

# Memo

**Aan**  
Harry Piening, Wim van der Veen, Jeroen Jansen

<b>Datum</b>	<b>Kenmerk</b>	<b>Aantal pagina's</b>
10 augustus 2017	11200469-000-ZKS-0006	30
<b>Van</b>	<b>Doorkiesnummer</b>	<b>E-mail</b>
Reinier Schrijvershof	+31(0)88335 7483	reinier.schrijvershof@deltares.nl

**Onderwerp**  
Memo n.a.v. aandachtspunten rapport Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2016)

## 1 Aanleiding

Sinds 2010 wordt er jaarlijks een morfologische analyse van de wadplaten in het Friesche Zeegat uitgevoerd in het kader van de monitoring van de effecten van bodemdaling. De analyse wordt uitgevoerd aan de hand van LiDAR data van de kombergingsgebieden van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. De LiDAR data wordt sinds 2010 één of twee keer per jaar opgenomen. Tabel 1.1 geeft een overzicht van alle LiDAR opnamen en de referenties van de rapportages die de morfologische analyse beschrijven.

Tabel 1.1 Overzicht van de LiDAR opnamen en analyserapporten.

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

De auditcommissie van de Milieu Effect Rapportage (MER) heeft aan de hand van de meest recente rapportage van de morfologische analyse (Schrijvershof et al., 2017) een aantal belangrijke opmerkingen gemaakt:

1. Er is in de rapportage een beschouwing van de meetnauwkeurigheid gegeven. De beschouwing verwijst echter naar een analyse van de meetnauwkeurigheid die ook gebruikt maakt van datasets die foutief of minder nauwkeurig zijn;
2. Er wordt een afname van ongeveer 20% van het areaal hoger gelegen wadplaat en een toename van het areaal lager gelegen wadplaat in het kombergingsgebied van het Pinkegat vastgesteld; er is in het rapport echter geen aandacht besteed aan deze grote verandering;

3. Er wordt een mogelijke kanteling van de LiDAR meetgegevens verondersteld, maar een analyse naar de mogelijke oorzaak hiervan ontbreekt en er wordt geen onderbouwing gegeven van het vermoeden van de kanteling;
4. Het proces van data inwinnen, verwerken en analyse is momenteel onvoldoende duidelijk weergegeven, hier kan niet opgemaakt worden op het huidige proces voldoet.

De MER-auditcommissie wil graag samen met de NAM en Deltares overleggen over deze punten voordat zij haar advies uitbrengt. De auditcommissie heeft, ter voorbereiding op dit gesprek, een informatieverzoek ingediend aangaande deze aandachtspunten. Het informatieverzoek omvat:

1. Een aangepaste analyse van de meetnauwkeurigheid waarbij de datasets die als foutief worden beschouwd (Najaar 2014 en Najaar 2015) of onnauwkeuriger zijn (voor Najaar 2013) niet meegenomen worden.
2. Presentatie van Figuur 5.6 (lineaire trendanalyse) en Figuur 6.2 t/m 6.5 (hypsometrische curven en balkdiagrammen) zonder de datasets die als foutief worden beschouwd (Najaar 2014 en Najaar 2015).
3. Een toelichting waarom aan een mogelijke kanteling van de meetresultaten over 2015 en 2016 wordt gedacht en een analyse van de mogelijke oorzaken hiervan.
4. Een stapsgewijs overzicht van het werkproces van data-inwinning, verwerking en analyse en de rol van alle betrokken partijen hierbij.

Het voorliggende memo gaat in op de genoemde aandachtspunten en levert daarmee de informatie benodigd voor het gesprek tussen Auditcommissie, NAM en Deltares. De bovenstaande punten aangaande het informatieverzoek worden in Hoofdstuk 2 van dit memo in eenzelfde volgorde behandeld.

## 2 Aandachtspunten

### 2.1 Meetnauwkeurigheid

In Tabel 2.1 zijn de gemiddelden (verwachtingswaarden) en de standaardafwijkingen voor de verschilkaarten van opeenvolgende LiDAR opnamen weergegeven, in Figuur 2.1 zijn de gegevens gevisualiseerd als balkdiagrammen. De LiDAR opnamen van Najaar 2014 en Najaar 2015 zijn uitgesloten van de analyse omdat deze datasets aantoonbare fouten bevatten (gemeten tijdens te hoge waterstand). De verschilkaarten van Zomer 2015 – Voorjaar 2014 en Voorjaar 2016 – Zomer 2015 omvatten daardoor een iets langere periode tussen de opnamen dan dat het geval is bij de andere verschilkaarten.

Het gemiddelde van de standaardafwijking van de verschilkaarten is 6,8 cm. In Schrijvershof (2016) is aangetoond dat de waarden van/in de verschilkaarten min of meer normaal verdeeld zijn rond het gemiddelde van de verschillen. Bij een normale verdeling ligt 68% van de waarnemingen tussen de waarden van het gemiddelde plus of min de standaardafwijking ( $\mu - \sigma$  en  $\mu + \sigma$ ). Een indicatie van de (on)nauwkeurigheid van de een individuele LiDAR opname (geheel kaartbeeld) kan dan gegeven worden door het gemiddelde van de standaardafwijkingen te delen door de wortel van het aantal observaties ( $\sqrt{2}$ ). Wanneer alle verschilkaarten in Tabel 2.1 beschouwd worden volgt hier uit dat de (on)nauwkeurigheid van een individueel LiDAR kaartbeeld 4,8 cm is.

Sinds de LiDAR opname van Najaar 2013 is er een andere scanner gebruikt die heeft gezorgd voor een betere dekking van het te meten oppervlak. Deze betere dekking heeft er in geresulteerd dat streepatronen in de richting van de vliegbanen nauwelijks te onderscheiden zijn in de datasets. Er kan daarom beargumenteerd worden dat de LiDAR opnamen die sinds 2013 zijn verzameld een grotere nauwkeurigheid hebben dan de oudere LiDAR opnamen. De streepatronen worden namelijk veroorzaakt door verschillen die geen gevolg kunnen zijn van de verandering van de morfologie, en dus door de meettechniek moeten zijn veroorzaakt. Er is in de oudere datasets dus een grote variatie tussen vergridde bodemhoogtepunten als gevolg van het inmeten dan het geval is voor de recentere datasets.

Wanneer de berekening voor een benadering van de nauwkeurigheid uitgevoerd wordt voor verschilkaarten die enkel geproduceerd zijn aan de hand van LiDAR opnamen vanaf Najaar 2013 levert dit een benadering van de nauwkeurigheid van 4,6 cm.

In Schrijvershof (2016) is op eenzelfde wijze, maar met een andere selectie van datasets, een benadering van de nauwkeurigheid van individuele kaartbeelden van 5,11 cm gegeven. Het blijkt dat de methode verschillende waarden geeft afhankelijk van de selectie van de datasets, het is daarom niet mogelijk door middel van deze methode een eenduidige indicatie te vinden voor de nauwkeurigheid van de LiDAR gegevens. Het wordt uit de analyses wel duidelijk dat de methode een benadering van de meetnauwkeurigheid oplevert die rond de 5 cm ligt. Een afgeronde waarde van 5 cm is een betere indicatie van de meetnauwkeurigheid dan een waarde die tot achter de komma is gespecificeerd.

Ten slotte moeten wij een aantal opmerkingen maken over de berekeningen:

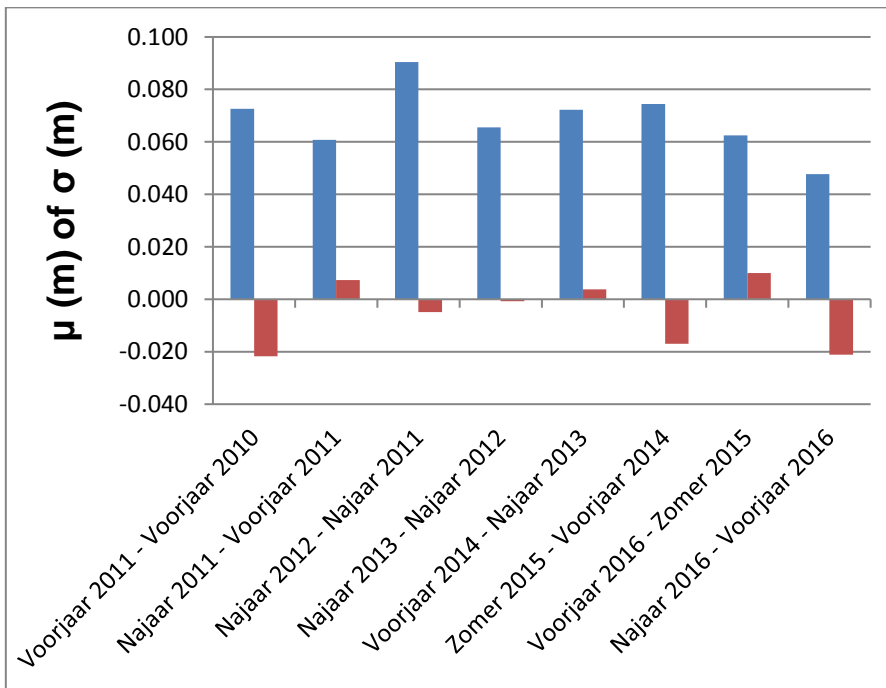
- 1 De methode geeft alleen een indicatie over de nauwkeurigheid van de metingen. Het verschil tussen twee metingen wordt primair veroorzaakt door morfologische veranderingen over de periode tussen de twee metingen, daar bij zit er altijd een zekere

- fout in de waarnemingen. De gebruikte methode geeft dus in eerste instantie informatie over de variatie welke een gevolg is van morfologische veranderingen en kan dus enkel een bovengrens van de meetonnauwkeurigheid geven.
- 2 De methode zegt alleen iets over de stochastische fout (onnauwkeurigheid) van de metingen. Het is een statistische analyse van de veranderingen van kleine cellen van 10x10 m. Het zegt dus niets over een eventuele systematische fout in de data.
  - 3 De indicatie voor de nauwkeurigheid is van toepassing op de geaggregeerde (vergridde) data, en dus niet op de individuele LiDAR (punt) metingen. De punt dichtheid van de metingen is gemiddeld ongeveer 4 punten per m<sup>2</sup>. Per rooster cel van 10x10 m zijn er dus ongeveer 400 punten. Theoretisch zou de stochastische meetonnauwkeurigheid van de individuele puntmeting dan ongeveer 20 keer zo groot zijn als die van de vergridde data.
  - 4 De schatting in opmerking 3 is duidelijk niet realistisch. In werkelijkheid zijn de meetfouten van de individuele LiDAR metingen niet zuiver stochastisch verdeeld, maar hebben een ruimtelijke variatie met verschillende schalen. Dit heeft te maken met de manier waarop de metingen zijn uitgevoerd: verschillende vliegbanen, per opname een gebied van bepaalde grootte tegelijk wordt gemeten. De berekende standaardafwijkingen geven daarom alleen een indicatie van de meetfouten die een ruimtelijke schaal van orde 10 m hebben.

De conclusie uit de analyse is dus dat de bovengrens van de stochastische fout van de LiDAR metingen met een ruimtelijke schaal van orde 10 m, 5 cm is.

Tabel 2.1 Gemiddelde en standaardafwijking van de verschilwaarden van opeenvolgende vergride LiDAR kaartbeelden, met uitsluitel van de opnamen van Najaar 2014 en Najaar 2015.

Verschilkaart	$\mu$ (m)	$\sigma$ (m)
Voorjaar 2011 - Voorjaar 2010	-0.022	0.073
Najaar 2011 - Voorjaar 2011	0.007	0.061
Najaar 2012 - Najaar 2011	-0.005	0.090
Najaar 2013 - Najaar 2012	-0.001	0.066
Voorjaar 2014 - Najaar 2013	0.004	0.072
Zomer 2015 - Voorjaar 2014	-0.017	0.074
Voorjaar 2016 - Zomer 2015	0.010	0.062
Najaar 2016 - Voorjaar 2016	-0.021	0.048
<b>Gemiddelde</b>	<b>-0.006</b>	<b>0.068</b>

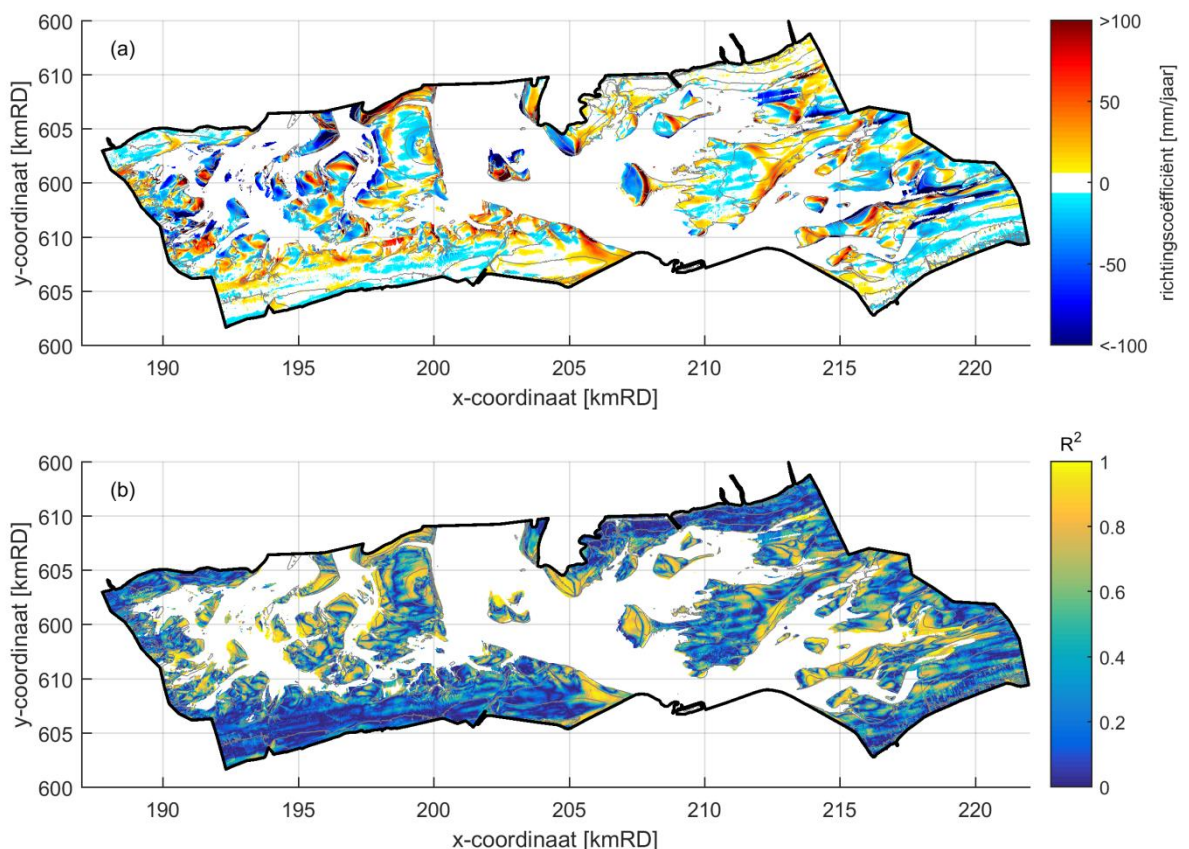


Figuur 2.1 Balkdiagram van de waarden van de standaardafwijking (blauw) en het gemiddelde (rood) van de verschilkaarten.

## 2.2 Afname areaal hoger gelegen plaatoppervlak Pinkegat

### 2.2.1 Lineaire trendanalyse

Figuur 2.2 toont het resultaat van de lineaire trendanalyse over de periode 2010-2016. De analyse is opnieuw uitgevoerd waarbij de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015 zijn uitgesloten van de trendberekeningen. Een trendberekening is alleen uitgevoerd als er voor een roosterpunt minimaal drie datapunten aanwezig zijn. De kleurenbalk die de bodemverandering aangeeft is afgekapt op 100 mm/jaar zodat kleine veranderingen ook zichtbaar worden. De lineaire trendanalyse laat met uitsluiting van de twee datasets geen wezenlijke verschillen zien met de trendanalyse zoals deze in Schrijvershof et al. (2017) is gepresenteerd. Het uitsluiten van de twee datasets die als foutief worden beschouwd leiden dus niet tot andere conclusies dan in Schrijvershof et al. (2017) gegeven.



*Figuur 2.2 Trend in de verandering in bodemligging in mm/jaar (a) en de determinatiecoëfficiënt van de lineaire regressie (b). De datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015 zijn uitgesloten van de berekening en een trend is enkel berekend als er minimaal drie van de totaal negen mogelijke datapunten aanwezig zijn voor een roostercel. Een trend van 0 mm/jaar geeft een  $r^2$  waarde van 0.*

## 2.2.2 Hypsometrische curven

De hypsometrische curven en diagrammen van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag zijn opnieuw berekend en gevisualiseerd zonder de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015. Deze curven worden, net zoals in de rapportage van de analyse, berekend aan de hand van de datasets waarbij 10x10 m roostercellen die geen waarde hebben (doordat er geen data ingemeten is), een waarde toegekend hebben gekregen door middel van interpolatie. Om mogelijke effecten van de interpolatie te duiden zijn dezelfde curves en histogrammen ook berekend aan de hand van de originele datasets, waar bij gaten in de datasets niet zijn opgevuld door middel van interpolatie. De analyse wordt gewoonlijk uitgevoerd aan de hand van de geïnterpoleerde datasets omdat gaten in de datasets er voor zorgen dat er geen één op één vergelijking kan plaatsvinden tussen verschillende LiDAR opnamen. In Schrijvershof et al. (2017) is echter opgemerkt dat het interpoleren van de data ook kan leiden tot interpolatieartefacten. Lokale depressies van de wadplaten kunnen namelijk slechter ingemeten kunnen worden met de LiDAR techniek doordat er water in deze depressies blijft staan. De interpolatieprocedure kent aan zulke gebieden dan een te hoge bodemligging toe. Datasets met een lagere dekking van de komberginsgebieden (groter aantal 10x10m roostercellen zonder waarde; de oudere datasets) kunnen dus een te hoge bodemligging toegekend krijgen.

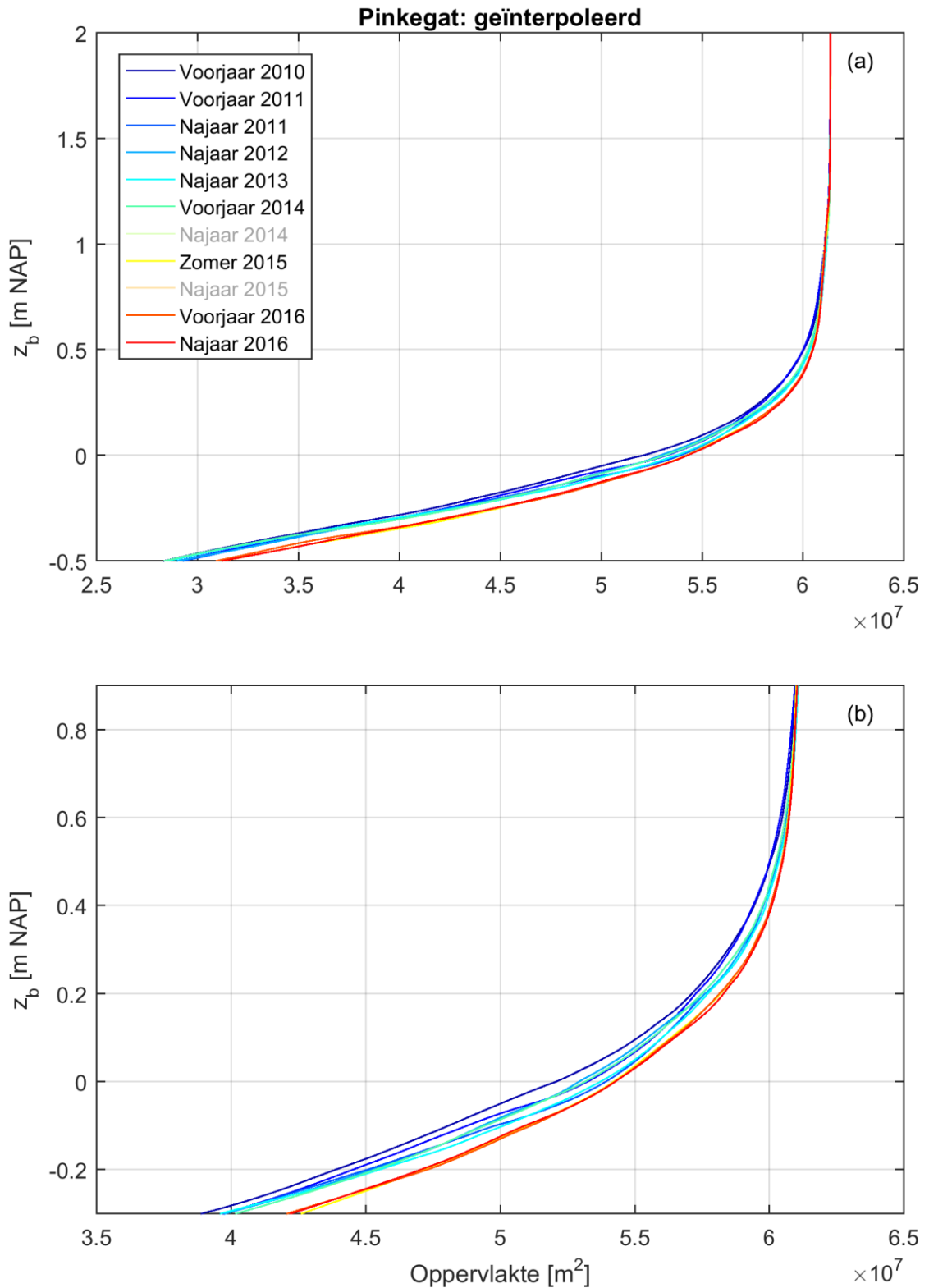
De hypsometrische curven van het Pinkegat (Figuur 2.3 (geïnterpoleerd) en Figuur 2.4 (niet geïnterpoleerd)) tonen duidelijk dat de curven van de geïnterpoleerde datasets van 2010 en 2011 beduidend hoger liggen dan de niet geïnterpoleerde datasets. Het verschil kan meer dan 5 centimeter bedragen. Dit is zeer waarschijnlijk te wijten aan bovengenoemd interpolatieartefact. Een goede vergelijking tussen datasets kan dus eigenlijk alleen gebeuren tussen datasets die een niet te groot verschil in dekking hebben (zie hiervoor Tabel 3.1 in Schrijvershof et al. (2017)). Dit zijn de datasets die sinds 2013 zijn verzameld.

Wanneer de recentere curven worden vergeleken valt het op dat de curven van de datasets sinds zomer 2015 bijna geheel onder curven van 2013 en Voorjaar 2014 vallen. Een dergelijke verschuiving van de hypsometrische curven geeft aan dat er een verlaging van de platen in het kombergingsgebied plaats moet hebben gevonden in deze periode.

De berekende arealen per hoogteklaas zijn voor het Pinkegat weergegeven in Figuur 2.5. De verdeling van de hoogteklassen is hier iets anders toegepast dan in Schrijvershof et al. (2017), daar werden namelijk hoogteklassen van -0,6 tot 1,6 m NAP met intervallen 20 centimeter weergegeven. Alle bodemhoogtepunten die lager gelegen zijn dan -0,5 m NAP zijn echter verwijderd uit de datasets. Er is daarom gekozen om de hoogteklassen met intervallen van 25 centimeter te verdelen over het gehele hoogtebereik van de LiDAR metingen (-0,5 tot 2 m NAP).

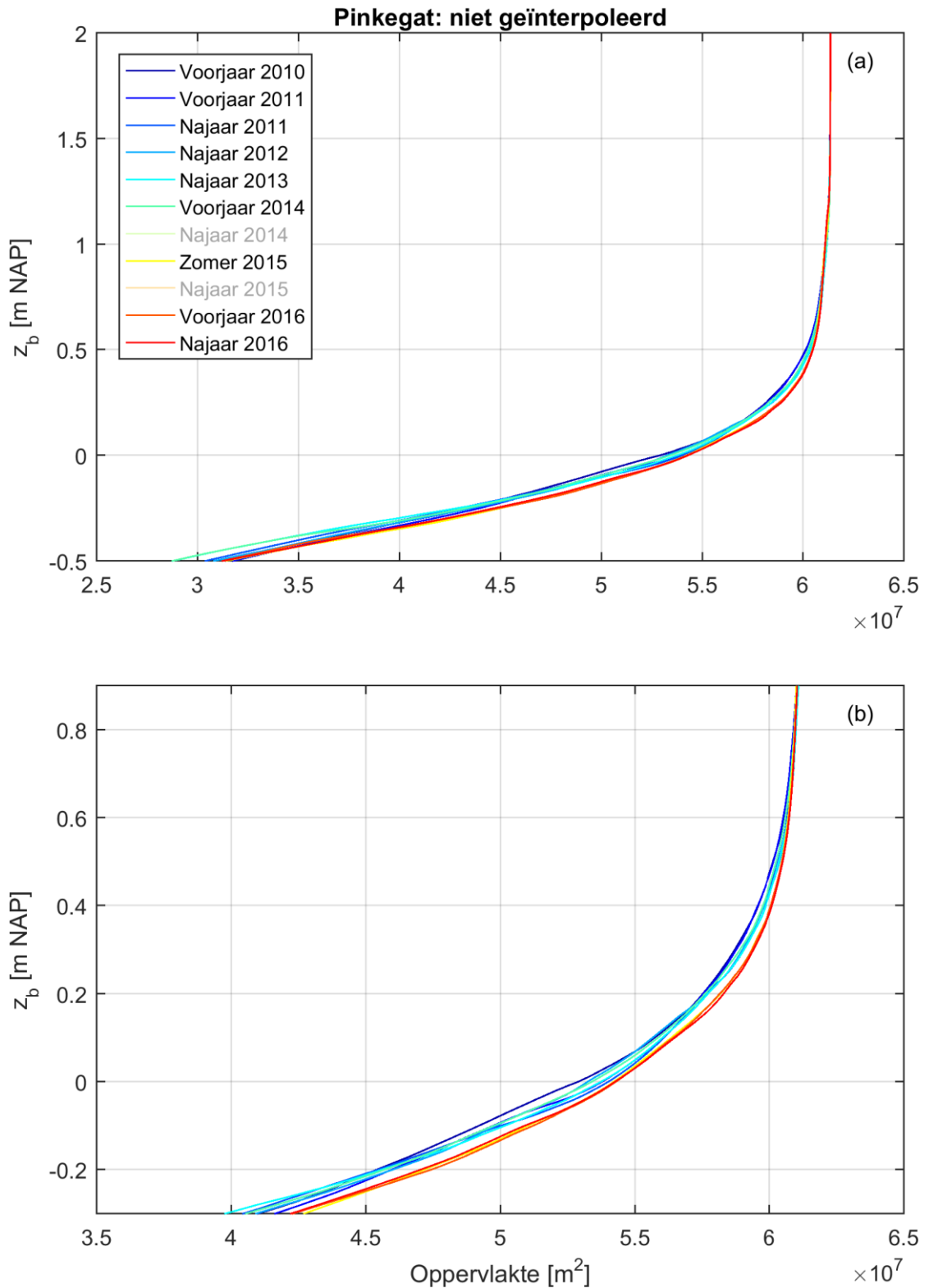
In Figuur 2.6 zijn trendberekeningen weergegeven die uitgevoerd zijn voor de berekende arealen per hoogteklaas, de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015 zijn niet meegenomen in deze trendberekeningen. Uit de trendberekeningen komt duidelijker naar voren dat er een afnemende trend in areaal is voor bijna alle hoogteklassen, ook wanneer de trend berekend zou worden aan de hand van de datasets sinds 2013 zal er voornamelijk een afnemende trend waargenomen worden. Daarbij moet wel opgemerkt worden dat de lineaire regressielijnen voor veel hoogteklassen niet altijd de goede benadering zijn van de trend (zie  $r^2$  waarden). De trend wordt wel redelijk gepresenteerd door de lineaire regressie voor de hoogteklassen 0,25-0,50; 0,50-0,75; 1,50-1,75.



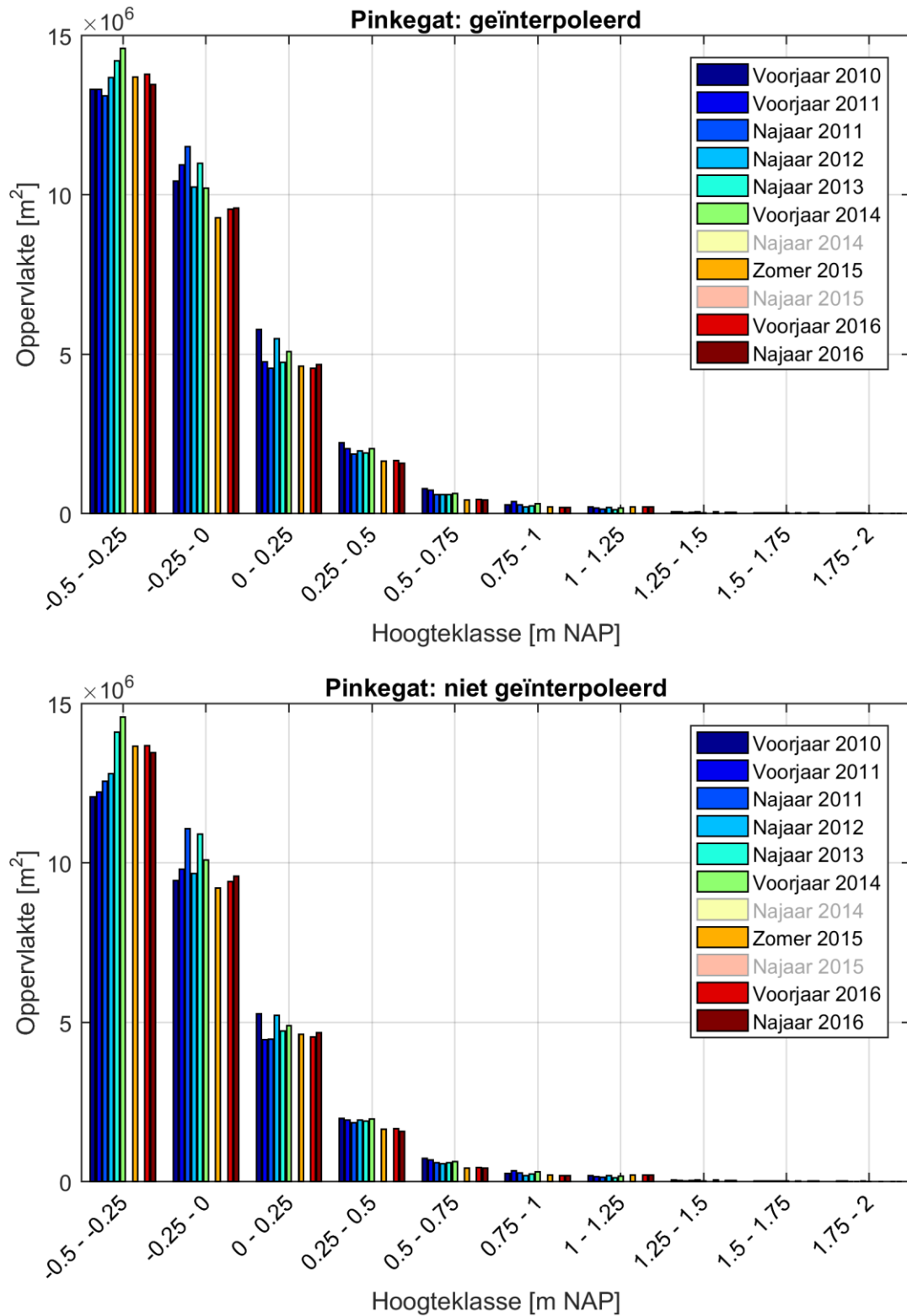


Figuur 2.3 Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Pinkegat aan de hand van de geïnterpoleerde datasets voor het gehele hoogtebereik van de metingen (a) en een zoom (b). Curven zijn weergegeven voor alle LIDAR opnamen met uitsluiting van de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015.

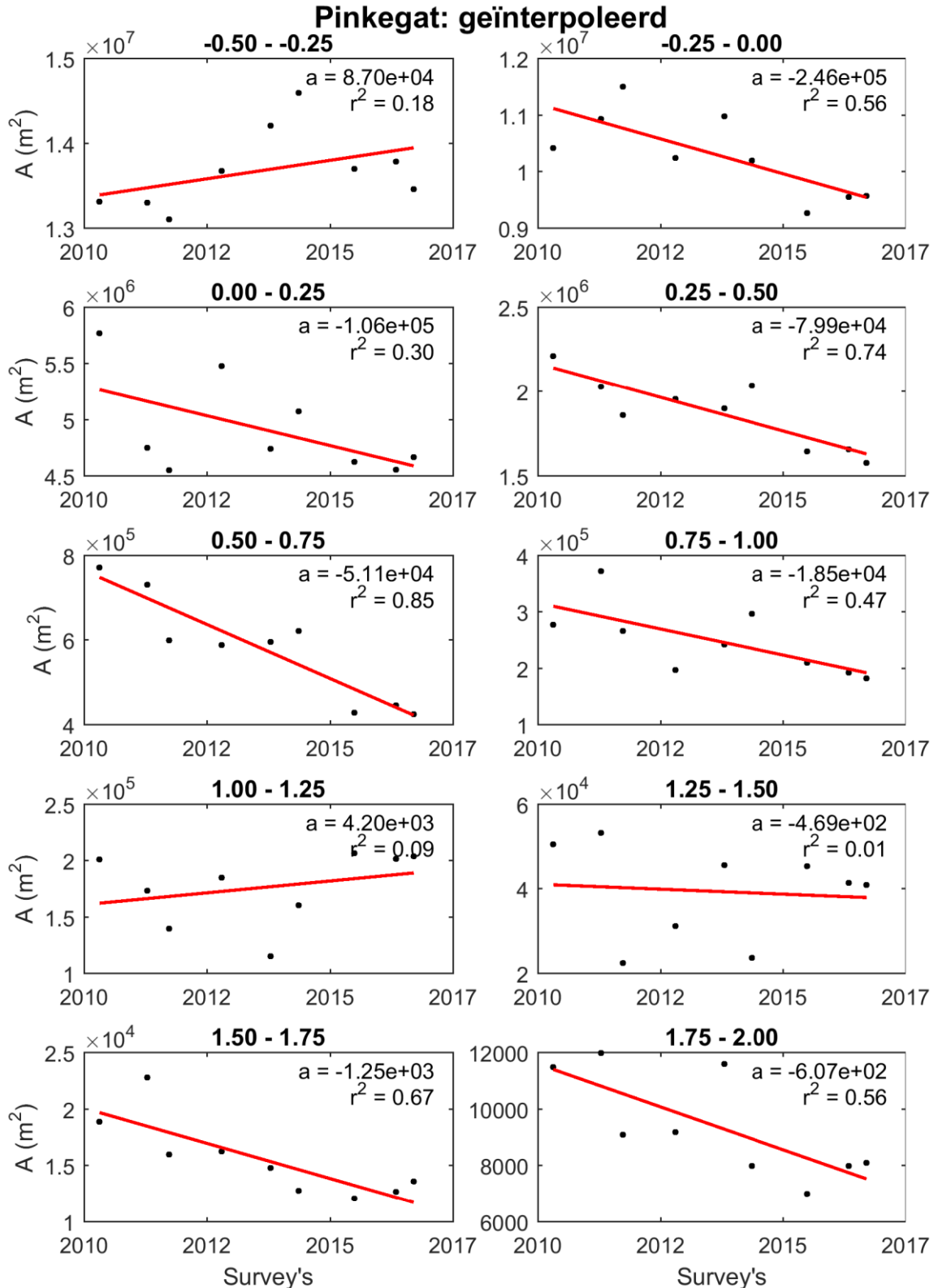




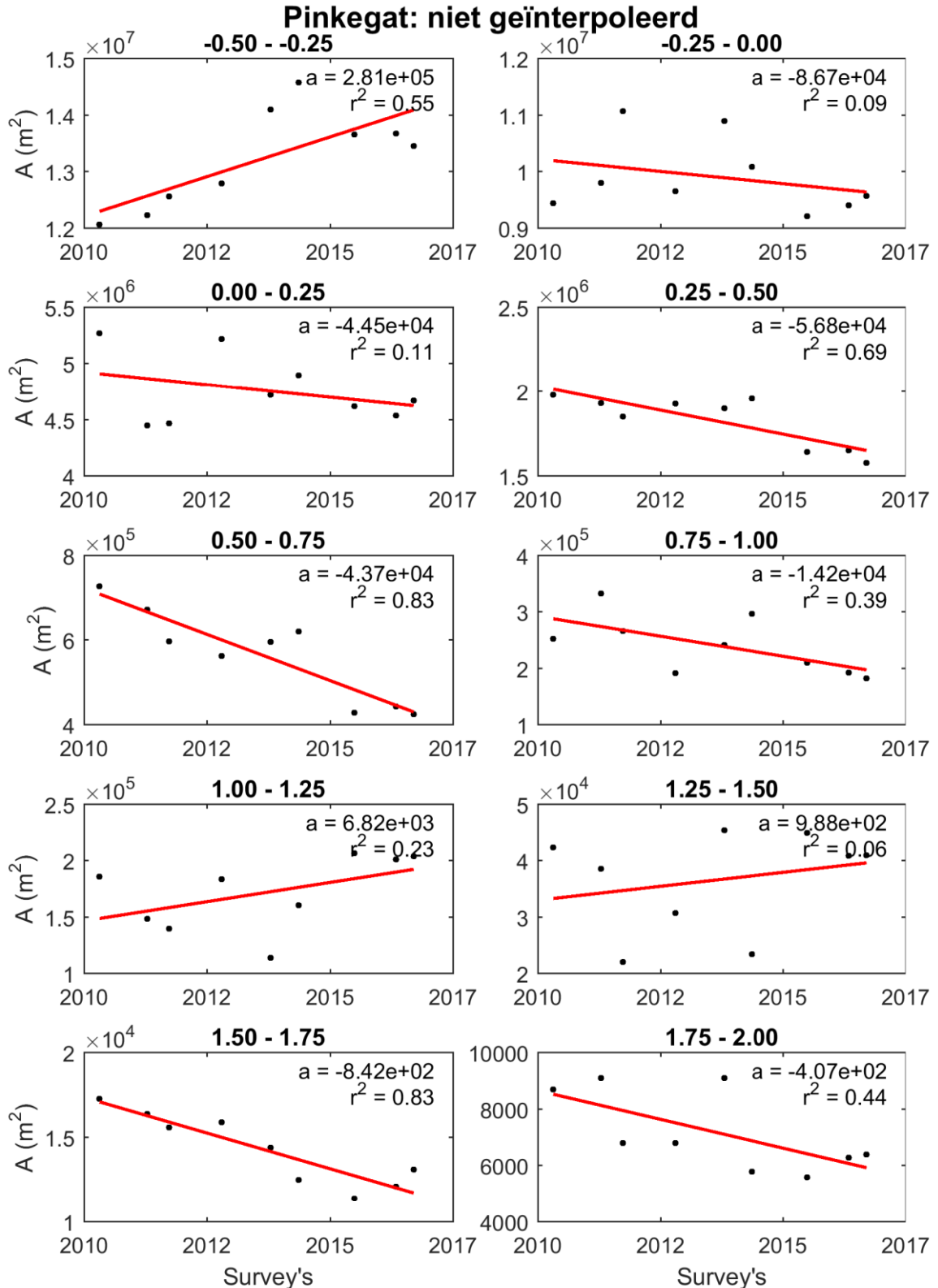
Figuur 2.4 Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Pinkegat aan de hand van de niet geïnterpoleerde datasets voor het gehele hoogtebereik van de metingen (a) en een zoom (b). Curven zijn weergegeven voor alle LiDAR opnamen met uitsluiting van de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015.



Figuur 2.5 Histogrammen per hoogteklasse voor het kombergingsgebied Pinkegat, voor geïnterpoleerde datasets (boven) en niet-geïnterpoleerd datasets (onder).



Figuur 2.6 Scatterplots van de berekende arealen per hoogteklasse voor het Pinkegat. De rode lijn geeft de lineaire regressielijn door de punten,  $a$  is de regressiecoëfficiënt ( $m^2/jaar$ ),  $r^2$  de determinatiecoëfficiënt.

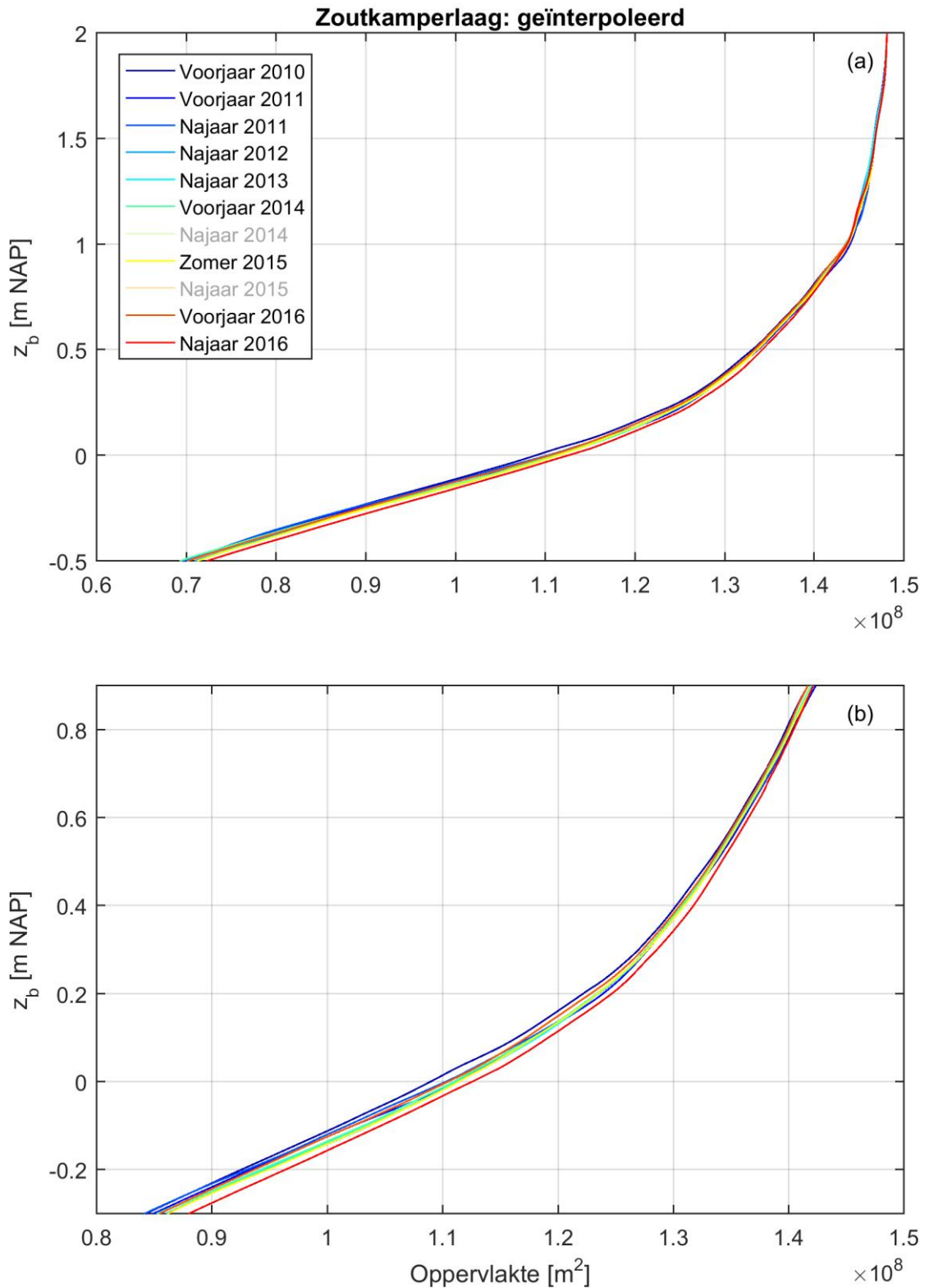


Figuur 2.7 Scatterplots van de berekende arealen per hoogteklasse voor het Pinkegat. De rode lijn geeft de lineaire regressielijn door de punten, a is de regressiecoëfficiënt, r² de determinatiecoëfficiënt.

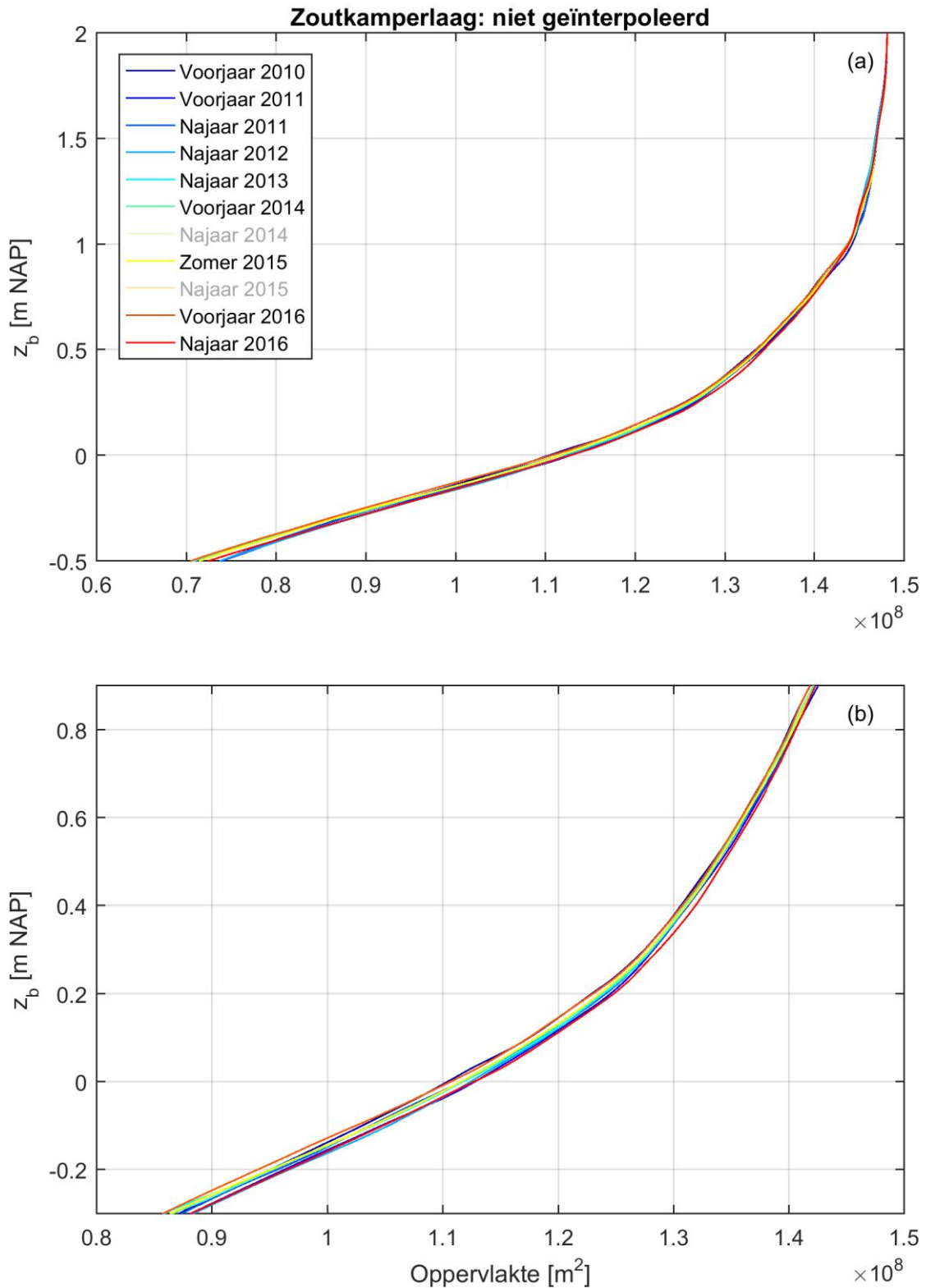
De hypsometrische curven van de Zoutkamperlaag (Figuur 2.8 (geïnterpoleerd) en Figuur 2.9 (niet geïnterpoleerd)) tonen eveneens dat de oudere datasets verschillen in hypsometrie, het verschil is echter wel kleiner dan de curven van het Pinkegat laten zien. Ook voor deze curven geldt wel dat de datasets sinds 2013 beter onderling vergeleken kunnen worden.

Uit de figuren blijkt dat de curve van de opname van Voorjaar 2016 bovenin de set aan curven ligt. De curve van de opname van Najaar 2016 bevindt zich onderin de set. Dit is in overeenstemming met de waargenomen bodemverandering uit de erosie-sedimentatiekaarten (zie hiervoor ook Paragraaf 2.3).

De arealen per hoogteklaas (Figuur 2.10 tot en met Figuur 2.12) geven aan dat er voor het komberginsgebied Zoutkamperlaag geen sterke trendmatige afname of toename over alle hoogteklassen is te ontdekken, in tegenstelling tot het Pinkegat.

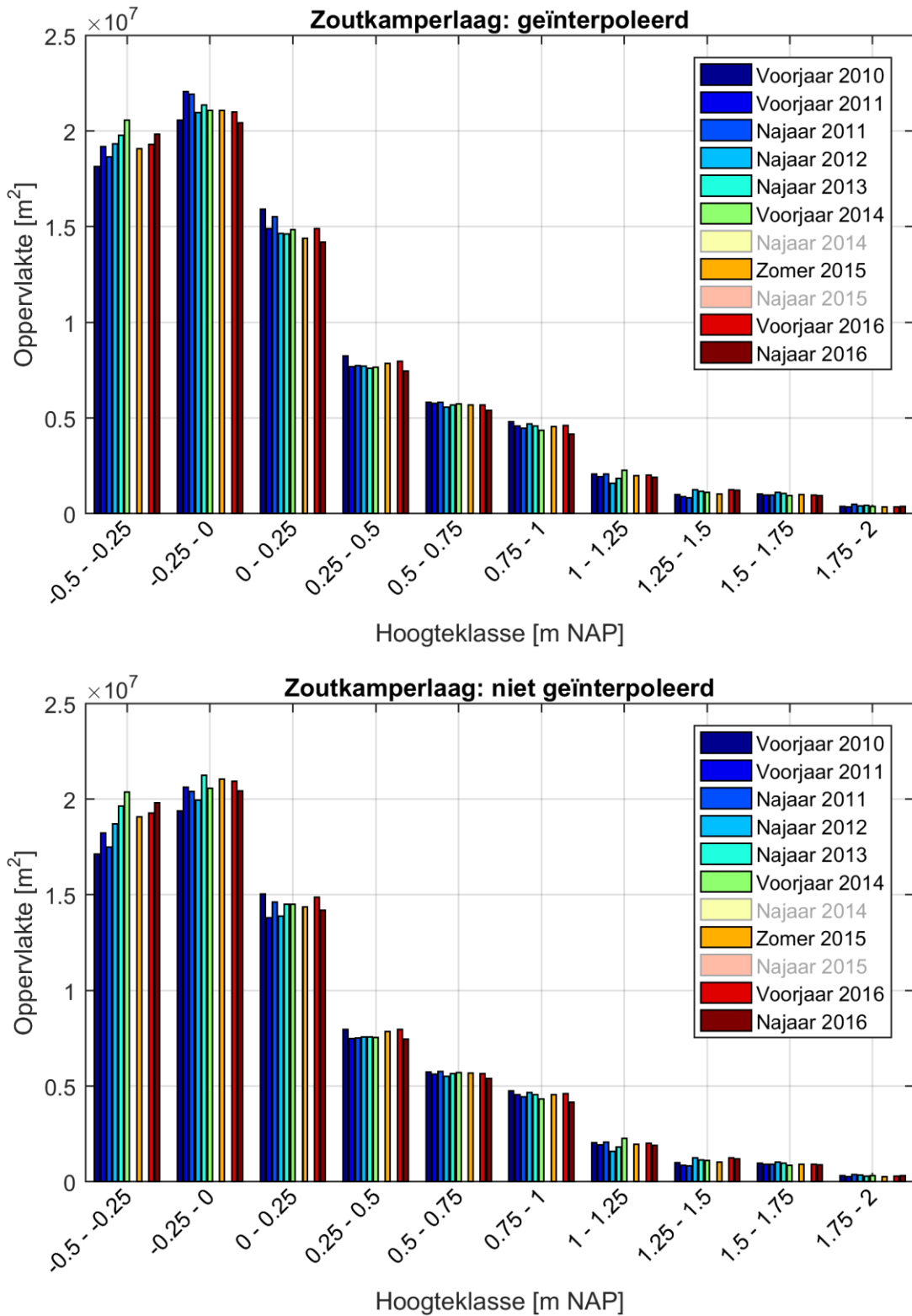


Figuur 2.8 *Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag aan de hand van de geïnterpoleerde datasets voor het gehele hoogtebereik van de metingen (a) en een zoom (b). Curven zijn weergegeven voor alle LiDAR opnamen met uitsluiting van de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015.*

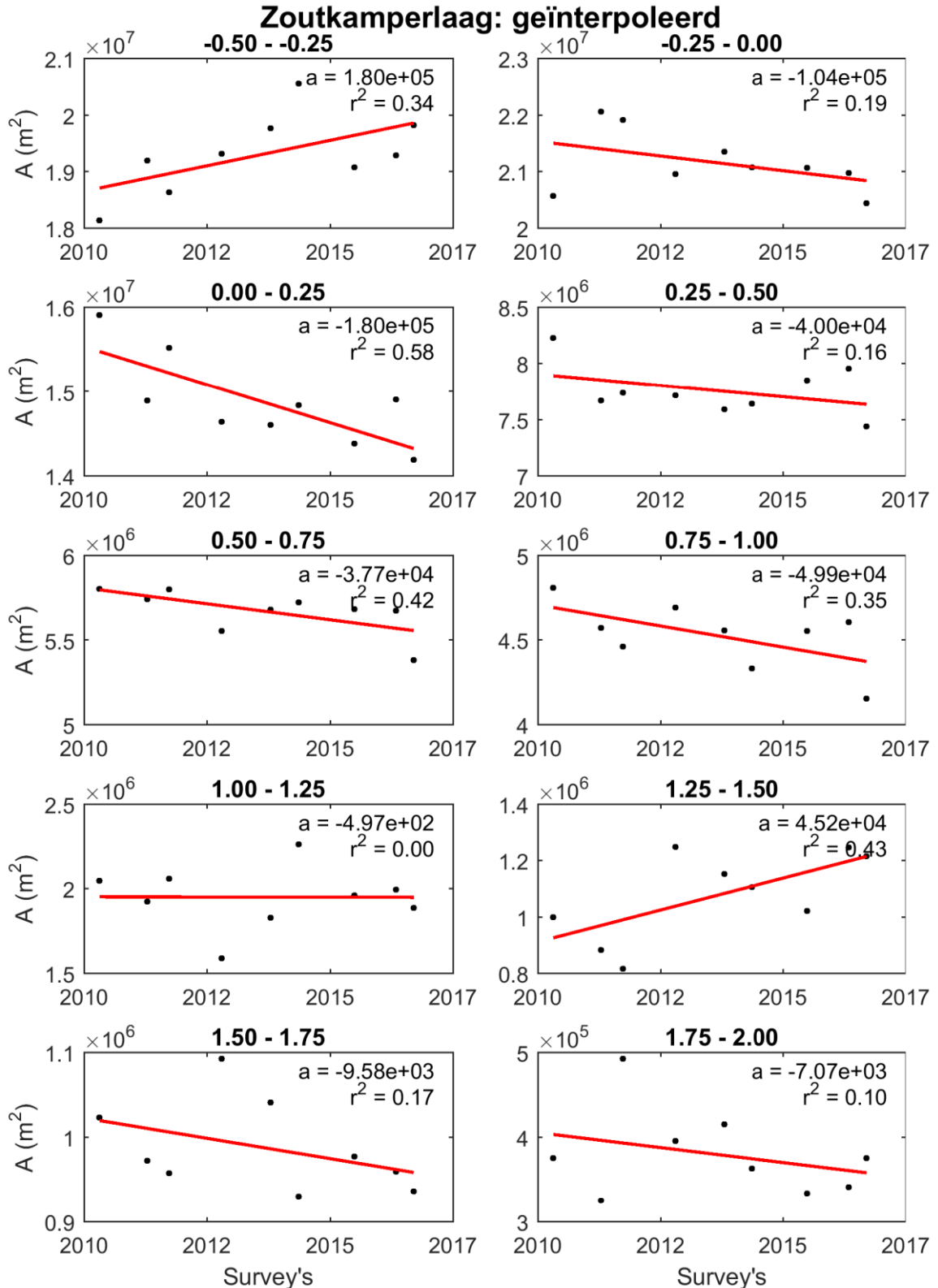


Figuur 2.9 Hypsometrische curven voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag aan de hand van de niet geïnterpoleerde datasets voor het gehele hoogtebereik van de metingen (a) en een zoom (b). Curven zijn weergegeven voor alle LiDAR opnamen met uitsluiting van de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015.

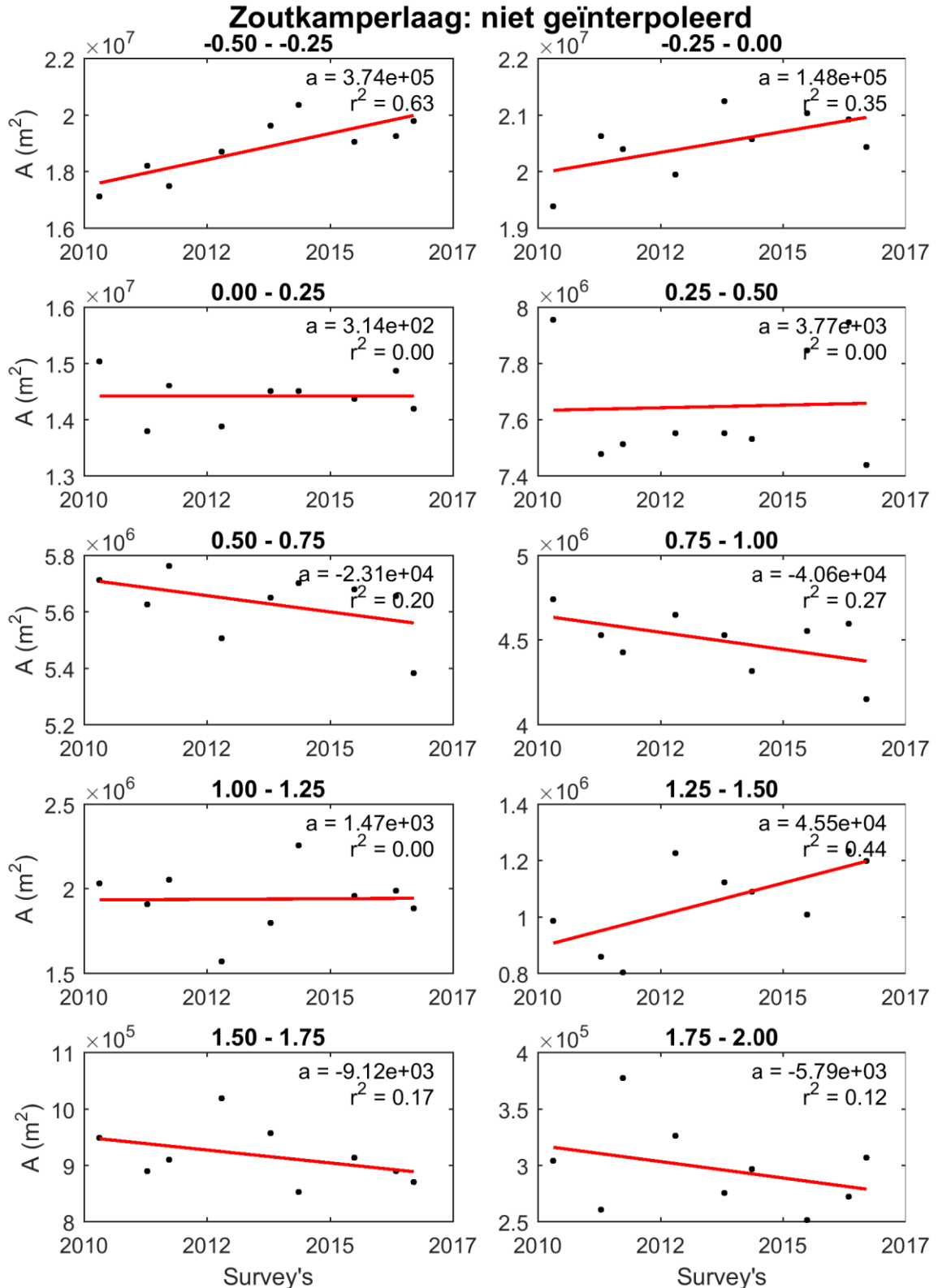




Figuur 2.10 Histogrammen per hoogteklasses voor het kombergingsgebied Pinkegat aan de hand van de geïnterpoleerde datasets met uitsluiting van de datasets van Najaar 2014 en Najaar 2015.



Figuur 2.11 Scatterplots van de berekende arealen per hoogteklasse voor de Zoutkamperlaag. De rode lijn geeft de lineaire regressielijn door de punten,  $a$  is de regressiecoëfficiënt,  $r^2$  de determinatiecoëfficiënt.

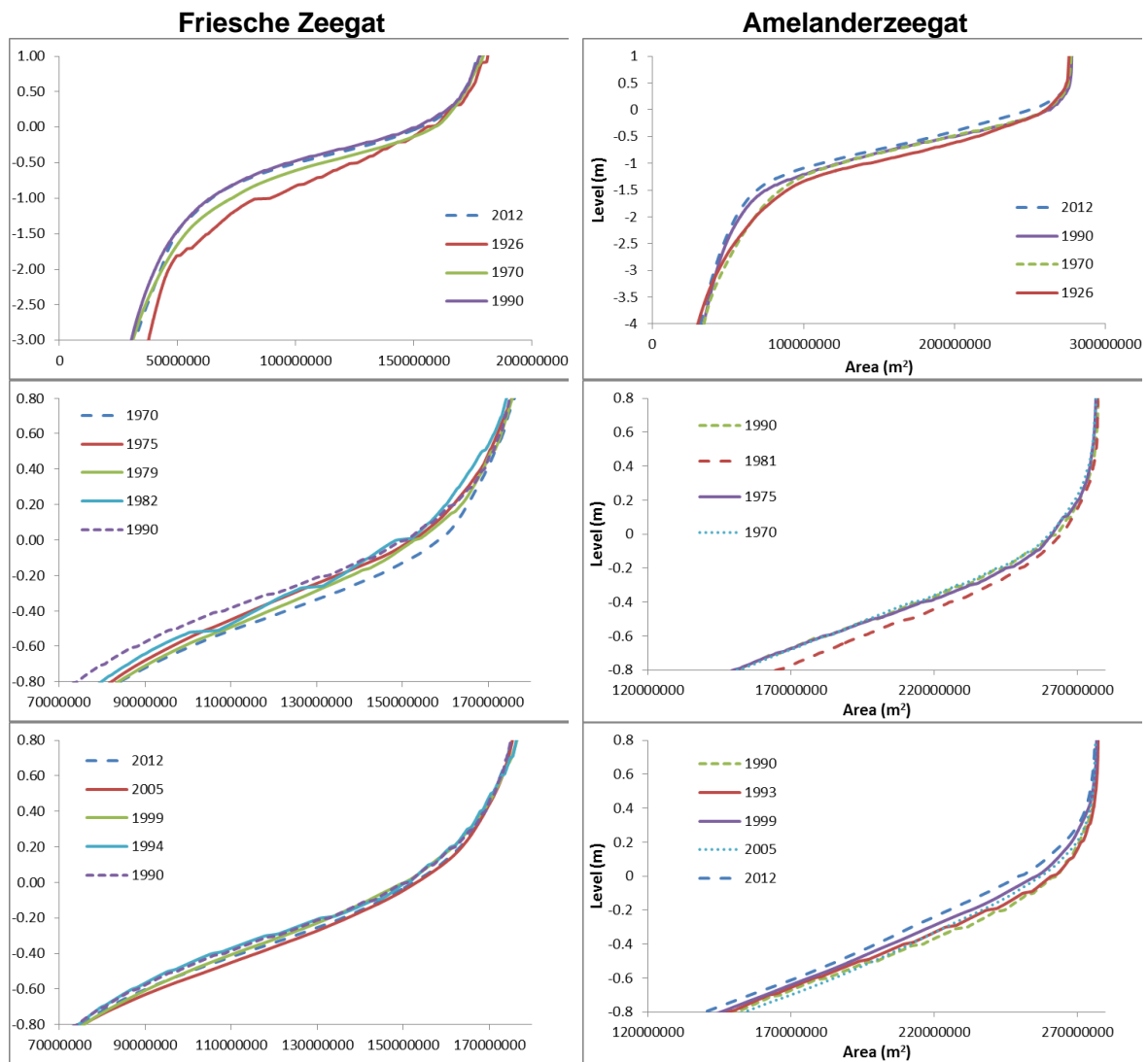


Figuur 2.12 Scatterplots van de berekende arealen per hoogteklasse voor de Zoutkamperlaag. De rode lijn geeft de lineaire regressielijn door de punten, a is de regressiecoëfficiënt, r² de determinatiecoëfficiënt.

### 2.2.3 Mogelijke verklaringen van de waarnemingen

Uit de voorgaande analyse blijkt dat het intergetijdegebied in het bekken van het Pinkegat gemiddeld aan het verlagen is in de meetperiode. Dit zien wij in de verschillen tussen de hypsometrische curven en in de ontwikkelingen van de arealen van gebieden van verschillende hoogteklassen. De waarnemingen duiden een gemiddelde verlaging van het intergetijdegebied in het bekken van ongeveer 5 cm in de periode 2010-2016. Deze waargenomen verlaging kan de volgende mogelijke oorzaken hebben:

1. Meetonnauwkeurigheid
2. Bodemdaling
3. Morfologische veranderingen



Figuur 2.13 Hypsometrische curven van Friesche Zeegat en Amelander Zeegat bepaald op basis van Vaklodgingen.

Hieronder worden deze mogelijke oorzaken nader toegelicht.

Ad 1. Meetonnauwkeurigheid. De hypsometrische curven worden bepaald met de gegevens van het hele bekken. Voor iedere hoogteklaas betekent dit dat een waarde van het areaal berekend wordt door de bodemhoogte van een groot aantal cellen te gediscrètiseerd op te delen. Daardoor is het stochastische deel van de meetfouten in de bodemhoogte praktisch uitgemiddeld. Dus als er een fout zit in de verticale ligging van de hypsometrische curven dan gaat het om de systematische fout, ofwel een fout die constant is over het hele gebied. Bij het begin van de LiDAR metingen gaf Fugro (2010) aan dat de systematische fout van de metingen 3,5 cm is. Het is niet duidelijk of Fugro (2010) hiermee inderdaad de fout bedoeld die constant is over het hele gebied. Als het wel zo is dan vallen de gemeten verschillen nog net binnen de foutmarge (fout van verschil tussen twee metingen is  $\sqrt{2}$  keer zo groot, dus ongeveer 5 cm). Een aanwijzing dat het waarschijnlijk niet om meetonnauwkeurigheid maar om verlaging van de platen gaat is dat de verandering in Zoutkamperlaag veel minder is. Ook de eventuele 'kanteling' (zie Paragraaf 2.3) in de data kan dit niet verklaren omdat het effect omgekeerd zou zijn.

Ad 2. Bodemdaling. Gezien het ruimtelijke patroon van de verlaging kan bodemdaling niet worden uitgesloten als oorzaak hiervan. De grootte van de verlaging is echter veel groter dan de bekende bodemdaling door gaswinning in de beschouwde periode. Dan blijft er nog de vraag of de bodemdaling morfologische veranderingen kan veroorzaken zodanig dat er extra verlaging van de platen optreedt. Vanuit morfologische processen geredeneerd met behulp van hydrodynamische modellering is er geconcludeerd dat dit niet mogelijk is (Wang en Eysink, 2005). Bodemdaling in een bekken veroorzaakt meer sedimentimport doordat de getijstroming door het zeegat sterker en meer vloeddominant wordt. Doordat de stroming in de geulen sterker wordt, wordt er meer zand naar de platen getransporteerd en afgezet, wat tot compensatie van de bodemdaling op de plaat leidt.

Ad 3. Autonome morfologische veranderingen. Morfodynamiek kan leiden tot fluctuaties van de plaathoogte op verschillende tijdschalen variërend van de duur van een storm tot decennia, ook als de lange-termijn trend verhoging van het oppervlak is (zie bijv. Nederhoff et. al., 2017). Figuur 2.13 laat de hypsometrische curven, bepaald aan de hand van de Rijkswaterstaat vaklodingen, van het Amelanders Zeegat en het Friesche Zeegat (Pinkegat + Zoutkamperlaag) op verschillende momenten zien. Over een lange periode (orde eeuw) zijn de platen in beide bekkens verhoogd. Maar over een kortere periode (decennia) tonen de hypsometrische curven fluctuaties in de tijd. Opgemerkt moet worden dat de Vaklodingen onnauwkeurigheden bevatten die waarschijnlijk groter zijn dan die van de LiDAR metingen. De fluctuaties zijn in principe dus een gecombineerd gevolg van morfologische veranderingen en meetonnauwkeurigheid. Dat geldt ook voor de geconstateerde verlaging uit de LiDAR metingen.

Alles overwegend is de geconstateerde verlaging waarschijnlijk het gevolg van morfologische veranderingen.

### 2.3 Kanteling van de meetgegevens

In de rapportage van de LiDAR analyse zijn de erosie-sedimentatiekaarten van de LiDAR opnamen van Najaar 2016 ten opzichte van alle voorgaande opnamen gepresenteerd (Figuur 5.1 in Schrijvershof et al. (2017)). De erosie-sedimentatiekaart voor het interval Najaar 2016 - Voorjaar 2016 liet een sterk afwijkend patroon zien ten opzichte van de erosie-sedimentatiekaarten van Najaar 2016 met andere datasets. In Figuur 2.14 is de verschilkaart van Najaar 2016 en Voorjaar 2016 (en vice versa) nogmaals weergegeven. De kaart toont een

afwijkend patroon omdat de hoogteverandering (afname of toename) in het oostelijke gedeelte hoofdzakelijk één kant op beweegt. Een dergelijk erosie-sedimentatiepatroon dat over het gehele bekken is waar te nemen is niet te verklaren aan de hand van morfologische dynamiek. Het afwijkende patroon is ook niet waar te nemen op de verschilkaarten van Najaar 2016 met oudere datasets, het is daarom uit te sluiten dat er een werkelijke bodemverandering heeft opgetreden die dit patroon veroorzaakt. Het vermoeden bestaat hierdoor dat er een fout zit in de gegevens. De fout omvat een kanteling van de meetgegevens over een denkbeeldige lijn van Paesens (ZW) naar de oostpunt van Schiermonnikoog (NO). Deze 'kanteling' zorgt voor een verschil in bodemhoogte tussen deze twee datasets van 2,5 tot meer dan 7,5 cm in het oostelijke gedeelte van de Zoutkamperlaag.

In Figuur 2.15 en Figuur 2.17 zijn de erosie-sedimentatiekaarten getoond van de surveys van Najaar 2016 en Voorjaar 2016 met eerdere survey's sinds Najaar 2013. De opnames voorafgaand aan Najaar 2013 werden met een andere scanner verzameld. Deze scanner gaf een minder goede dekking van het oppervlak en als gevolg daarvan laat de oudere data een 'streeppatroon' zien evenwijdig aan de richting van de gevlogen banen. Omdat dit streeppatroon de observaties maskeert is er voor gekozen om de oudere datasets (voorafgaand aan Najaar 2013) niet te gebruiken.

In Figuur 2.16 en Figuur 2.18 zijn scatterplots getoond van de bodemhoogtegegevens van de Najaar 2016 en Voorjaar 2016 opnamen, uitgezet tegen de eerdere survey's. De punten in de scatterplots zijn opgesplitst voor bodemhoogtepunten welke binnen de controle polygoon van het Pinkegat (blauw) en de Zoutkamperlaag (rood) vallen. De waarde van de bias is voor de gehele dataset (zwart) en de opgesplitste dataset in de figuur aangegeven. De bias is berekend als het gemiddelde van  $z_{b1} - z_{b2}$ .

In de getoonde verschilkaarten is een afwijkend patroon dat een uniforme bodemverandering aan de oostelijke en westelijke kant van het bekken zou laten zien niet goed waar te nemen. In Schrijvershof et al. (2017) werd dit wel, ten onrechte, toegeschreven aan de verschilkaart van Voorjaar 2016 en Voorjaar 2014. De scatterplots van de survey van Najaar 2016 (Figuur 2.16) tonen echter wel een sterk negatieve bias voor de (rode) bodemhoogtepunten binnen de polygoon van de Zoutkamperlaag. De negatieve bias geeft aan dat de bodempunten binnen de Zoutkamperlaag in Najaar 2016 gemiddeld lager liggen dan in voorgaande jaren. In de verschilkaarten is dit echter moeilijk waar te nemen.

De verschilkaarten met de survey van Voorjaar 2016 (Figuur 2.17) tonen eveneens geen duidelijk afwijkend patroon. De scatterplots (Figuur 2.18) laten echter wel een duidelijk positieve bias zien voor alle bodemhoogtepunten binnen de polygoon van de Zoutkamperlaag voor alle datasets. Deze bodemhoogtepunten zijn voor de survey van Voorjaar 2016 dus gemiddeld hoger gelegen dan in de voorgaande jaren.

Het is vrij onwaarschijnlijk dat in de korte tijd tussen de surveys van Voorjaar 2016 en Najaar 2016 een dergelijk grote bodemverandering heeft opgetreden dat de gemiddelde ligging van alle bodempunten binnen de Zoutkamperlaag zo sterk zijn veranderd in hoogte. Er moet daarom geconcludeerd worden dat er een fout zit in minstens één van de twee datasets, maar waarschijnlijk in beide datasets.

De hierboven beschreven analyse van de bodemhoogtegegevens geeft een beter inzicht in het afwijkende sedimentatie-erosiepatroon in Figuur 2.14 en de veronderstelde kanteling. Een eenduidig antwoord op de vraag wat de oorzaak is van het afwijkende patroon wordt echter niet



**Datum**  
10 augustus 2017

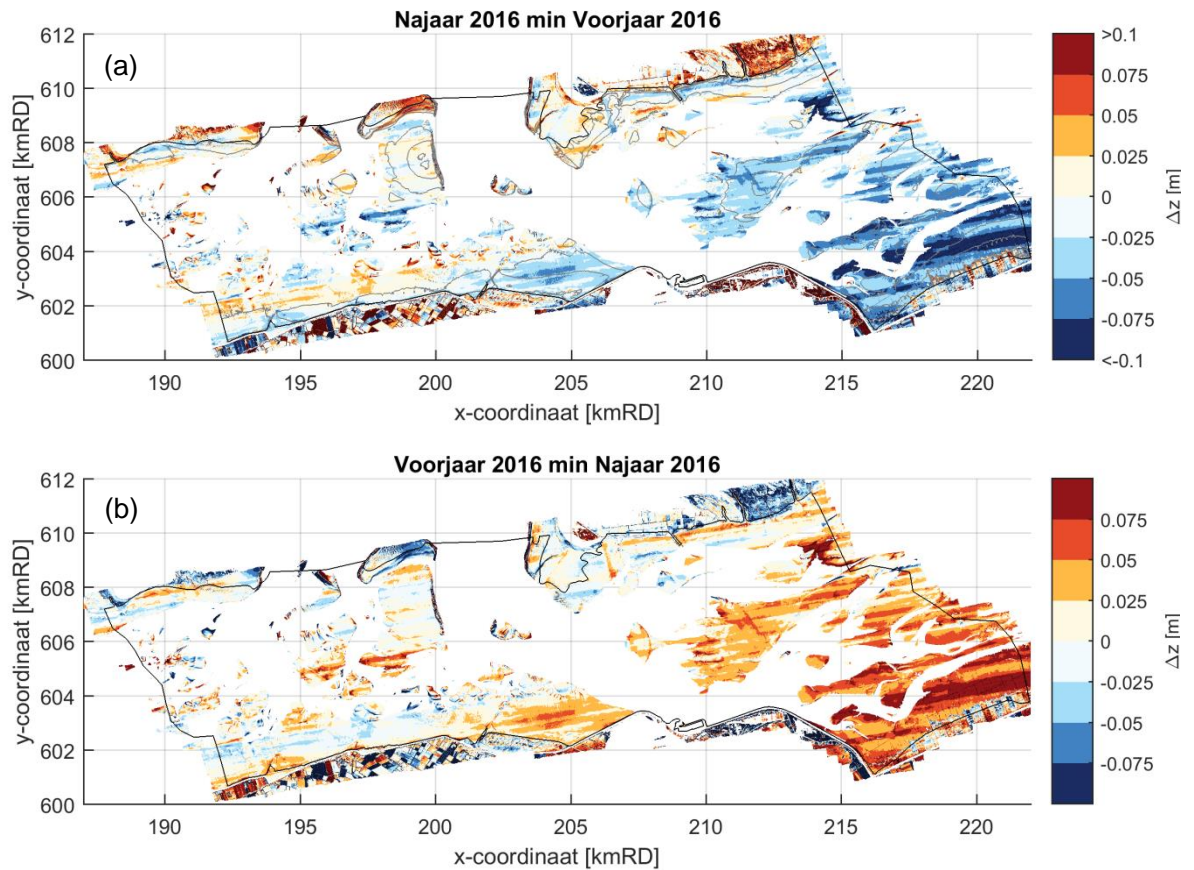
**Ons kenmerk**  
11200469-000-ZKS-0006

**Pagina**  
22/30

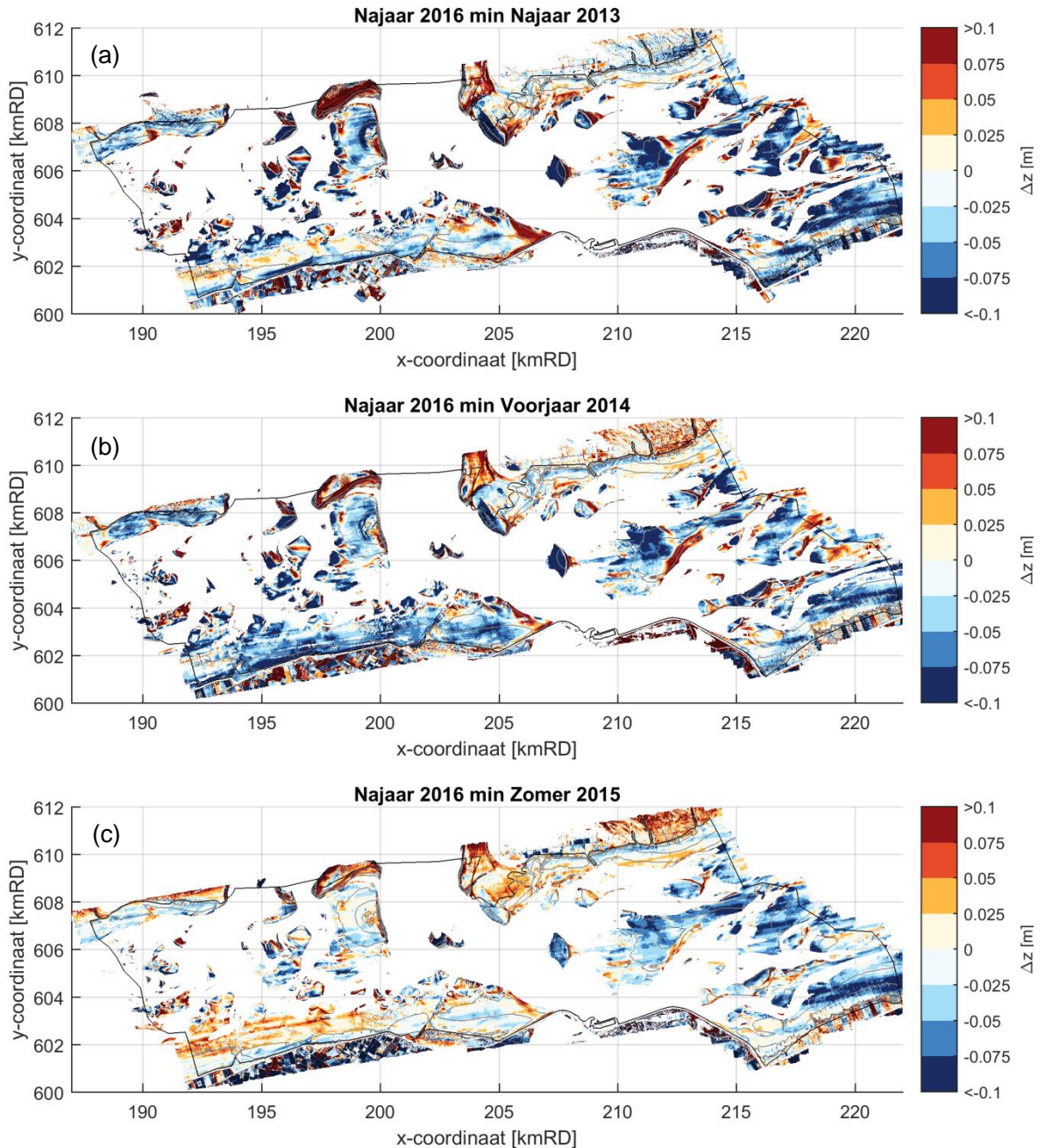
duidelijk uit deze analyse. Het is namelijk niet mogelijk om de oorzaak te vinden aan de hand van verwerkte en geaggregeerde datasets, aangezien de fout waarschijnlijk is geïntroduceerd tijdens een eerdere stap in de verwerking of al tijdens het inwinnen van de data.

In Figuur 2.14 valt het niet alleen op dat er een uniforme bodembeweging is waar te nemen in het oostelijke gedeelte van het Friesche Zeegat, maar zijn er ook duidelijk streeppatronen te onderscheiden die evenwijdig lopen aan de vliegrichting. Dit was ook het geval bij de datasets die vóór 2013 zijn verzameld. Sinds het gebruik van de nieuwe scanner waren deze streeppatronen niet meer duidelijk aanwezig. De ruwe datasets van Najaar 2015, Voorjaar 2016 en Najaar 2016 zijn, in tegenstelling tot de oudere datasets, niet door de meetdienst maar door Deltares verwerkt tot een regelmatig rooster (zie hiervoor ook Paragraaf 2.4). Deze twee punten samen genomen doet het vermoeden ontstaan dat de dataset die is gebruikt als startpunt van de voorbewerking (zie Paragraaf 2.4 en Figuur 2.19) niet gecorrigeerd is ten opzichte van elkaar (vliegbanen) en ten opzichte van de GCP-punten. In een gesprek tussen Deltares, NAM en meetdienst (Eurosense of Aerodata) moet de verwerkingsprocedure verduidelijkt worden zodat achterhaald kan worden of dit de oorzaak van het afwijkende patroon kan zijn.

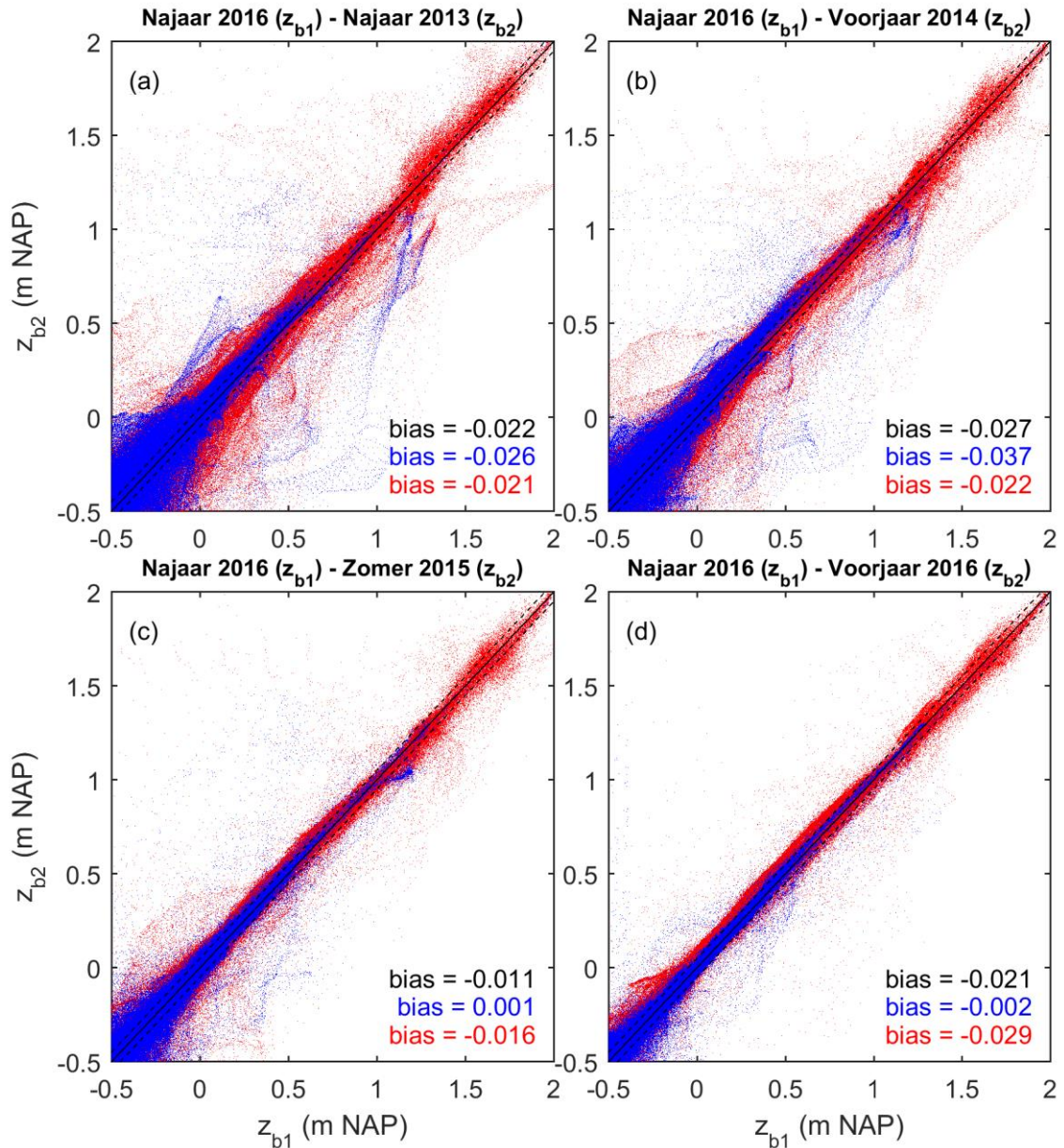




**Figuur 2.14** Verschilkaart LiDAR opname Najaar 2016 – Voorjaar 2016 (a) en vice versa (b). Een rode (blauwe) kleur betekent een hogere (lagere) bodemligging in de dataset die als eerste staat genoemd in de titel van de figuur. Datapunten met een verschil van 0 zijn uitgefilterd en hebben geen kleur in de figuren.

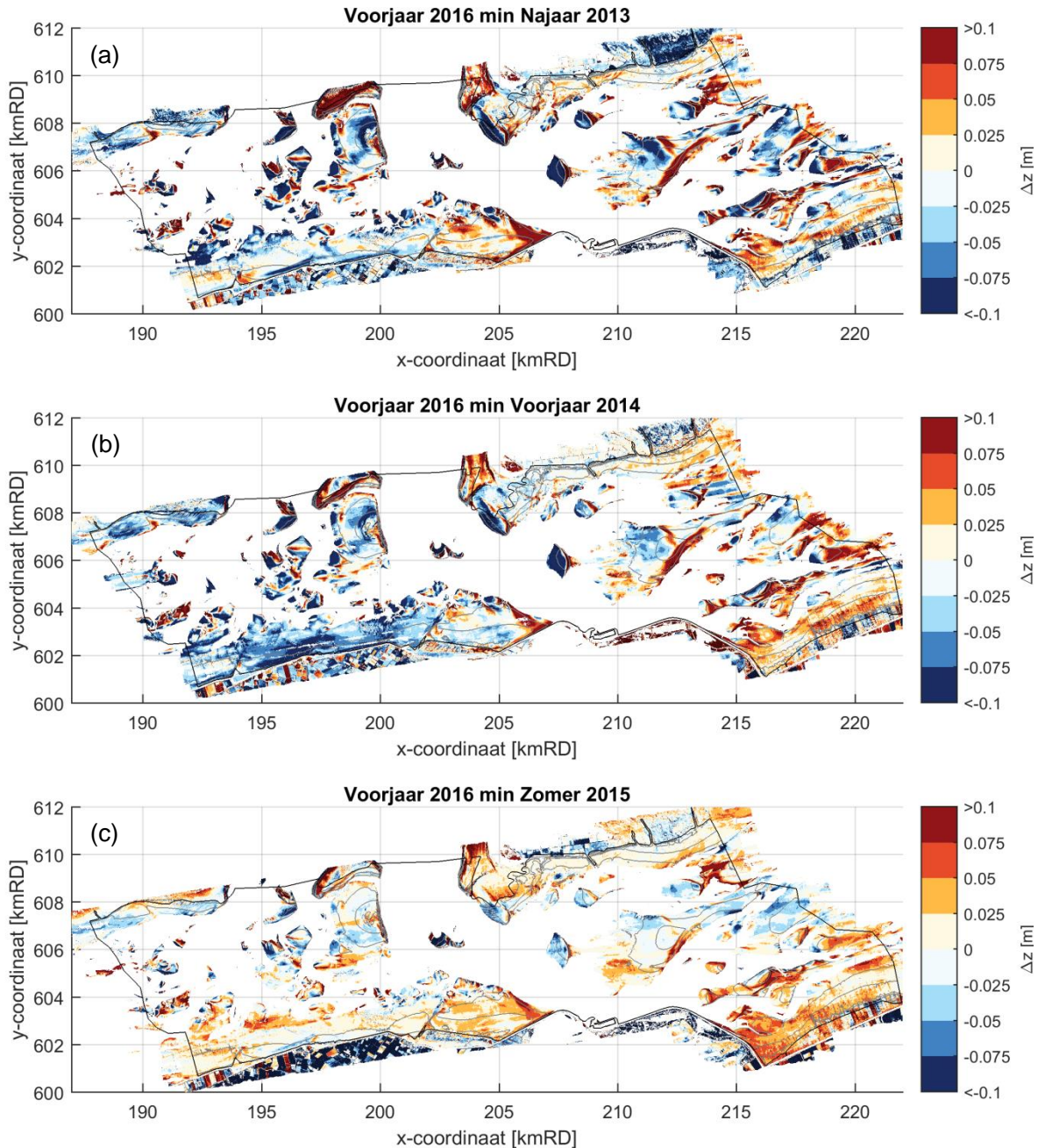


**Figuur 2.15** Verschilkaarten van de LiDAR opnamen Najaar 2016 – Najaar 2013 (a), Najaar 2016 – Voorjaar 2014 (b) en Najaar 2016 – Zomer 2015. Een rode kleur betekent een hogere bodemligging in de opname van Najaar 2016.

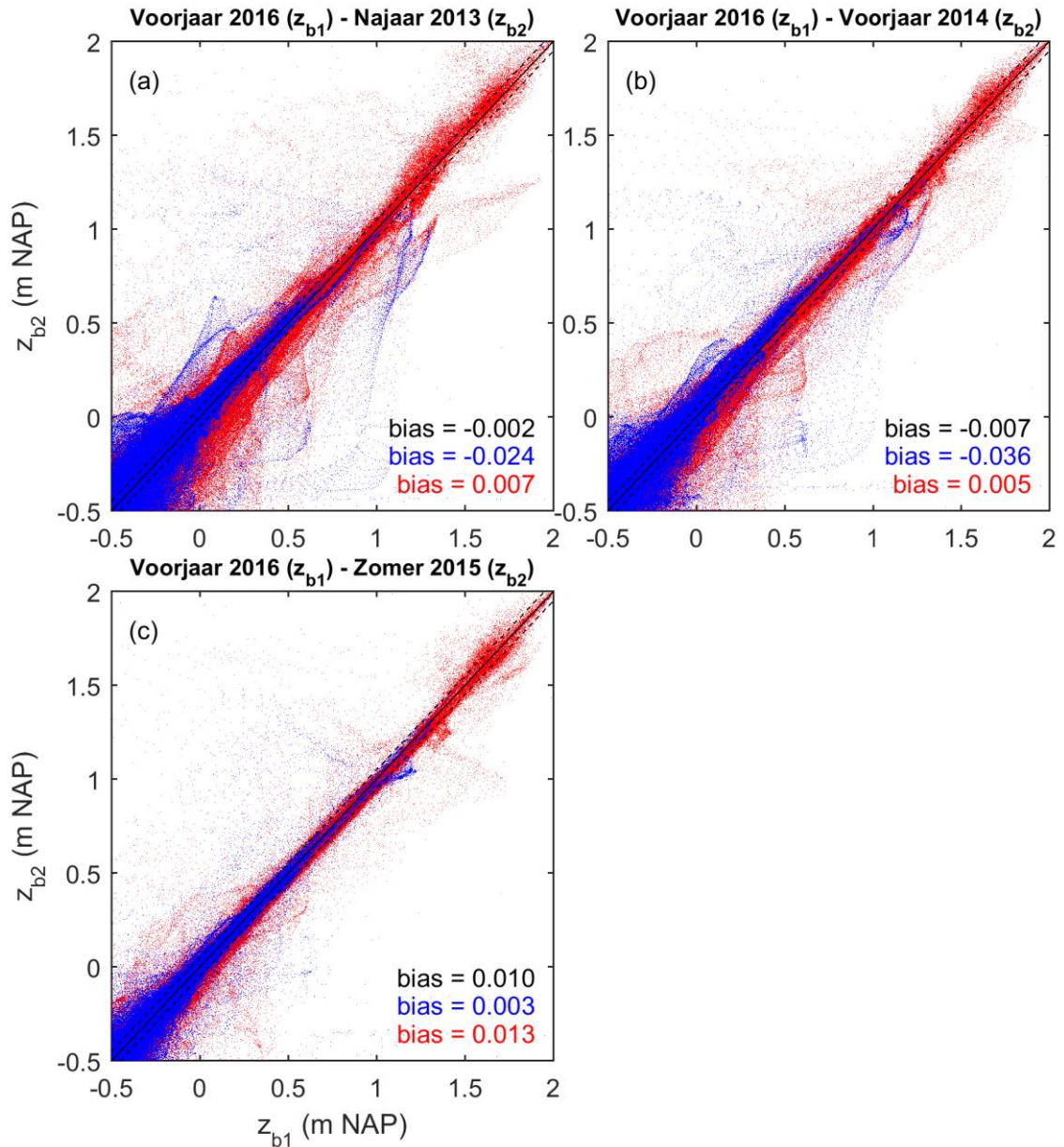


Figuur 2.16 Scatterplots van de hoogteverschillen van roosterpunten welke binnen de controlepolygoon van het Pinkegat (blauw) en de Zoutkamperlaag (rood) vallen voor Najaar 2016 ( $z_{b1}$ ) en voorgaande datasets sinds 2013 ( $z_{b2}$ ), met uitzondering van Najaar 2014 en Najaar 2015. De continue lijn geeft de 1:1 relatie, gestippelde lijnen geven de 5 cm afwijking van de 1:1 relatie. Bias berekend als  $z_{b1} - z_{b2}$ .





Figuur 2.17 Verschilkaarten van de LiDAR opname Voorjaar 2016 – Najaar 2013 (a), Voorjaar 2016 – Voorjaar 2014 (b) en Voorjaar 2016 – Zomer 2015. Een rode kleur betekent een hogere bodemligging in de opname van Voorjaar 2016.



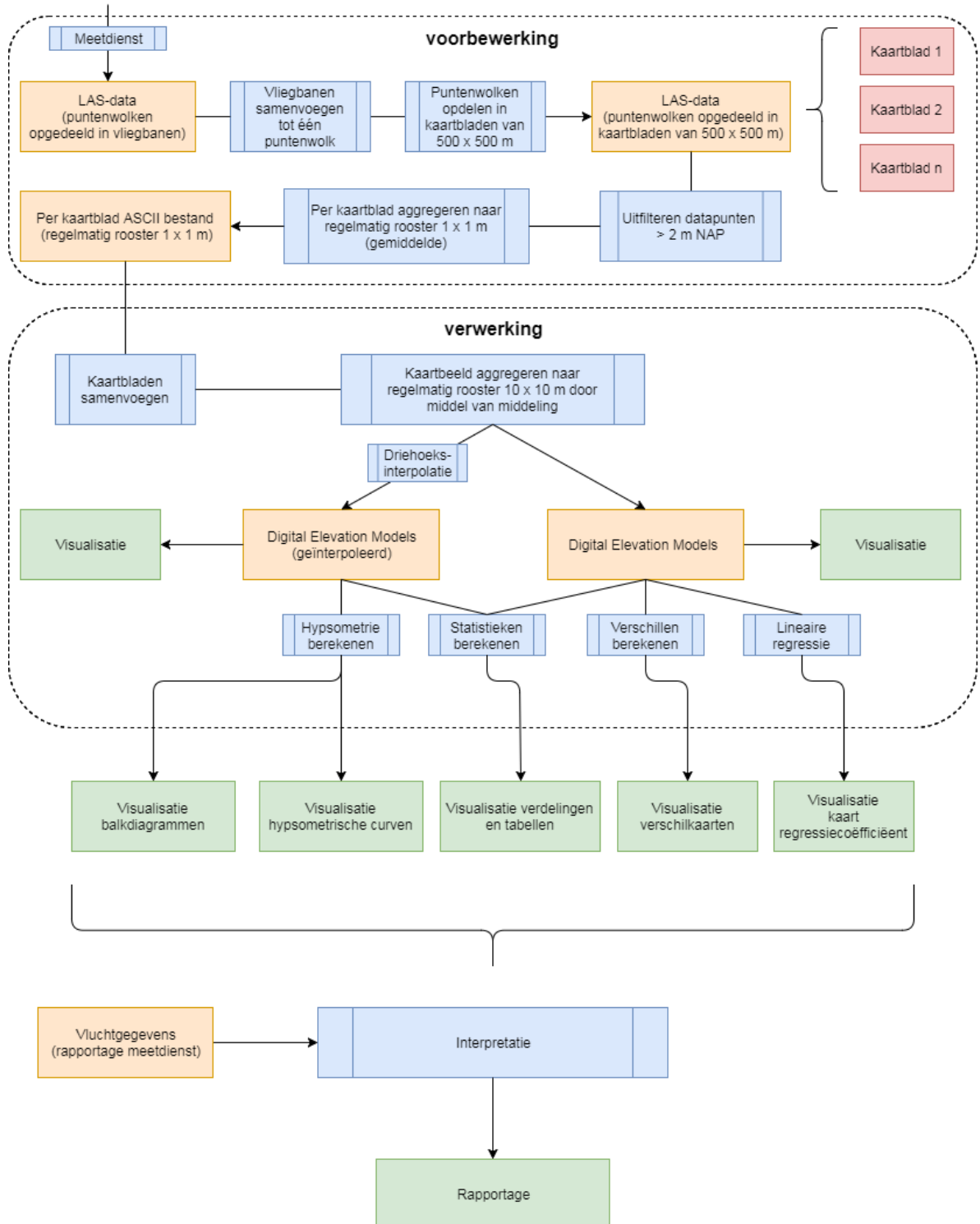
Figuur 2.18 Scatterplots van de hoogteverschillen van roosterpunten welke binnen de controlepolygoon van Het Friesche Zeegat vallen van Voorjaar 2016 ( $z_{b1}$ ) en voorgaande datasets sinds 2013 ( $z_{b2}$ ), met uitzondering van Najaar 2014 en Najaar 2015. De continue lijn geeft de 1:1 relatie, gestippelde lijnen geven de 5 cm afwijking van de 1:1 relatie.

## 2.4 Procesbeschrijving

Een stroomdiagram van het proces van dataverwerking en -analyse zoals dat door Deltares wordt uitgevoerd is weergegeven in Figuur 2.19. Het proces van data-inwinning is niet weergegeven in het diagram omdat dit niet door Deltares wordt uitgevoerd, dit dient nog toegevoegd te worden door de meetdienst of de NAM. De werkwijze van dataverwerking en -analyse is niet voor elke LiDAR rapportage exact dezelfde geweest, omdat deze jaarlijks geëvalueerd is en waar mogelijk verbeterd. Het stroomdiagram toont de werkwijze zoals deze is toegepast voor de meest recente analyse van de LiDAR gegevens (Schrijvershof et al., 2017).

De processtappen in Figuur 2.19 die omsloten zijn met de bovenste gestippelde omlijning beslaan de voorbereiding. Deze stappen zijn tot en met de dataset van Zomer 2015 altijd door de meetdienst uitgevoerd. Sinds de rapportage van 2017 (Schrijvershof et al., 2017) worden deze stappen door Deltares uitgevoerd. Het startpunt van de voorbereiding zijn de LAS-data (puntenwolken) die opgedeeld zijn in vliegbanen (productielijnen). Op deze dataset zou al een correctie uitgevoerd moeten zijn om de vliegbanen ten opzichte van elkaar te corrigeren en een correctie om de gehele dataset te corrigeren ten opzichte van de Ground Control Points (GCPs).

De processtappen in Figuur 2.19 die omsloten zijn met de onderste gestippelde omlijning duiden op de verwerking van de LiDAR gegevens. Deze stappen zijn voor iedere rapportage uitgevoerd door Deltares. Sinds de rapportage uit 2016 (Schrijvershof en Vroom, 2016) is de interpolatiestap toegevoegd om Digital Elevation Models te creëren die een complete dekking geven voor de wadplaten, deze verwerkingsstap is voor alle datasets uitgevoerd.



Figuur 2.19 Stroomdiagram van het proces van verwerking en analyse van de LiDAR gegevens zoals uitgevoerd door Deltares. Oranje: tussenproduct; blauw: bewerking/proces; groen: eindproduct.



## Referenties

- Arentz, L., & Vroom, J. (2014). Analyse LiDAR data voor Het Friesche Zeegat (2010-2013). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport 1209136-000.
- Cronin, K., & Wang, Z. B. (2012). Analyse LiDAR data voor Het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport 1204654-000.
- Elias, E., Wang, Z. B., & Cronin, K. (2013). Analyse LiDAR data voor Het Friesche Zeegat (2010-2012). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport 1206958-000.
- Nederhoff, C.M., Smits, B., Wang, Z. B. (2017). KPP Wadden. Data analyse: getij en morfologie. Deltares rapport 11200521-000.
- Schrijvershof, R. A. (2016). Meetfout van de LiDAR gegevens van het Friesche Zeegat. Deltares memo 1221249-000-ZKS-0008.
- Schrijvershof, R. A., Nederhoff, C. M., Haag, A., & Piening, H. (2017). Analyse LiDAR data voor Het Friesche Zeegat (2010-2016). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport 11200469-000.
- Schrijvershof, R. A., & Vroom, J. (2016). Analyse LiDAR data voor Het Friesche Zeegat (2010-2015). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport 1221249-000.
- Vroom, J., & Beekhuizen, J. (2015). Analyse LiDAR data voor Het Friesche Zeegat (2010-2014). Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport 1210543-000.
- Wang, Z. B., Cronin, K., & van Ormondt, M. (2010). Analyse LiDAR data voor Het Friesche Zeegat. Monitoring effect bodemdaling door gaswinning. Deltares rapport 1202285-000.
- Wang, Z. B., Eysink, W.D., 2005. Abiotische effecten van bodemdaling in de Waddenzee door gaswinning. WL | Delft hydraulics rapport Z31995.