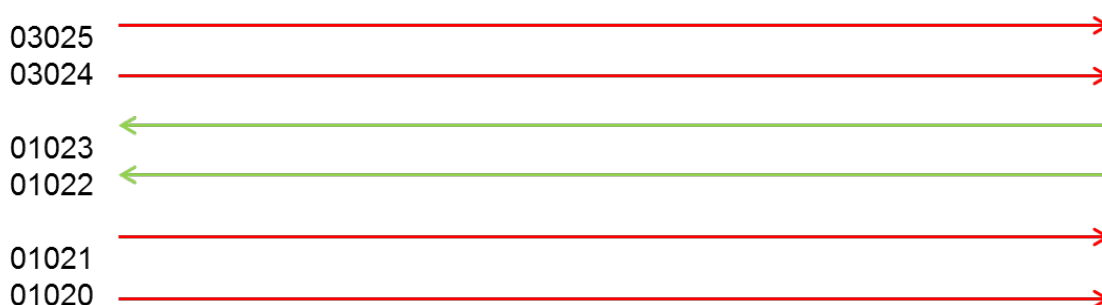
## B Appendix B; Analyse van individuele LiDAR vliegbanen

### B.1 Inleiding

Tijdens de laatste evaluatie van de LiDAR analyse rapportage is de vraag opgedoken of de kwaliteit (nauwkeurigheid) van de LiDAR gegevens verbeterd kan worden door het vluchtschema aan te passen. Momenteel worden aangrenzende parallelle vliegbanen in tegengestelde richting ten opzichte van elkaar ingevlogen, op deze manier wordt namelijk het meest efficiënte vluchtschema verkregen.

Tijdens het inwinnen van de LiDAR data zal het vliegtuig een zekere zijwind ondervinden, hierdoor ondergaat het vliegtuig beweging over zijn lengte as (roll) en over de as verticaal op de vliegrichting (yaw). De LiDAR data wordt gecorrigeerd voor deze vliegtuigbewegingen maar deze correctie gaat gepaard met een zekere standaardfout. Wanneer aangrenzende parallelle vliegbanen in tegengestelde richting worden gevlogen kan het zijn dat deze fout wordt verdubbeld terwijl deze fout wellicht wordt uitgemiddeld wanneer de banen in dezelfde richting worden gevlogen. Om het effect van de aangrenzende vliegrichting op de fout van de LiDAR data te onderzoeken is er tijdens de LiDAR opname van najaar 2016 een kleine aanpassing in het vluchtschema gemaakt zodat enkele banen in dezelfde richting gevlogen zijn (Figuur 8.1). Hoewel er geen sterke zijwind aanwezig was tijdens het invliegen van de vliegbanen (~5 m/s O op 14-9 en ~ 4 m/s ZZO op 16-9), kan het verondersteld worden dat het vliegtuig altijd onderhevig is aan zijwind.

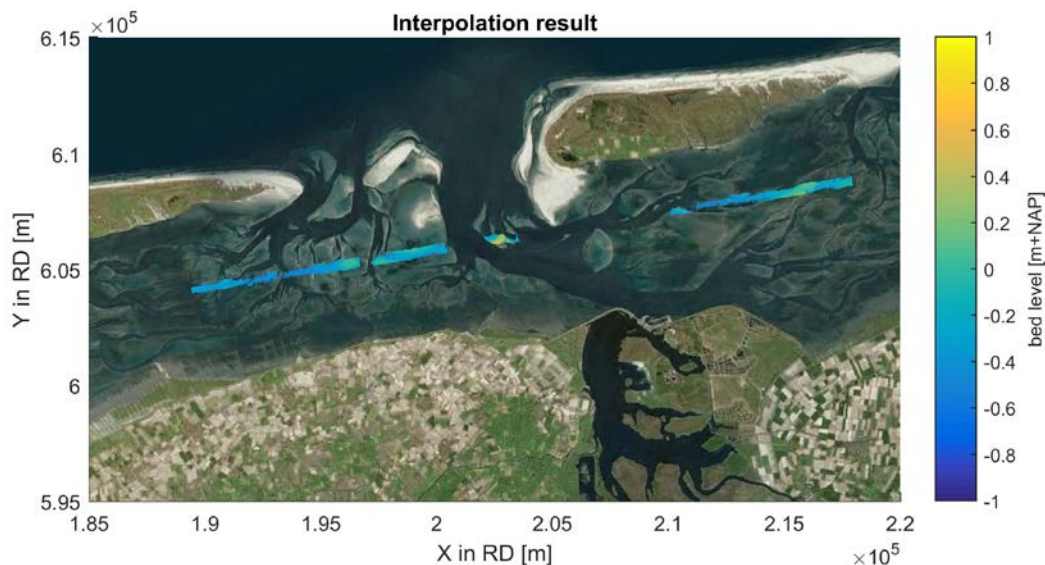
Doordat alle vliegbanen met 50% overlap zijn gevlogen kan aan de hand van het aangepaste vluchtschema onderzocht worden of aangrenzende vliegbanen die in dezelfde richting zijn gevlogen een andere fout hebben dan vliegbanen die in tegengestelde richting zijn gevlogen.



Figuur 8.1 Vliegbanen van de LiDAR opname van najaar 2016 die in dezelfde richting gevlogen zijn

### B.2 Methode

De vliegbanen voor de analyse (Figuur 8.1) zijn verwerkt door de LAS-punten van individuele vliegbanen te aggregeren naar 2x2 m roosterzellen op één gelijke werkwijze als beschreven in Paragraaf 3.4. De werkwijze verschilt enkel doordat de LAS-punten niet opgedeeld worden in kaartvakken en naar roosterzellen van 2x2 m worden gemiddeld. Een visualisatie van een geaggregeerde vliegbaan is weergegeven in Figuur 8.2.



Figuur 8.2 Geaggregeerde vliegbaan 01022 als basis voor de analyse

De geaggregeerde vliegbanen bevatten roostercellen die overlappen met roostercellen van een aangrenzende vliegbaan. In Figuur 8.1 kan de nummering van de vliegbanen gevonden worden als mede welke vliegbanen tegengesteld en in dezelfde richting gevlogen zijn. De eerste twee getallen van de nummering geven de dag van de meetcampagne aan. Wanneer het overlappende gedeelte van de vliegbanen 01023 en 03024 wordt vergeleken moet er dus rekening mee gehouden worden dat deze op verschillende dagen gevlogen zijn en de weersomstandigheden tijdens het moment van opname verschilden.

De analyse is uitgevoerd door middel van de volgende stappen:

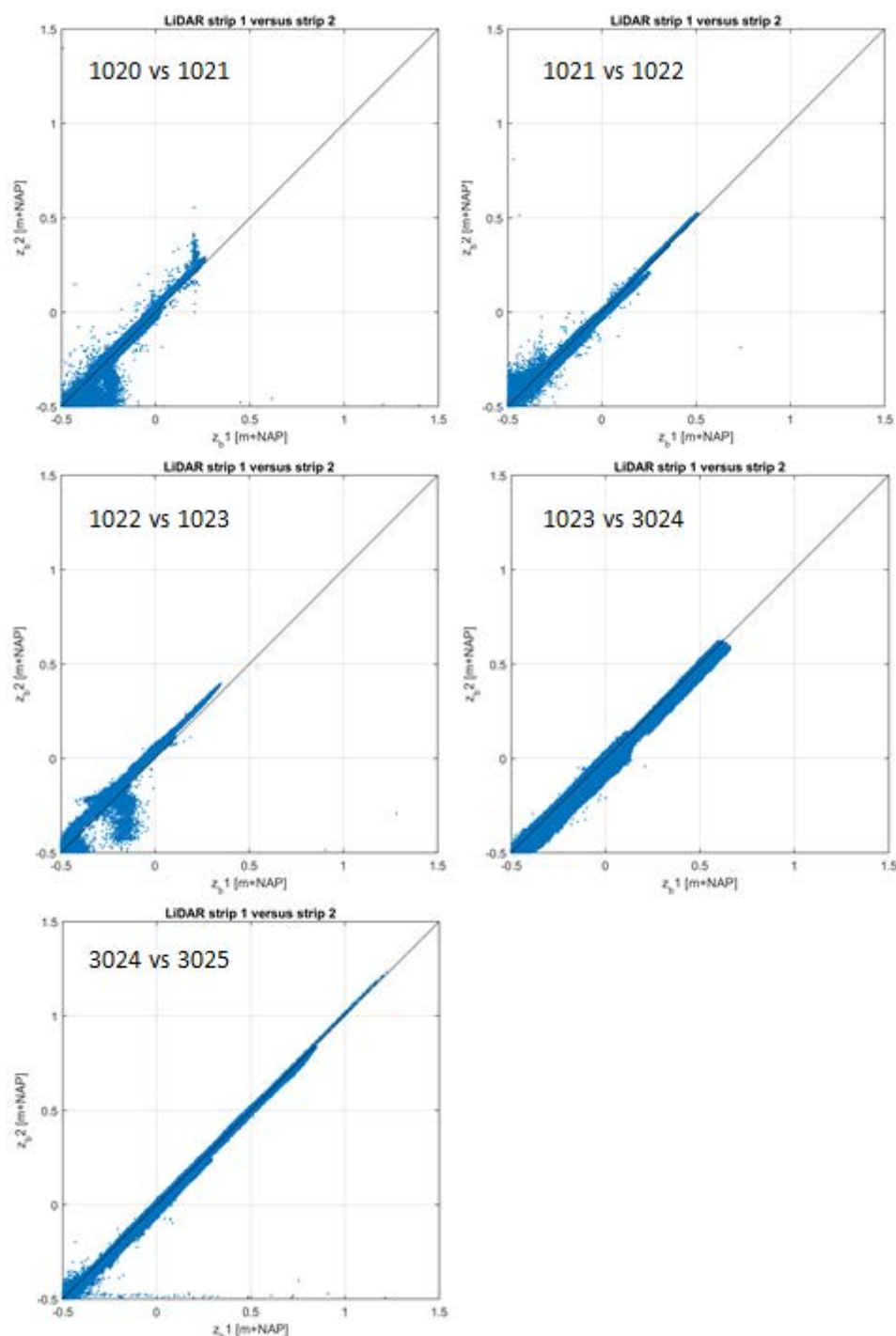
1. Het verschil tussen overlappende gedeeltes van de geaggregeerde LiDAR vliegbanen is berekend.
2. De roostercellen die zich aan de rand (binnen 10 m) van dit overlappende gedeelte bevinden zijn uitgesloten van de analyse.
3. De verschilpunten van aangrenzende banen in dezelfde richting zijn vergeleken met aangrenzende banen in tegengestelde richting.

### B.3 Resultaten

De bodemhoogtes van de geaggregeerde 2x2 m punten zijn per overlappende vliegbaan uitgezet als scatterplot (Figuur 8.3). Het is op te merken dat de spreiding tussen punten van twee vliegbanen veel groter is op het lage gedeelte van de wadplaten (tussen ongeveer -0,5 en 0 m NAP) dan op de hogere gedeeltes. De meest waarschijnlijke verklaring voor deze spreiding is het water dat nog op de platen staat, dit kan namelijk in de korte tussenperiode van twee vliegbanen veranderen door lokale windcondities en het getij.

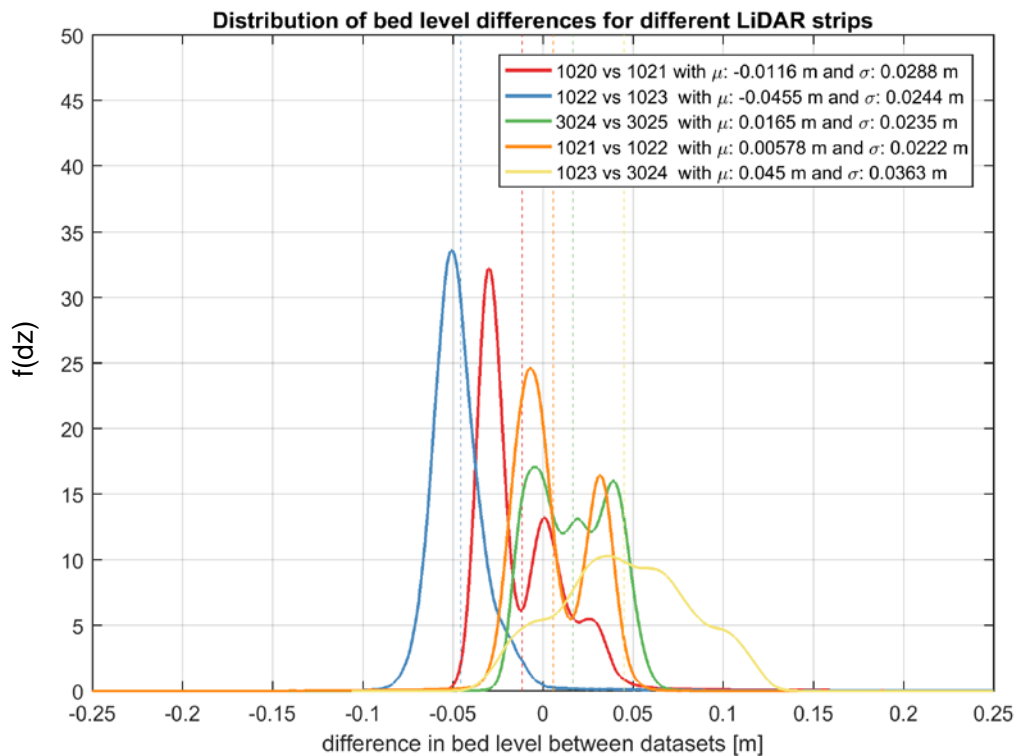
Op de lage gedeeltes van de wadplaten is de waterstandsvariatie groter in de tijd doordat dit areaal dicht bij het laagwater ligt. Tijdens de survey's is het water van de hoger gelegen delen van de wadplaten al geheel afgestroomd doordat er pas gevlogen wordt bij een waterstand van -0,7 m NAP. Bij de lagere gedeeltes is dit niet het geval en kan er een verschil in waterhoogte optreden in het tijdsinterval van twee vliegbanen. Het water dat op de platen blijft staan is de voornaamste reden dat LiDAR data geen accurate weergave van de bodemhoogte kan geven (Brzank et al., 2008; Mason et al., 2006). Morfologische

veranderingen kunnen uitgesloten worden als oorzaak van de spreiding in de korte periode tussen twee vliegbanen.



Figuur 8.3 Scatterplots van de geaggregeerde overlappende 2x2 m roosterzellen. De eerste vlieglijn die aangegeven staat in het figuur is geprojecteerd op de horizontale as ( $z_b$ ), de tweede vlieglijn op de verticale as ( $z_2$ ).

In Figuur 8.4 is de verdeling van de hoogteverschillen weergegeven als kansdichtheidsfunctie ( $f(dz)$ ) van de bodemhoogteverschillen ( $dz$ ). De grafieken geven voor iedere dataset (verschilpunten van twee vliegbanen) de kans  $f(dz)$  op een waarde  $dz$ . Het gemiddelde ( $\mu$ ) en de standaardafwijking ( $\sigma$ ) voor iedere dataset is weergegeven in de legenda. De kansdichtheidsfuncties en de scatterplots geven aan dat er een systematische verschuiving van de bodemhoogtepunten kan plaatsvinden tussen twee vliegbanen (1022 vs 1023 en 1023 vs 3024). De negatieve bias van de vliegbanen 1022 vs 1023 wordt veroorzaakt door lage bodemhoogtepunten. Lager op het wad blijft er langer water staan en kan de variatie in lokale waterspiegel sterker variëren tussen twee vliegbanen. De verschuiving die is te zien als een positieve bias (1023 vs 3024) zijn de twee vliegbanen die zijn ingevlogen op twee verschillende dagen. De verschuiving van deze punten vindt plaats over het gehele hoogtebereik van de hoogtepunten. Wisselende weersomstandigheden tussen de twee momenten van opnamen zijn daarom waarschijnlijk de verklaring van de verschuiving.



Figuur 8.4 Kansdichtheidsverdelingen van de verschilpunten van twee vliegbanen.

#### B.4 Conclusies

Aan de hand van de resultaten van de analyse naar individuele vliegbanen kan het volgende geconcludeerd worden:

1. De nauwkeurigheid van de data wordt sterk beïnvloedt door de heersende weersomstandigheden tijdens de dag van opname.
2. Bodempunten die lager liggen worden met veel grotere onnauwkeurigheid gemeten dan bodempunten die hoger gelegen zijn. De oorzaak van deze onnauwkeurigheid is waarschijnlijk het water dat op de platen blijft staan. Het areaal dat met water bedekt word kan sterk variëren over de tijd als gevolg van de heersende windcondities en het getij.
3. Er is geen significant verschil op te merken in de afwijking (fout) tussen verschilpunten van aangrenzende vliegbanen die in dezelfde richting gevlogen zijn ten opzichte van banen die in tegengestelde richting gevlogen zijn.



## C Appendix C; Analyse van de toepassing van multispectrale beelden voor het scheiden van wad en water

### C.1 Introductie

Tijdens de LiDAR survey van najaar 2016 zijn er multispectrale beelden opgenomen die de LiDAR data kunnen complementeren. Deze data kan gebruikt worden om een classificatie uit te voeren over het studiegebied, waarbij onderscheid gemaakt wordt tussen water en land (wad). Een dergelijke classificatie kan toegepast worden bij de interpretatie van de morfologische analyse van de LiDAR data doordat duidelijk wordt of de gemeten wadplaathoogte de werkelijke bodemhoogte aanduidt of dat dit de waterspiegel is die is ingemeten.

De analyse van de LiDAR data is echter gericht op verschillen tussen de oudere en meest recente datasets. Voor de oudere datasets zijn de multispectrale beelden niet beschikbaar en kan de mogelijke classificatie van wad en water niet gemaakt worden. De waterstand varieert ook tijdens en voor elke individuele survey en daarmee ook de locatie van waterplassen op de wadplaten. Verschillende datasets kunnen niet met elkaar vergeleken worden wanneer iedere dataset een ander gebied heeft dat als droog wad geclassificeerd wordt. Een vergelijking tussen de verschillende datasets vereist daarom dat de grenswaarde van -0,5 m NAP gehanteerd wordt. De classificatie kan wel verduidelijken of de momenteel gehanteerde grenswaarde van -0,5 m NAP een juiste grenswaarde is of dat deze grenswaarde hoger zou moeten liggen.

Het doel van de analyse welke is beschreven in deze appendix is bepalen in hoeverre het mogelijk is om met behulp van de data tot een juiste classificatie van wad en water te komen.

### C.2 Data

De multispectrale data is opgenomen met een DigiCAM van IGI mbH<sup>1</sup> in CIR modus. De radiometrische gegevens staan in Tabel C.1, de volledige specificaties zijn te vinden in het bijgeleverde document van specificatiedocument van de DigiCAM.

Tabel C.1 Radiometrische gegevens camera

Band	blauw [band 3]	groen [band 2]	(infra)rood [band 1]
Golflengte (nm)	500-620	580-800	800-1000

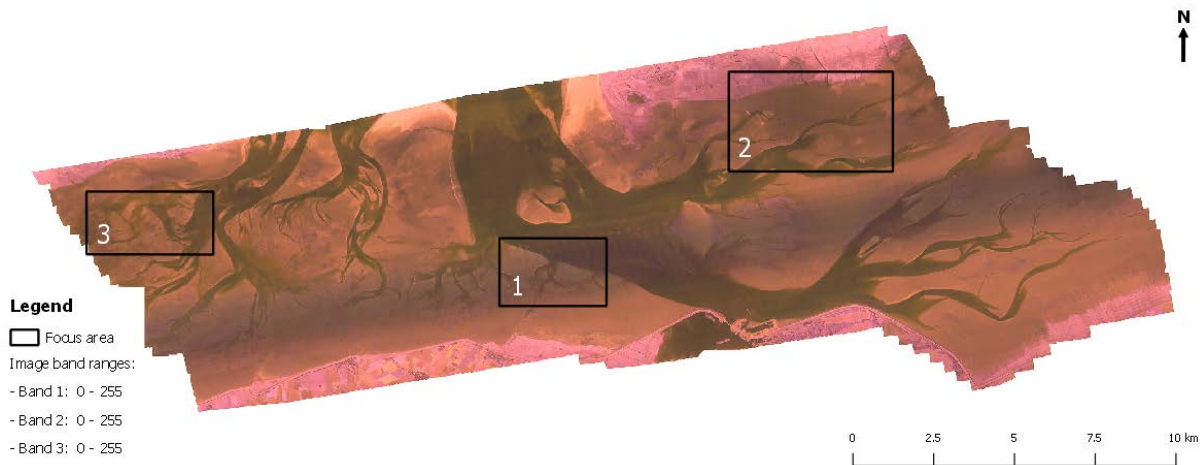
De blauwe en groene band vallen binnen het visuele spectrum, in plaats van ook een visuele rode band is gekozen voor een infrarood (*near infrared*, oftewel NIR) band, omdat deze een duidelijker onderscheid tussen water en land mogelijk zou moeten maken. Voor de analyse van de data zal dan ook zoveel mogelijk gebruik gemaakt worden van de NIR band.

### C.3 Studiegebied

Het studiegebied is weergegeven in Figuur C.1 hieronder, waarbij de data gevisualiseerd is als een RGB beeld met de drie banden genoemd in Tabel C.1. In deze figuur zijn ook drie

<sup>1</sup> <http://www.igi-systems.com>

focus gebieden opgenomen, welke gebruikt worden om een gedetailleerde analyse te beschrijven. Dit komt aan bod in de volgende paragraaf.



Figuur C.1 Studiegebied als RGB beeld op basis van multispectrale data, inclusief twee focus gebieden

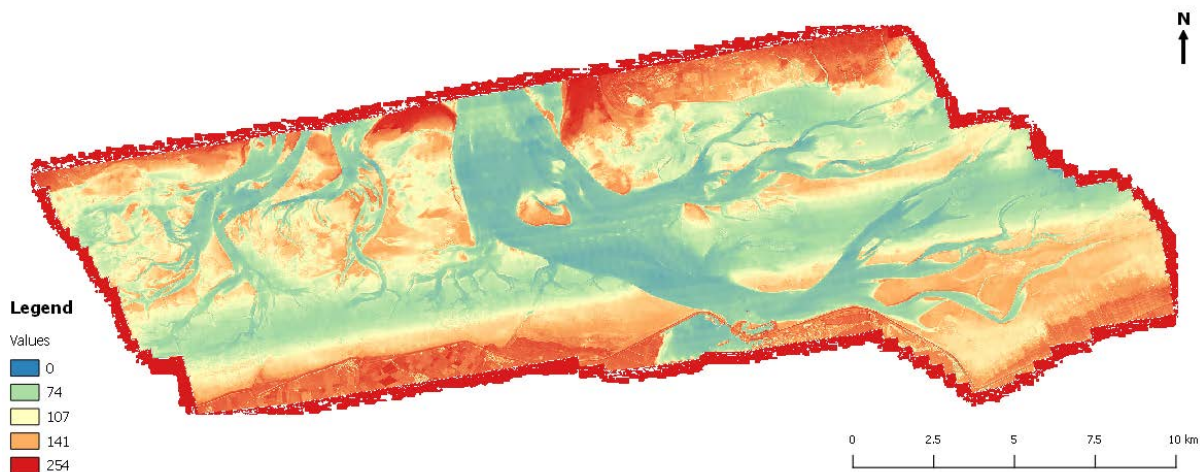
Het gebruikte coördinatenstelsel is het Rijksdriehoekstelsel (Amersfoort / RD NEW, EPSG:28992). Het beeld hierboven is opgedeeld in 1132 losse bestanden in GeoTIFF formaat van 7143 bij 7143 pixels (met en zonder data), met een pixelgrootte van 7 cm. De bestandsgrootte is 147 Megabyte, wat neerkomt op een totale hoeveelheid data van ongeveer 170 Gigabyte.

## C.4 Analyse

De analyse is opgedeeld in drie delen; ten eerste is gekeken naar het volledige studiegebied, vervolgens zijn een aantal focus gebieden uitgekozen voor een meer gedetailleerde analyse. Tenslotte zijn een aantal mogelijke classificatie methoden beschreven.

### C.4.1 Volledig studiegebied

Er is allereerst gekeken naar de losse banden van de data over het gehele studiegebied. Ter illustratie is Figuur C.2 hieronder opgenomen, waarin de waarden van de NIR band gevisualiseerd zijn.



Figuur C.2 NIR band over het gehele studiegebied

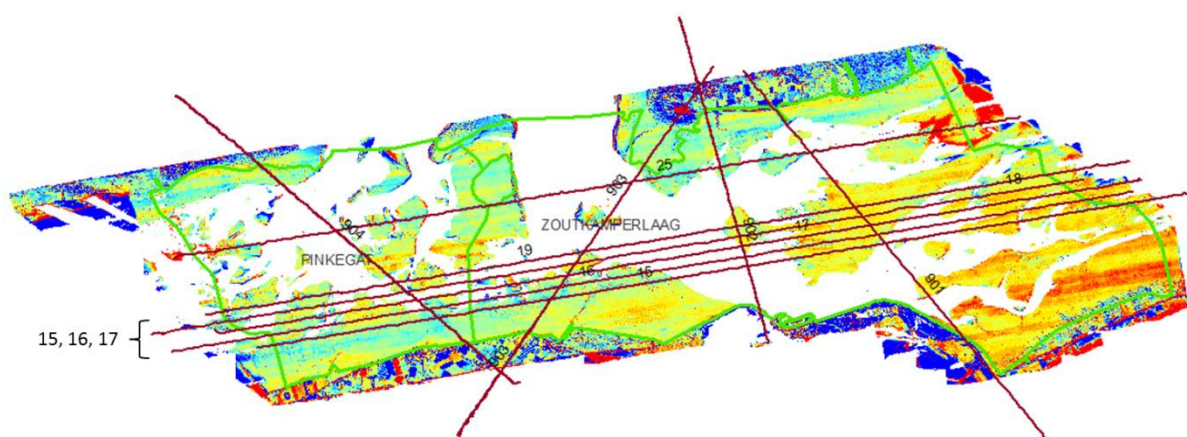


Uit deze figuur zijn een aantal dingen op te maken:

- het vasteland en het wadgebied zijn duidelijk zichtbaar en van elkaar te onderscheiden;
- open water en (relatief droog) wad zijn ook goed van elkaar te onderscheiden;
- voor een onderscheid tussen ondiep water en nat wad dient verder ingezoomd te worden.

Er lijkt ook een onnatuurlijke ogende 'band' te lopen over het beeld in een noordoostelijke richting, met een breedte van ongeveer 2,5 kilometer. Deze band is zichtbaar doordat tijdens de derde dag van de meetcampagne buiten het getijdenvenster is gevlogen. In de LiDAR dataset van najaar 2016 zijn de vliegbanen 15 – 17 vervangen door de vliegbanen welke zijn ingewonnen op de tweede dag van campagne. Tijdens deze dag heeft de camera voor de multispectrale beelden echter niet gewerkt (pers. comm. NAM) waardoor deze vliegbanen in de multispectrale dataset niet vervangen konden worden (zie ook Figuur C.3 waarin de vliegbanen zijn weergegeven die buiten het getijdenvenster opgenomen zijn). Het gebied binnen deze 'band' zou tot problemen kunnen leiden bij de classificatie, omdat de waarden hier aanzienlijk afwijken van de waarden over de rest van het studiegebied (in alle spectrale banden).

Om een gedetailleerde analyse van de spectrale data uit te voeren is ingezoomd op een tweetal focus gebieden (Figuur C.4), waarbij gekozen is voor één gebied binnen de afwijkende 'band' en één gebied hierbuiten. Dit maakt het mogelijk om het effect hiervan op de uiteindelijke classificatie te onderzoeken. Er is gezocht naar twee gebieden die representatief leken voor het wadgebied, waarbij open water, droog wad, verzadigd wad, geulen, stilstaand water en dergelijke aanwezig zijn. Beide gebieden worden in het vervolg in meer detail beschreven.



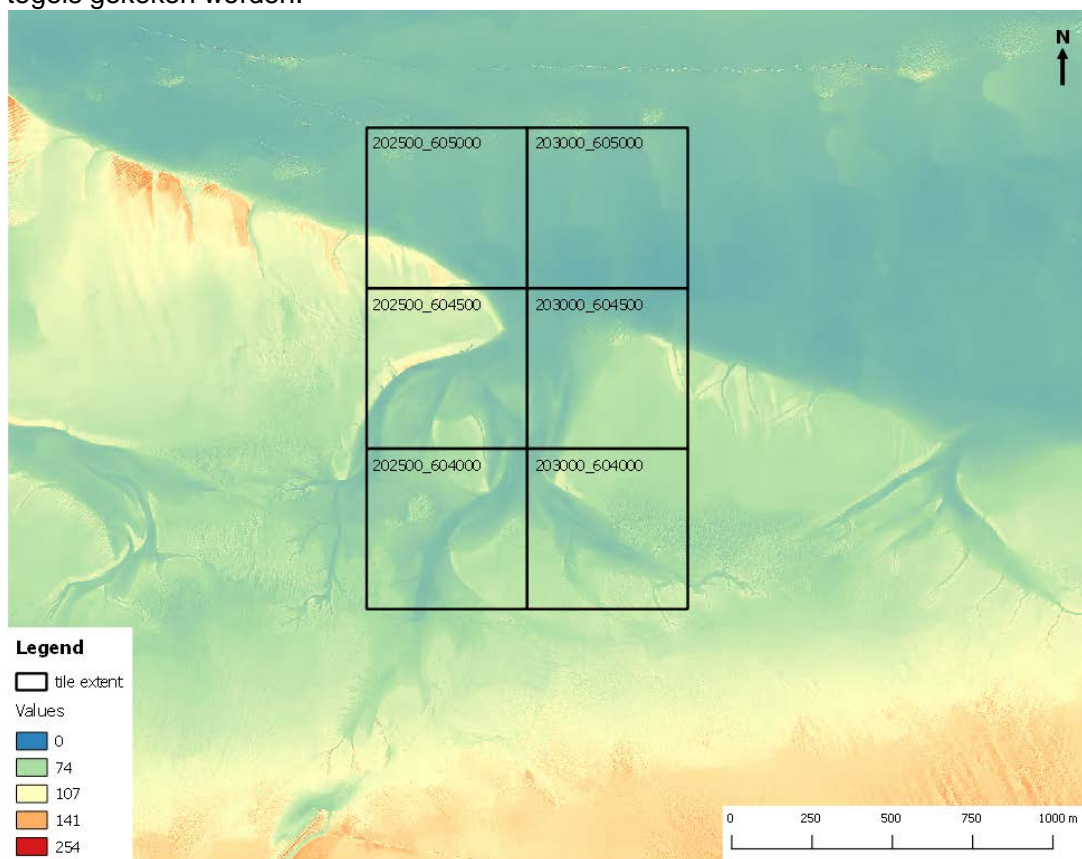
Figuur C.3 Vluchtpaden over het gebied, waarin duidelijk de 'band' met andere data te herkennen is (lijnen 15, 16, en 17)

## C.4.2 Focus gebieden

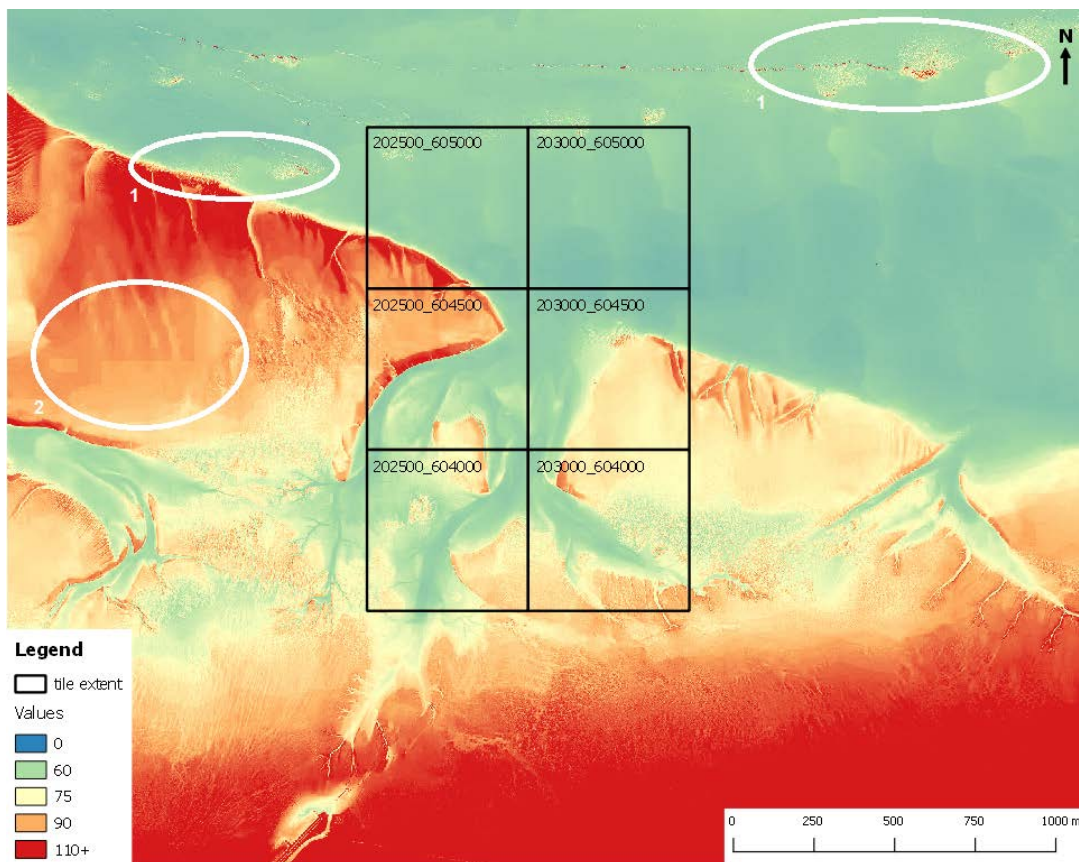
### C.4.2.1 Focus gebied 1

Dit gebied is weergegeven in Figuur C.4 hieronder. Deze gebruikt eenzelfde visualisatie als Figuur C.2 van het gehele studiegebied. In Figuur C.5 is een andere kleurenclassificatie gebruikt om de patronen binnen dit gebied beter weer te geven. Dit gebied valt binnen de afwijkende 'band' die beschreven is in de vorige paragraaf. Hoewel de waarden dus afwijken van de rest van het studiegebied, lijkt de data binnen dit focus gebied op zich in orde. Dit

betekent dat het ook mogelijk zou moeten zijn om binnen de afwijkende 'band' een goede classificatie uit te voeren. Om dit verder te onderzoeken zal ook naar een aantal individuele tegels gekeken worden.



Figuur C.4 Focus gebied 1 (NIR band), inclusief een aantal individuele tegels



Figuur C.5 Focus gebied 1 (NIR band), inclusief een aantal individuele tegels (andere kleuren dan Figuur C.4).

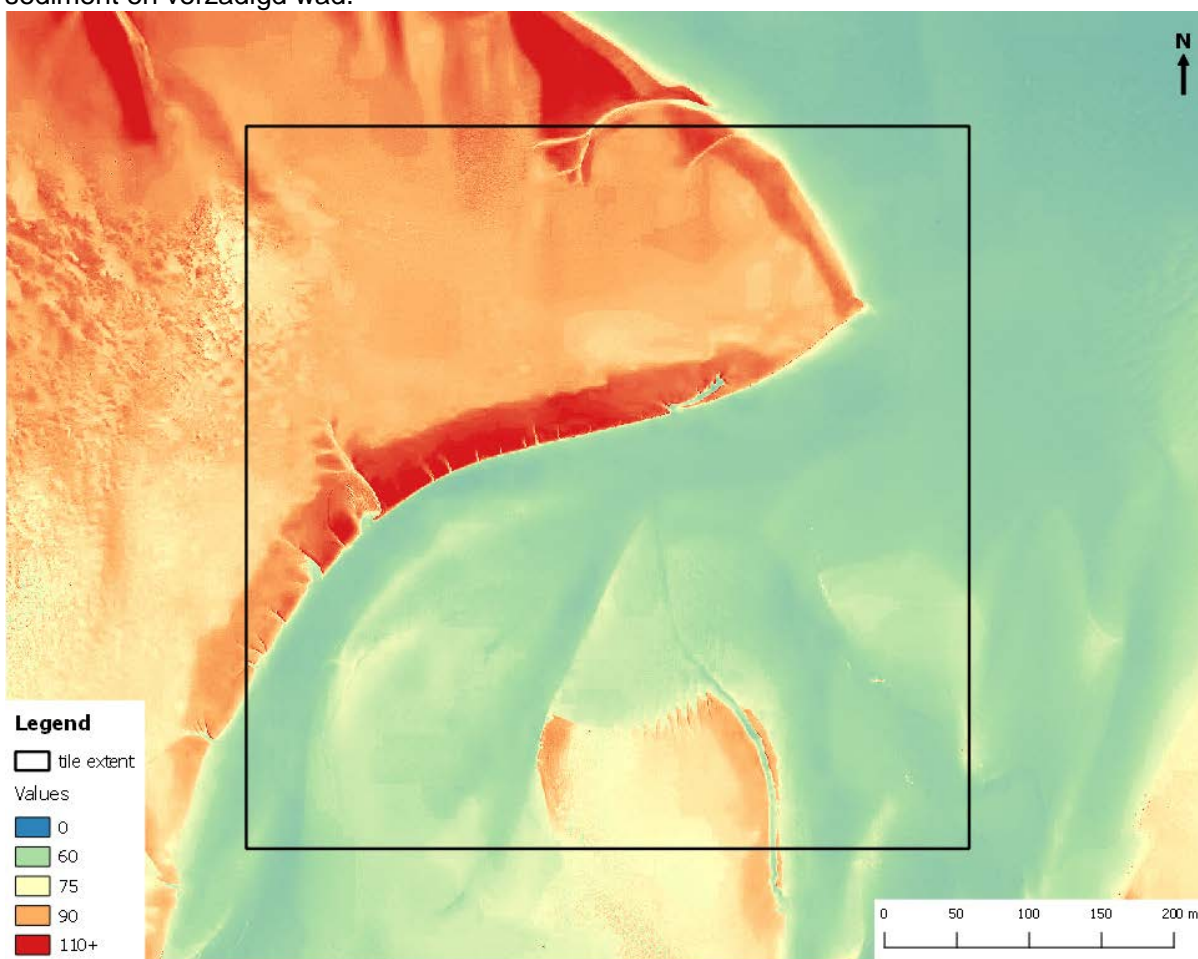
Hoewel de data dus op zich in orde lijkt, kan uit bovenstaande figuur nog wel opgemaakt worden dat:

1. Er af en toe ruis aanwezig is in een terugkerend patroon, dat in dezelfde richting loopt als de 'band' met afwijkende waarden (dit valt vooral op boven open water, maar treedt ook op over land);
2. Er af en toe rechte grenzen aanwezig zijn die niet natuurlijk lijken (dit valt vooral op boven land, en lijkt niet op te treden boven water).

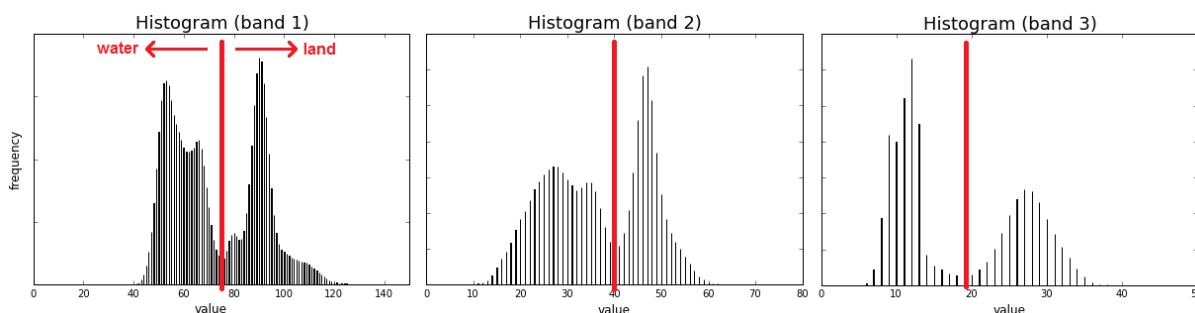
Beide punten hoeven de classificatie niet in de weg te zitten. De rechte lijnen lijken ten eerste niet vaak op te treden en ten tweede zijn deze alleen waargenomen boven gebieden die waarschijnlijk toch als land geïdentificeerd zouden worden. De ruis kan lokaal wel tot problemen leiden, doordat er aanzienlijk hogere waarden aanwezig zijn die waarschijnlijk als land geïdentificeerd zouden worden, ook als het aannemelijk is dat het in werkelijkheid water is. Het percentage pixels met ruis over het gehele gebied is echter behoorlijk laag, waardoor dit beperkt zou moeten blijven tot lokale problemen met de classificatie. Daarnaast lijkt dit vooral op te treden binnen de afwijkende 'band', die waarschijnlijk toch al minder nauwkeurig is. Er zou ook een oplossing voor gevonden kunnen worden, bijvoorbeeld door het toepassen van 'noise filtering' technieken. Het heeft echter de voorkeur om de data zoveel mogelijk intact te houden, en aangezien het doel van de multispectraal-analyse is om te bepalen of een classificatie mogelijk is (en dus niet om deze perfect uit te voeren op de huidige dataset), is er voor gekozen om dit achterwege te laten.

## Voorbeeld tegel (202500\_604500)

Deze tegel is weergegeven in Figuur C.6 hieronder. Voor deze tegel is van elke spectrale band een histogram gemaakt, welke te zien is in Figuur C.7. Uit beide figuren valt op te maken dat een onderscheid tussen land en water goed mogelijk moet zijn. Alle histogrammen laten een duidelijk onderscheid zien tussen twee klassen, waarbij band 1 (NIR) de meeste informatie bevat. Uit deze band zijn meerdere subklassen op te maken. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat diep water met relatief weinig sediment een ander signaal heeft dan ondiep water met veel sediment. Hetzelfde geldt voor droog en verzadigd wad. Interessant is in dit geval vooral of er goed onderscheid gemaakt kan worden tussen ondiep water met veel sediment en verzadigd wad.



Figuur C.6 Tegel 202500\_604500 (NIR band).

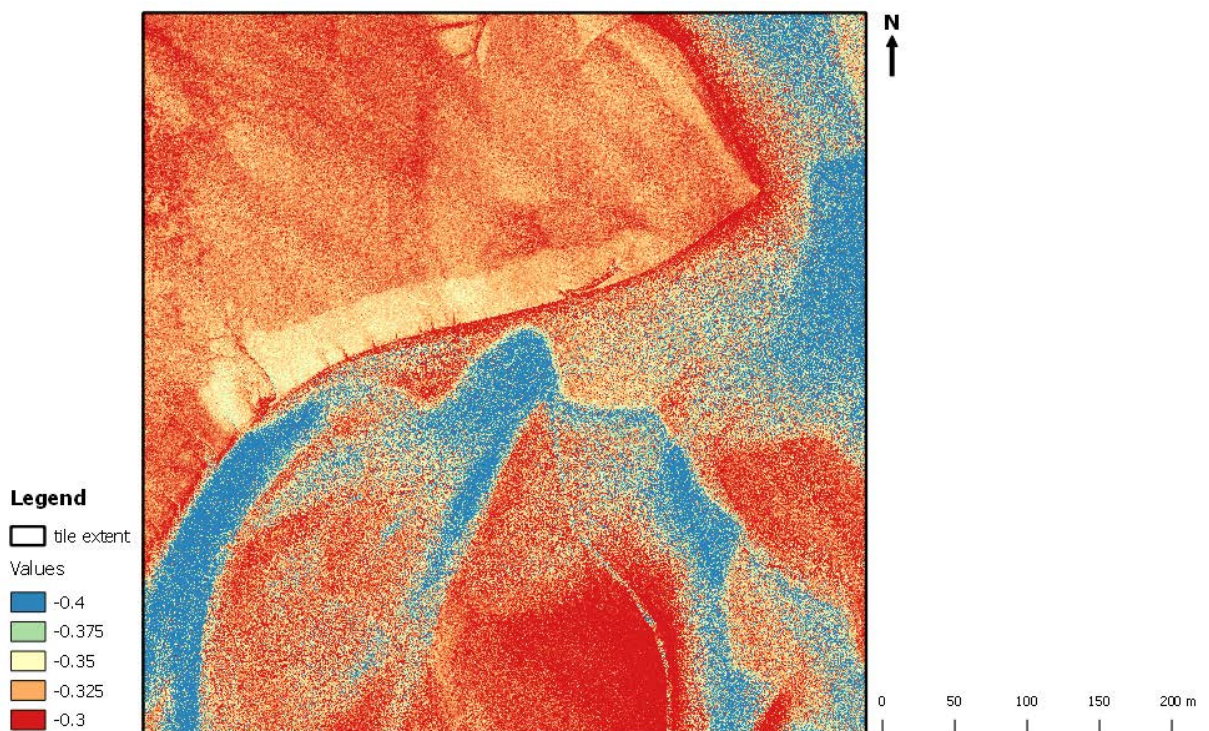


Figuur C.7 Histogram van elke spectrale band voor tegel 202500\_604500, met mogelijke scheiding tussen water en land weergegeven door de rode lijn.

In Figuur C.6 is diep water en droog land ook duidelijk te herkennen, dit is blauw-groen respectievelijk oranje-rood gekleurd. Verzadigd wad en water met veel sediment is hier geel gekleurd. Voor deze pixels is het onderscheid tussen water en land op het oog lastiger te maken. Dit zou echter wel uit de histogrammen van Figuur C.7 gehaald kunnen worden. Voordat hier verder op ingegaan wordt is er eerst ook nog gekeken of een combinatie van spectrale banden meer duidelijkheid kan verschaffen. Hiervoor is gebruik gemaakt van de Normalized Difference Water Index (NDWI), omdat deze veel gebruikt wordt in studies waarbij water uit multispectrale beelden geassocieerd moet worden (McFeeters, 1996). Ook is deze index te berekenen met de beschikbare banden van de data:

$$NDWI = \frac{Groen - NIR}{Groen + NIR} = \frac{band\ 2 - band\ 1}{band\ 2 + band\ 1}$$

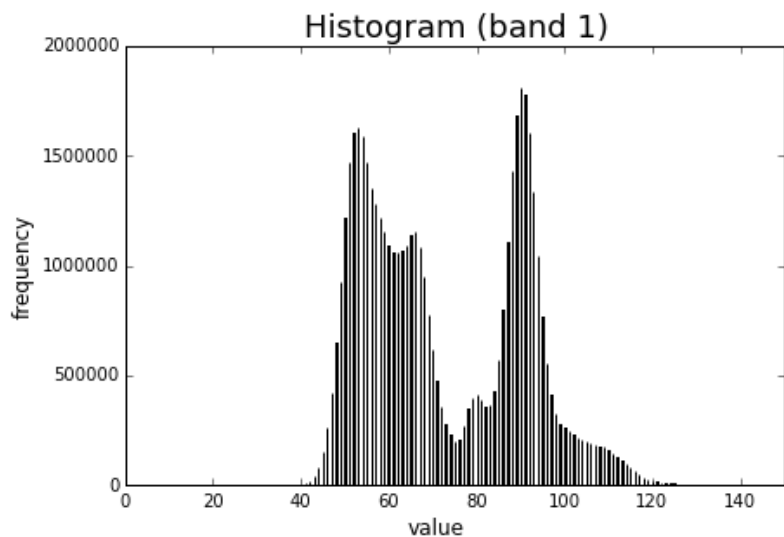
NDWI heeft een bereik van -1 tot 1, waarbij lagere waarden een hogere indicatie van mogelijk water hebben. De berekende NDWI voor tegel 202500\_604500 is te zien Figuur C.8 hieronder. Hieruit kan opgemaakt worden dat dit niet geschikt is voor deze analyse; hoewel het diepe water er duidelijk uitspringt, is het niet goed mogelijk om een onderscheid te maken tussen water met veel sediment en verzadigd wad. Er zal daarom enkel naar de bestaande spectrale banden gekeken worden.



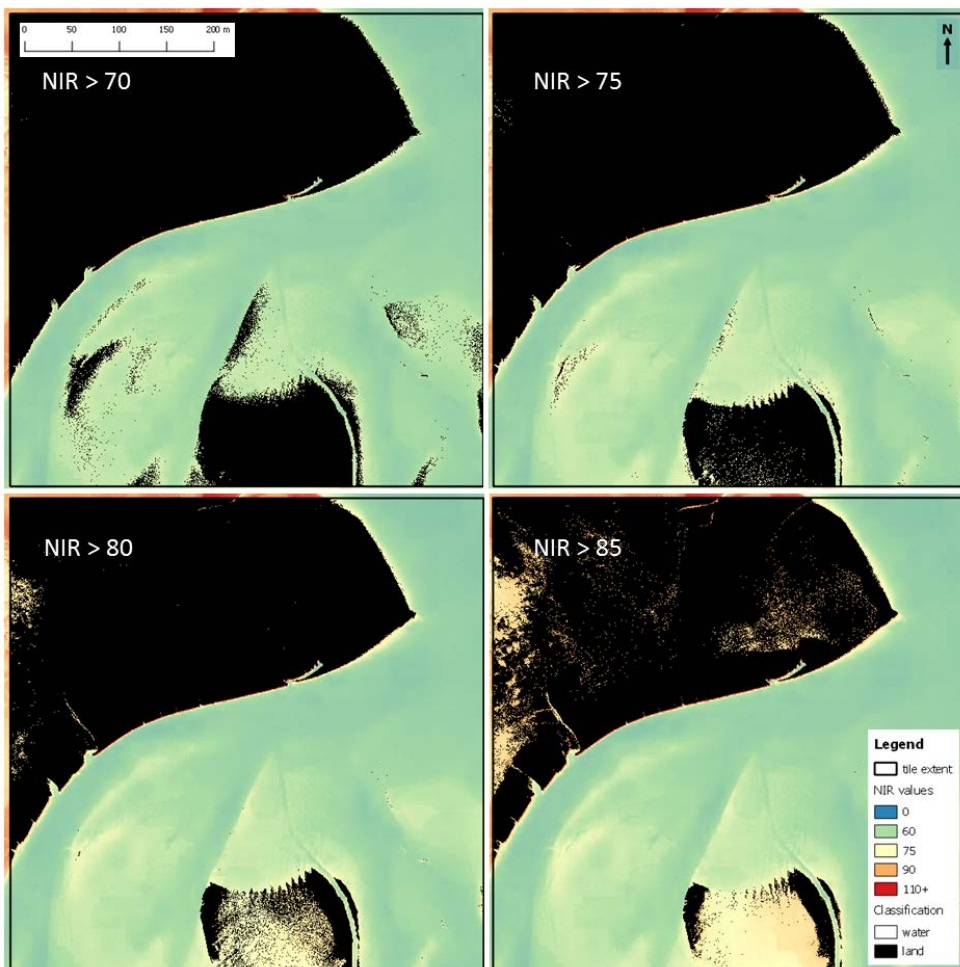
Figuur C.8 Tegel 202500\_604500 (NDWI).

Op basis van de NIR band is een onderscheid gemaakt tussen water en land. Het histogram hiervan is uitvergroot weergegeven in Figuur C.9 op de volgende pagina. Zoals al eerder aangeven kunnen lagere waarden geassocieerd worden met water, hogere waarden met land. De classificatie van water en land kan gemaakt worden door het toepassen van een drempelwaarde op de data, waarbij aangenomen wordt dat alles onder deze drempelwaarde water is en alles erboven land. De drempelwaarde voor deze tegel ligt waarschijnlijk ergens tussen de 70 en 85. Om het effect van de gekozen drempelwaarde te onderzoeken zijn

drempelwaarden van 70, 75, 80 en 85 toegepast op de data. Dit is te zien in Figuur C.10 en Tabel C.2.



Figuur C.9 Histogram van NIR band voor tegel 202500\_604500.



Figuur C.10 Classificatie van land (zwart) en water (transparant) op basis van de NIR band met verschillende drempelwaarden voor tegel 202500\_604500

Tabel C.2 Statistiek classificatie met verschillende drempelwaardes voor tegel 202500\_604500.

<b>drempelwaarde</b>	<b>pixels land</b>	<b>pixels water</b>	<b>% land</b>	<b>% water</b>
<b>NIR &gt; 70</b>	23383273	27639176	45,83	54,17
<b>NIR &gt; 75</b>	21838453	29183996	42,80	57,20
<b>NIR &gt; 80</b>	20187548	30834901	39,57	60,43
<b>NIR &gt; 85</b>	18075374	32947075	35,43	64,57

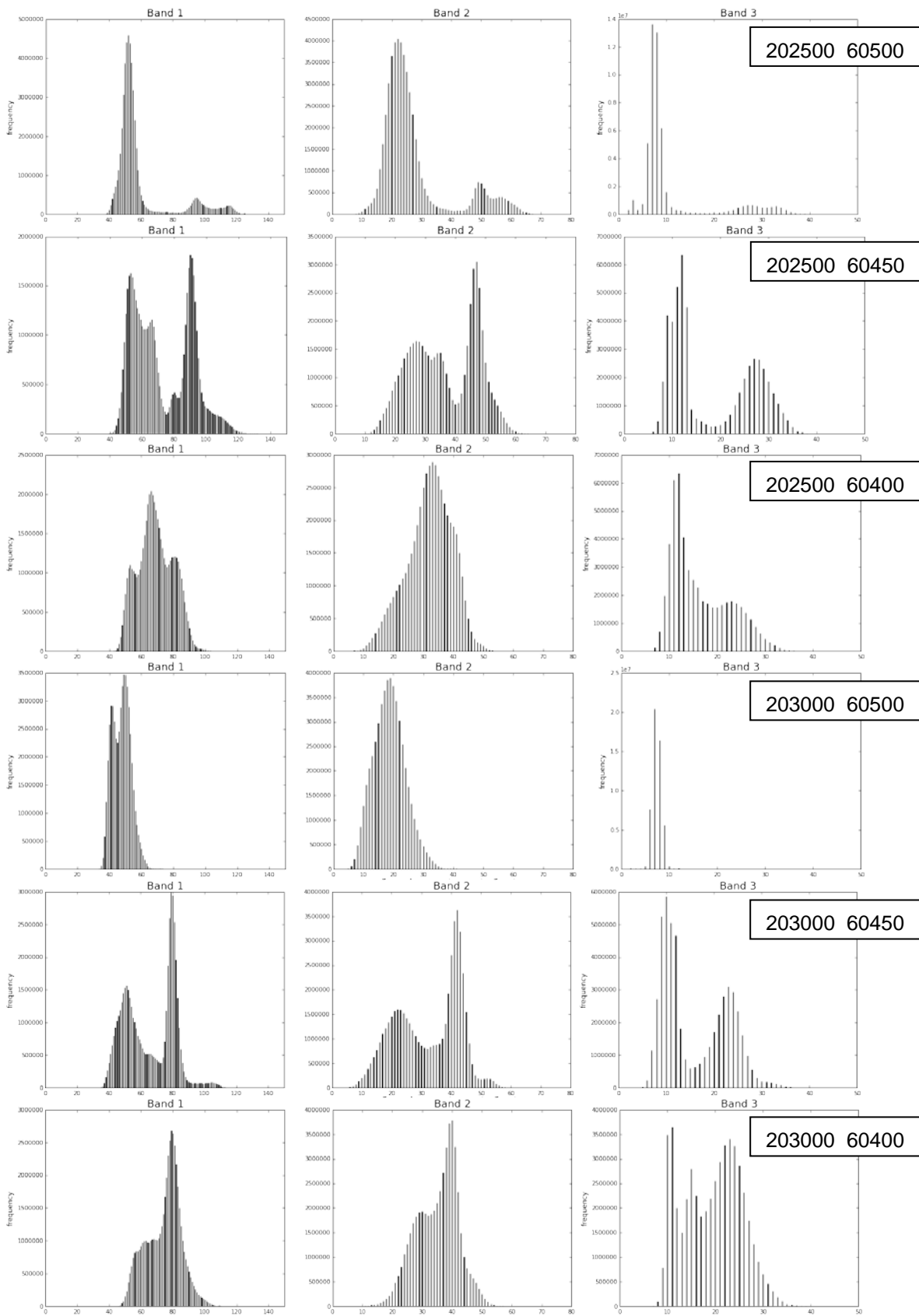
Uit Figuur C.10 en Tabel C.2 valt op te maken dat de keuze voor een bepaalde drempelwaarde een grote invloed kan hebben op de classificatie. In Figuur C.10 is dit vooral goed zichtbaar bij de zandbank in het zuiden en een aantal gebieden tussen deze zandbank en het grotere land gedeelte in het noordwesten. Tabel C.2 laat zien dat het percentage land (of water) met tien procentpunt verschilt tussen de minimale en maximale drempelwaarde. Dit betekent dat de drempelwaarde goed gekozen dient te worden. Een aantal mogelijk methoden worden om dit te bewerkstelligen zullen besproken worden in Hoofdstuk C.4.3.

Figuur C.10 laat verder zien dat bij een lagere drempelwaarde waarschijnlijk water met relatief veel sediment geclassificeerd wordt als land. Omgekeerd wordt bij een hogere drempelwaarde waarschijnlijk verzadigd wad geclassificeerd als water. Om echt goed te kunnen bepalen welke drempelwaarde het beste resultaat geeft moet bekend zijn van het gebied wat daadwerkelijk land en water is. Dit kan echter alleen door het uitvoeren van veldwerk op hetzelfde tijdstip dat de data opgenomen is.

#### *Overige tegels binnen focus gebied 1*

Van de overige tegels uit Figuur C.4 en Figuur C.5 is eenzelfde analyse als hierboven uitgevoerd. Deze resultaten worden hieronder kort beschreven. De histogrammen van elke tegel zijn opgenomen in Figuur C.11 op de volgende pagina. Hieruit kan opgemaakt worden dat er niet bij elke tegel eenzelfde duidelijk onderscheid tussen land en water is als het geval was bij de hierboven beschreven tegel. Bij sommige tegels is dat ook wel verwacht, zoals bij tegel 203000\_605000, die zo goed als volledig boven open water ligt. Hierdoor is in dit geval geen signaal van land te herkennen in het histogram. Bij tegel 202500\_604000 zijn drie klassen te herkennen in het histogram van de NIR data, maar het is niet direct duidelijk welke als land en welke als water geclassificeerd zou moeten worden. Tenslotte is het bij tegel 203000\_604000 ook lastig om te bepalen waar de drempelwaarde zou moeten liggen.

Hier dient rekening mee gehouden te worden bij het bepalen van een methode voor het kiezen van de drempelwaarde; wanneer dit op tegelniveau geautomatiseerd uitgevoerd zou worden, zal dit waarschijnlijk voor sommige tegels ofwel niet mogelijk zijn, ofwel leiden tot een verkeerd gekozen drempelwaarde. Het is waarschijnlijk noodzakelijk om naburige tegels op de een of andere manier mee te nemen in de analyse. Als alternatief zou het volledige studiegebied gebruikt kunnen worden, maar dit is niet aan te raden om twee redenen: (1) dit is waarschijnlijk teveel data om in één keer in het geheugen van een (normale) PC te laden, en (2) de spectrale respons kan verschillen tussen bepaalde gebieden, zeker als deze op verschillende tijden en met verschillende weerscondities opgenomen zijn. Het gebruiken van één gemiddelde drempelwaarde zou daarom waarschijnlijk niet tot het beste resultaat leiden. Punt 1 zou nog overkomen kunnen worden door het gebruik van betere hardware, maar er is geen makkelijke oplossing voor punt 2.

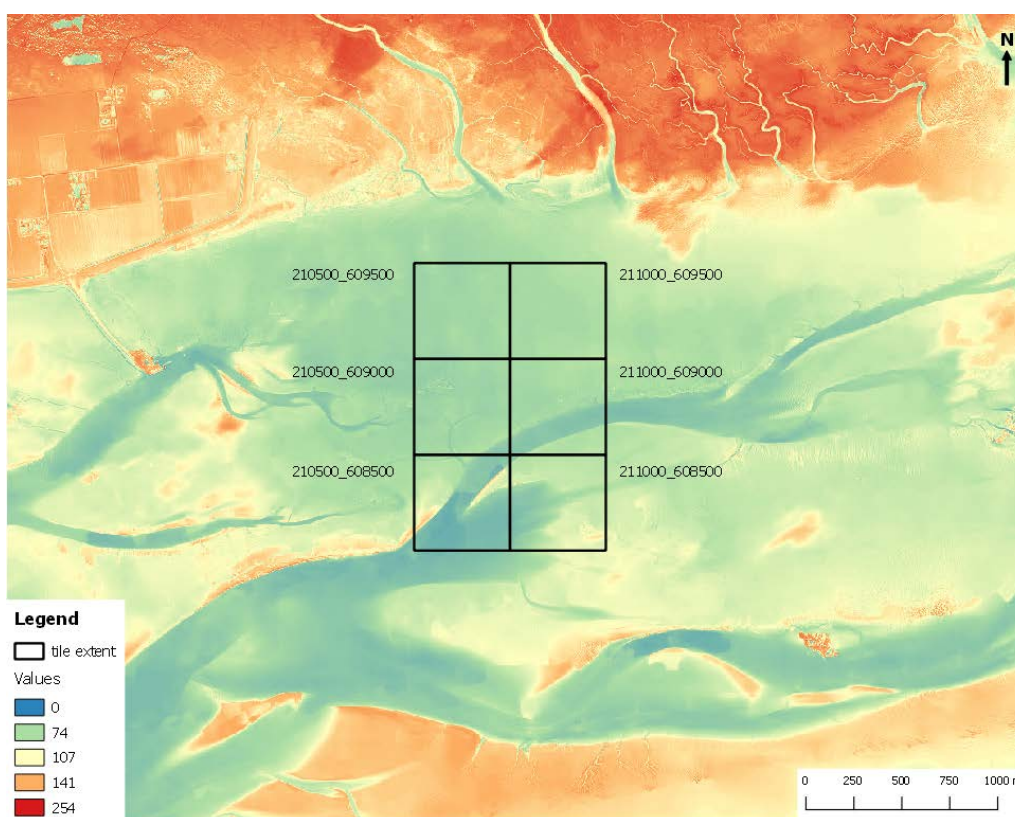


Figuur C.11 Histogrammen van de spectrale data voor alle voorbeeld tegels binnen focus gebied 1.



### C.4.2.2 Focus gebied 2

Dit gebied is weergegeven in Figuur C.12 hieronder. Er is, net als bij het vorige focus gebied, gebruikt gemaakt van eenzelfde visualisatie als Figuur C.2 van het gehele studiegebied. En wederom is hier ook een andere kleurenclassificatie gebruikt om de patronen binnen het gebied beter weer te geven (zie Figuur C.13).

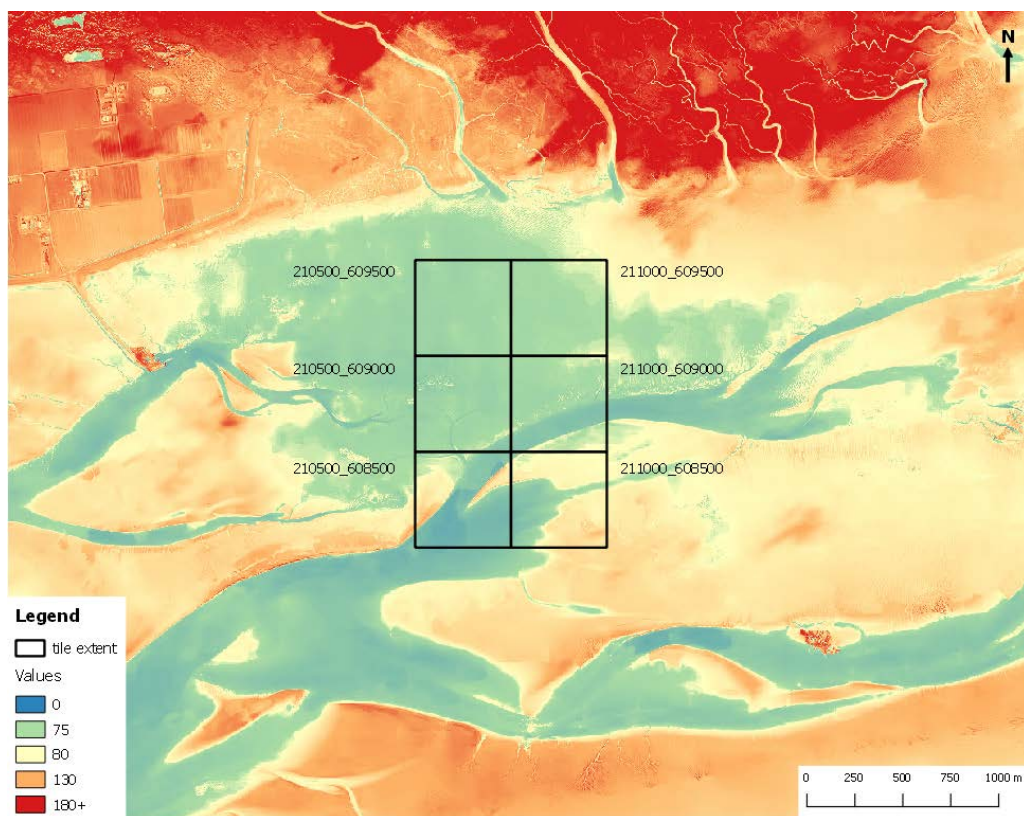


Figuur C.12 Focus gebied 2 (NIR band), inclusief een aantal individuele tegels.

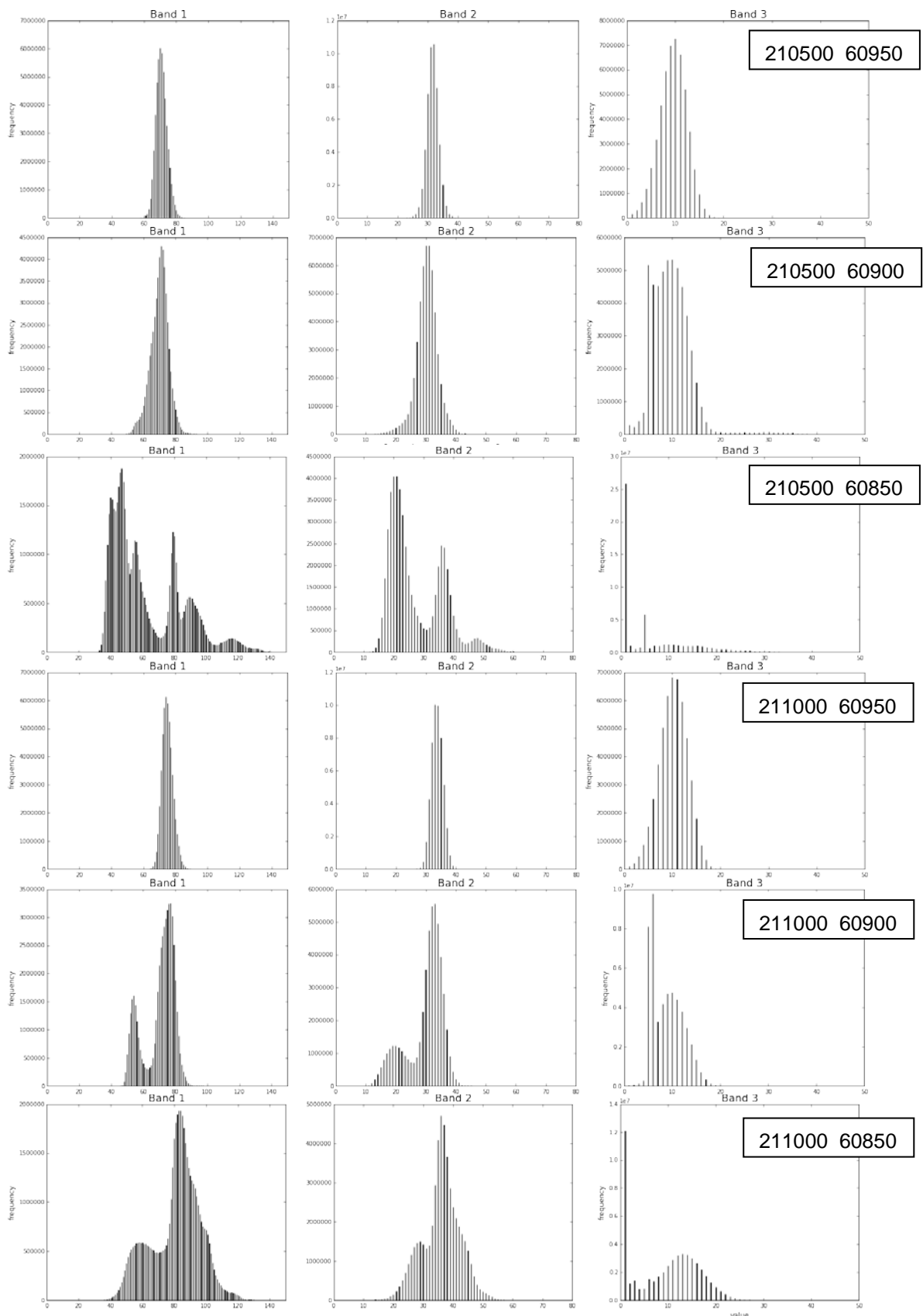
Dit gebied valt buiten de afwijkende 'band' die eerder beschreven is. In Figuur C.13 is specifiek gekozen om twee kleurklassen te gebruiken die bij het vorige studiegebied als mogelijke drempelwaarde geïdentificeerd waren (75 en 80), om het contrast tussen de twee focus gebieden aan te geven. Uit Figuur C.13 valt op te maken dat het gebruik van deze drempelwaarden waarschijnlijk zou leiden tot een overschatting van het totale wateroppervlak. Ook valt op dat de ruis die zichtbaar was in het vorige focus gebied hier niet aanwezig lijkt. Voor een gedetailleerde analyse zal ook voor dit gebied zal naar een aantal individuele tegels gekeken worden.

De histogrammen van deze tegels zijn opgenomen in Figuur C.14. In dit geval verdienen de tegels 210500\_608500, 211000\_609000 en 211000\_608500 extra aandacht, omdat hier duidelijk meerdere klassen te onderscheiden zijn. Binnen deze tegels ligt dan ook waarschijnlijk zowel wad als een geul water (zie ook Figuur C.12 en Figuur C.13). De andere drie tegels laten eenzelfde signaal zien met één enkele piek met het overgrote deel van de NIR waarden tussen de 60 en 80. Het is aannemelijk dat dit wad is. Het is overigens opmerkelijk dat dit signaal niet altijd terug te zien is in de hierboven specifiek genoemde tegels, en dan in het bijzonder in tegel 210500\_608500. Bij deze tegel lijkt juist het scheidingspunt tussen land en water tussen deze waarden te liggen. Dit zou mogelijk te verklaren zijn wanneer dit signaal een soort overgangsklasse betreft (bijvoorbeeld verzadigd

wad, wad met een dun laagje water of ondiep water met veel sediment) en deze niet aanwezig is in de betreffende tegel. Het is echter lastig te zeggen om welke overgangsklasse dit dan zou gaan en of deze dus als water of land geïnclassificeerd dient te worden (wederom zou veldwerk hier uitkomst kunnen bieden). Deze specifieke tegel wordt hieronder in meer detail geanalyseerd.



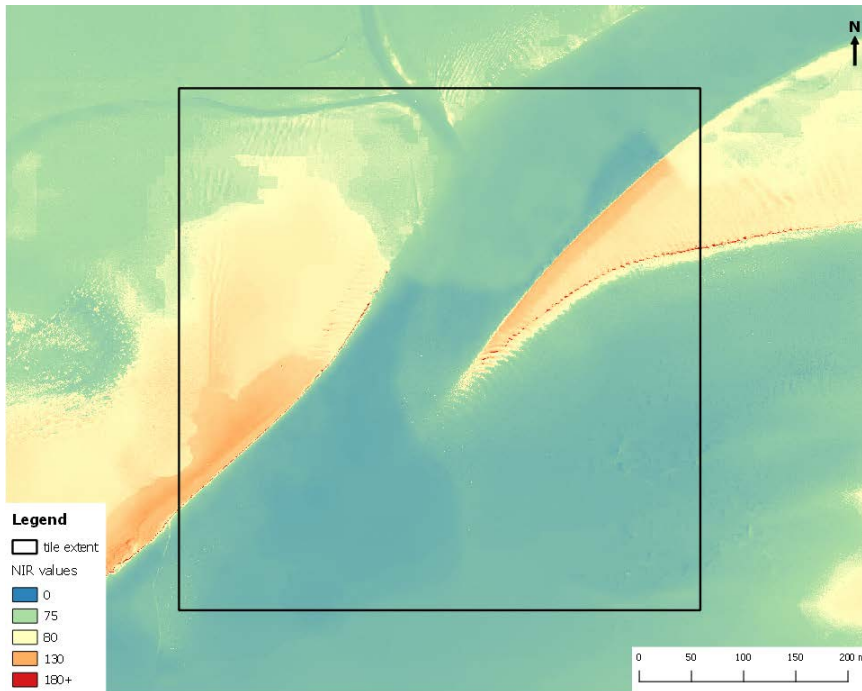
Figuur C.13 Focus gebied 1 (NIR band), inclusief een aantal individuele tegels (andere kleuren dan Figuur C.12).



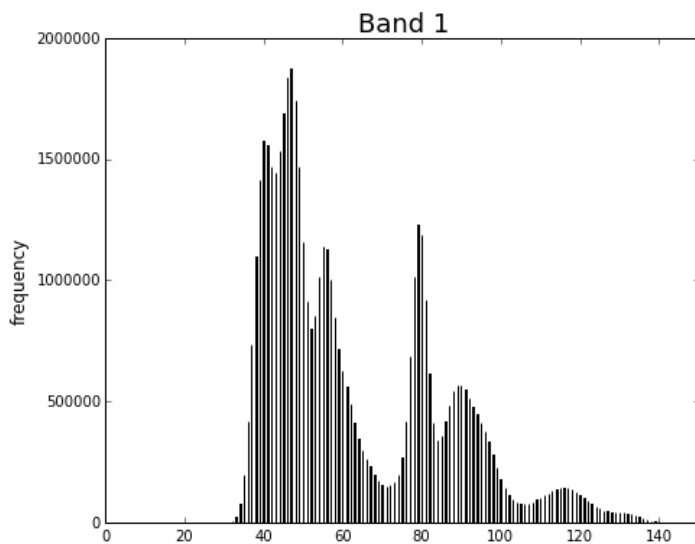
Figuur C.14 Histogrammen van de spectrale data voor de andere voorbeeld tegels binnen focus gebied 2.

## Voorbeeld tegel 210500\_608500

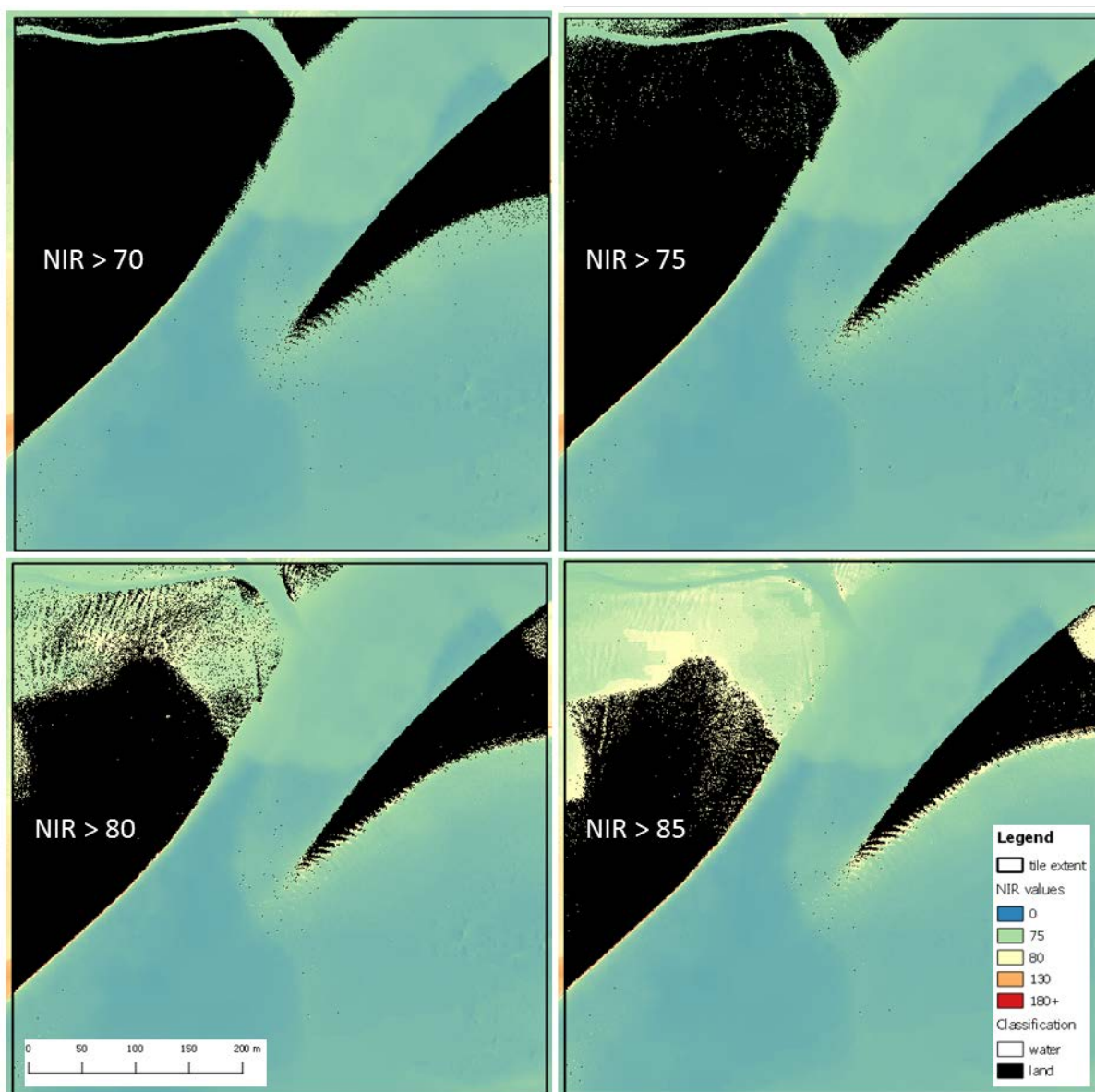
Deze tegel is weergegeven in Figuur C.15, het histogram van de data in Figuur C.16.



Figuur C.15 Tegel 210500\_608500 (NIR band).



Figuur C.16 Histogram van NIR band voor tegel 210500\_608500.



Figuur C.17 Classificatie van land (zwart) en water (transparant) op basis van de NIR band met verschillende drempelwaardes voor tegel 210500\_608500.

Op basis van het histogram in Figuur C.16 kan wederom een drempelwaarde bepaald worden. Allereerst is gebruik gemaakt van dezelfde vier drempelwaardes als bij de analyse van het vorige focus gebied. De resultaten hiervan zijn te zien in Tabel C.3 hieronder en Figuur C.17. Voor deze tegel is het verschil tussen de verschillende drempelwaardes nog groter dan bij het vorige focus gebied (16 procentpunt ten opzichte van 10 procentpunt). Uit Figuur C.17 valt op te maken dat een drempelwaarde van 85 waarschijnlijk geen goede resultaten geeft; een te groot gebied dat aannemelijk land is wordt niet zo geclassificeerd. Een drempelwaarde van 80 is niet aannemelijk als gekeken wordt naar het histogram; deze waarde ligt precies op een piek, welke waarschijnlijk juist een bepaalde klasse aangeeft. Op basis van de figuren en de tabel zou zowel 70 als 75 een aannemelijke drempelwaarde zijn, het verschil hiertussen in Figuur C.17 en Tabel C.3 is ook niet groot (1,82 procentpunt).

Tabel C.3 Statistiek classificatie met verschillende drempelwaardes voor tegel 210500\_608500,

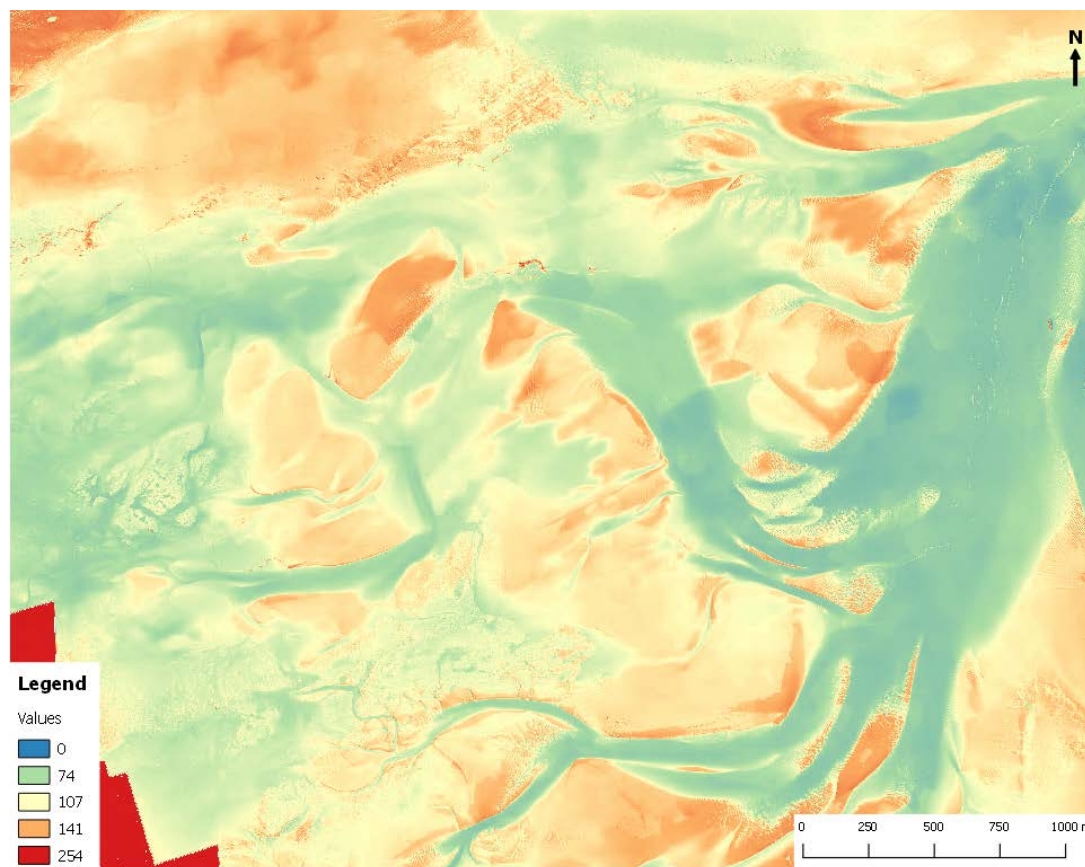
drempelwaarde	pixels land	pixels water	% land	% water
NIR > 70	17548663	33473786	34,39	65,61
NIR > 75	16618524	34403925	32,57	67,43
NIR > 80	12085015	38937434	23,69	76,31
NIR > 85	9446359	41576090	18,51	81,49

### C.4.2.3 Focus gebied 3

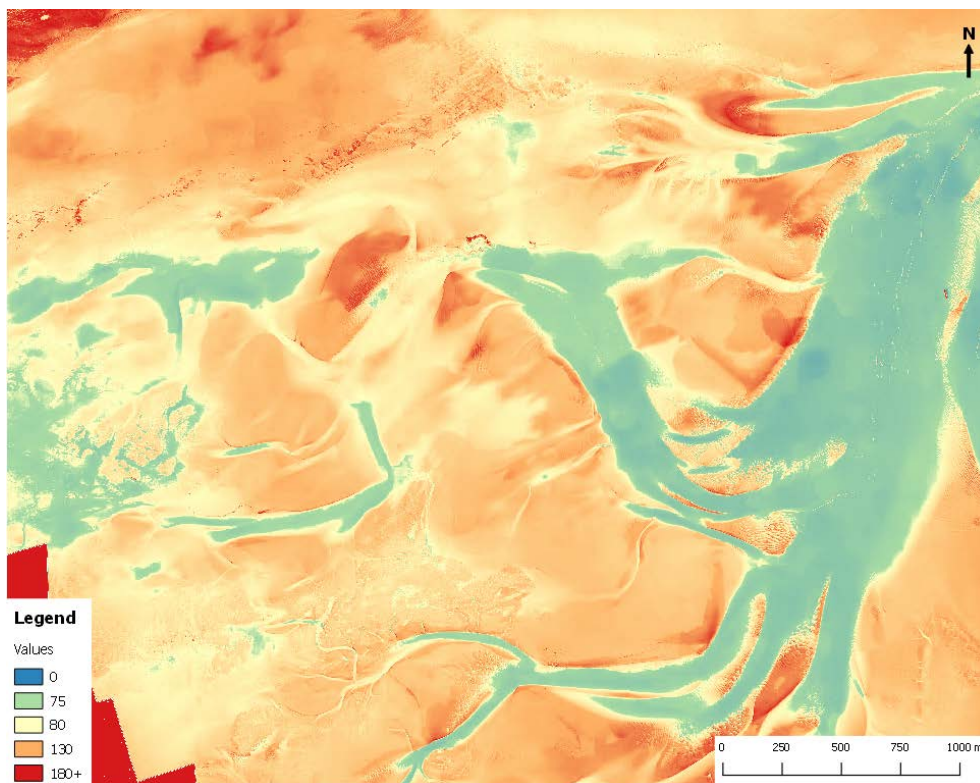
Dit gebied is weergegeven in Figuur C.18 en Figuur C.19 op de volgende pagina. Uit de kleurklassen van deze twee figuren is op te maken dat de keuze voor een drempelwaarde een grote invloed zal hebben op dit gebied. Dat wordt waarschijnlijk veroorzaakt door het feit dat er in dit gebied een relatief groot percentage bestaat uit de eerder genoemde subklassen (verzadigd wad, ondiep water).

De analyse over dit focus gebied was vergelijkbaar met die van focus gebied 2, dat hierboven uitvoerig beschreven is. Daarom zal eenzelfde uitvoerige beschrijving hier achterwege gelaten worden. Beknopt kan gesteld worden dat voor dit gebied geldt dat:

- De classificatie nog gevoeliger is voor de gekozen drempelwaarde dan bij focus gebied 2;
- Ook hier waarschijnlijk beter een van lagere drempelwaardes gekozen kan worden;
- In dit gebied niet de ruis aanwezig lijkt die gezien was bij focus gebied 1.



Figuur C.18 Focus area 3 met NIR band.



Figuur C.19 Focus gebied 3 met NIR band (andere kleuren dan Figuur C.18).

#### C.4.3 Mogelijke classificatie methoden

Op basis van bovenstaande analyse over het gehele studiegebied, de focus gebieden en de losse tegels van de data komt het beeld naar voren dat een classificatie aan de hand van de NIR band goed mogelijk moet zijn, mits de juiste drempelwaarde bepaald kan worden. Een automatische methode heeft hierbij de voorkeur omdat het om redelijk veel data gaat (1132 bestanden met een totale grootte van ongeveer 170 Gigabyte). Er kan bijvoorbeeld gedacht worden aan:

1. Het voor elke individuele tegel bepalen van het 'dalpunt' in het histogram tussen de twee (grootste) pieken;
2. Bij elke individuele tegel gebruik maken van 'image thresholding' technieken, zoals bijvoorbeeld Otsu's methode (Otsu, 1979);
3. Het gebruik van 'supervised classification' technieken over het gehele studiegebied (bijv. zoals uitgevoerd in een eerdere analyse van RGB-beelden; Vroom & Beekhuizen, 2015).

Optie 1 gaat uit van het feit dat er twee klassen aanwezig zijn in het histogram (water en land). Dit werkt goed voor histogrammen waar dit daadwerkelijk het geval is (bijv. tegel 203000\_604500), maar kan tot problemen leiden als dit niet het geval is (bijv. tegel 210500\_609500). Wanneer er slechts één piek aanwezig kan er geen dalpunt gevonden worden, wanneer er meerdere subklassen (en dus meerdere dalpunten) in een histogram aanwezig zijn, is het lastig om het juiste dalpunt voor het onderscheid tussen water en land te vinden.

Optie 2 probeert vanuit het histogram twee (in het geval van bimodale verdeling) of meerdere (in het geval van multimodale verdeling) klassen te creëren waarbij hun intra-klas variatie geminimaliseerd is. Dit kan beter werken dan optie 1 wanneer het een complex histogram betreft, maar ook deze optie zou problemen kunnen hebben met het bepalen van de

drempelwaarde uit een histogram met slechts één piek. Deze methode is eerder succesvol toegepast bij het automatisch classificeren van water en land binnen het Murray-Darling basin van Australië (Donchyts et al., 2016).

Een oplossing hiervoor is het gebruik van meerdere tegels wanneer er niet een duidelijke drempelwaarde bepaald kan worden. Ook kan gewerkt worden met een minimale en/of maximale toegestane waarde (die handmatig vastgesteld kan worden), die gebruikt wordt wanneer de automatische methode een verkeerde waarde berekend. Het zou het mooiste zijn om voor elke tegel ook een aantal naburige tegels te raadplegen, waarbij dus feitelijk gebruikt gemaakt wordt van een 'bewegend blok' van een aantal tegels. Dit heeft de voorkeur boven het maken van een histogram op basis van alle tegels, omdat de spectrale respons kan verschillen tussen bepaalde gebieden, zeker als deze op verschillende tijden en met verschillende weerscondities opgenomen zijn. Het gebruik van een 'bewegend blok' van een aantal tegels zou beter in staat moeten zijn om de mogelijk verschillende spectrale reacties van verschillende gebieden mee te nemen.

Optie 3 heeft niet de bovengenoemde problemen van opties 1 en 2, maar wel het hierboven beschreven probleem van mogelijke verschillende spectrale respons per gebieden. Zo zou bij gebruik van deze methode waarschijnlijk de afwijkende 'band' tot problemen leiden bij de classificatie, terwijl dit niet het geval hoeft te zijn bij gebruik van optie 1 of 2. Optie 3 heeft dan wel weer het voordeel dat het, met de juiste software en enig handwerk, simpel uit te voeren is en verschillende technieken goed met elkaar vergeleken kunnen worden. Het verdient wel aanbeveling om deze methode te complementeren met enig veldwerk, omdat het alleen uit de data zelf soms lastig kan zijn om juiste trainingsgebieden aan te wijzen voor deze methode.

## C.5 Conclusies

Deze analyse heeft zich gefocust op het inzicht krijgen in de beschikbare data en het onderzoeken van mogelijkheden voor een (automatische) classificatie. Een dergelijke classificatie uitvoeren voor het gehele studiegebied was echter niet één van de doelstellingen en is niet uitgevoerd.

De analyse geeft het vertrouwen dat het mogelijk moet zijn om een classificatie uit te voeren op basis van de NIR band. Deze band geeft het duidelijkste onderscheid tussen water en land. De classificaties met verschillende drempelwaardes die uitgevoerd zijn op een aantal tegels laten zien dat het goed mogelijk is om een classificatie van water en land te maken, mits de drempelwaarde goed bepaald is.

Het is interessant om het verschil tussen de genoemde methoden te onderzoeken voor een classificatie. Verwacht wordt dat een methode op basis van 'image thresholding' zoals Otsu's methode een beter resultaat zal geven dan een 'supervised classification' methode, zeker wanneer deze met een 'bewegend blok' over het studiegebied uitgevoerd wordt, maar of dit daadwerkelijk het geval is (en hoe groot het verschil is) zal alleen blijken wanneer beide methodes toegepast en met elkaar vergeleken worden. Hoewel de NIR band waarschijnlijk voldoende informatie heeft om een goede classificatie uit te voeren zou in de toekomst nog gekeken kunnen worden naar toevoeging van een visuele rode band aan de data. De combinatie van de NIR en visuele rode band zouden het effect van golven en sediment tegen kunnen gaan, waardoor de classificatie beter kan verlopen (Ryu et al., 2002). Hier dient echter pas naar gekeken te worden nadat een daadwerkelijke classificatie uitgevoerd, geanalyseerd en getoetst is, omdat het wellicht overbodig is.



## **D Appendix D; Analyse van de a.d.h.v. LiDAR gemeten verandering in wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag**

Appendix D is bijgevoegd als apart document.