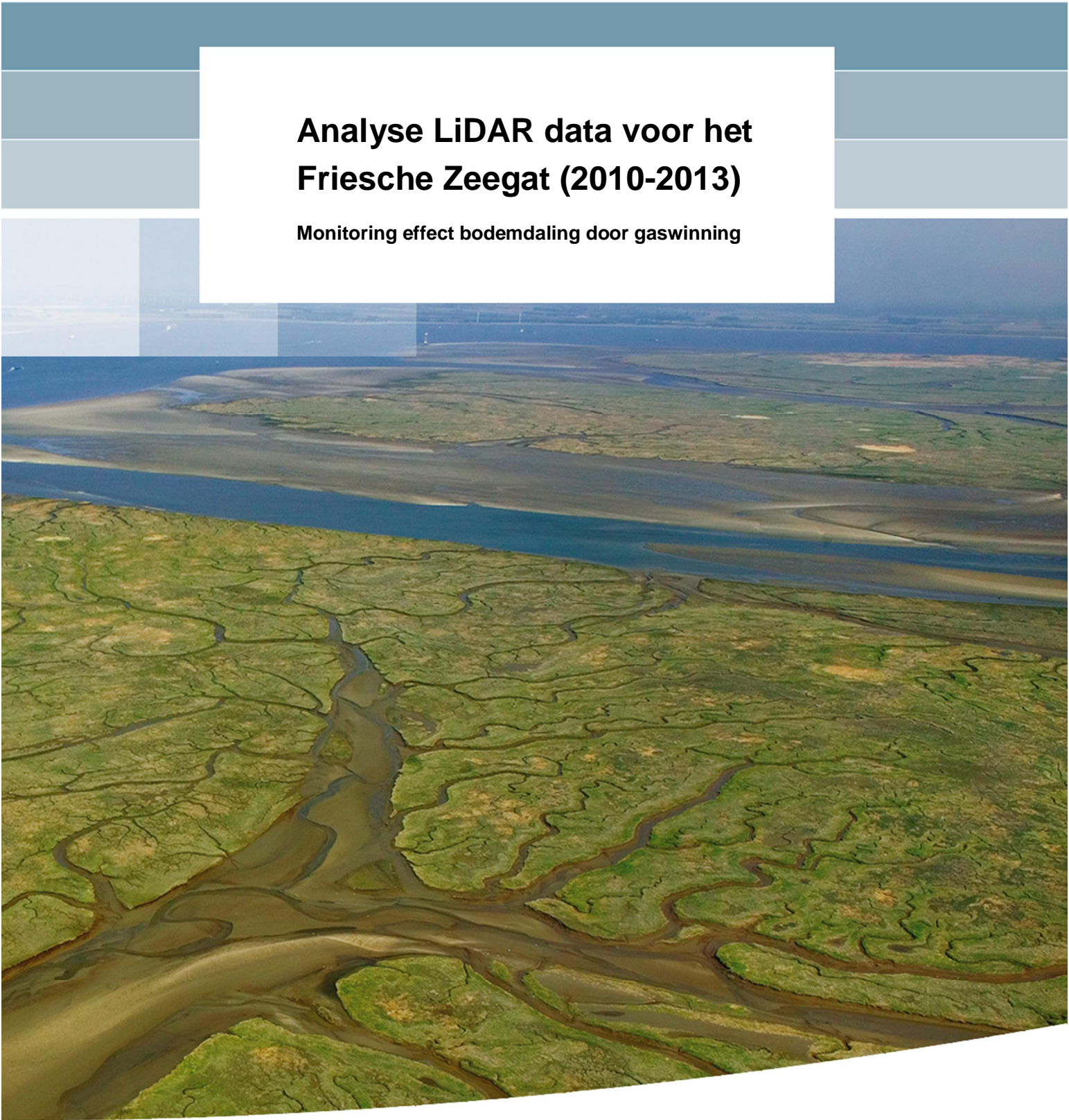


**Analyse LiDAR data voor het
Friesche Zeegat (2010-2013)**

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning



Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2013)

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning

Loana Arentz
Julia Vroom

1209136-000

Titel

Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2013)

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Harry Piening Nederlandse Aardolie Maats chappij B.V.	1209136-000	1209136-000-ZKS-0005	32

Trefwoorden

LiDAR data, Waddenzee, Bodemdaling, kombergingsgebieden, Friesche Zeegat, Gaswinning, morfologie.

Samenvatting




In het kader van de monitoring van de effecten van bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee worden de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten gemonitord. Doel van de monitoring is vast stellen of er al dan niet een effect van de bodemdaling door gaswinning is. Sinds 2010 zijn hiertoe vijf LiDAR opnames gemaakt door Fugro en geanalyseerd door Deltares. Het interessegebied betreft het Friesche Zeegat bestaande uit de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.

Doel van deze studie is het in kaart brengen van de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten in het Friesche Zeegat sinds 2010. Hierbij gaat de interesse specifiek uit naar de langjarige trend van de variatie in wadplaathoogte en totaal oppervlak droogvallend wad als gevolg van relatieve zeespiegelstijging zijnde het netto effect van zeespiegelstijging en bodemdaling.

De belangrijkste uitkomst van deze analyse is dat er nog geen conclusies getrokken kunnen worden over het effect van relatieve zeespiegelstijging op de wadplaathoogte omdat a) de verschillen tussen de vijf geanalyseerde LiDAR opnames klein zijn ten opzichte van de fout in de data zoals aangegeven door Fugro, en b) de meetfrequentie en duur van LiDAR opnames niet representatief zijn voor de tijdschaal waarop deze langjarige trend zich uit. Dit is in lijn met de eerdere analyses in Cronin en Wang (2012) en Elias et al. (2013) en werpt vragen op over de bruikbaarheid van LiDAR data voor dit doel en de definitie van de fout van deze LiDAR data. De aanbevelingen hebben als doel om de fout nader te definiëren en de mogelijkheden van potentiële verbeterlagen in de verwerking van de data nader te onderzoeken.

Referentie

-

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	apr. 2014	ir. L. Arentz		prof. dr. ir. Z.B. Wang		drs. F.M.J. Hoozemans	

Status

definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Kader	1
1.2 Achtergrond	1
1.3 Voorgaande studies	2
1.4 Huidige studie	2
1.5 Doelstelling	3
2 Aanpak	5
3 De data: beschrijving en verwerking t.b.v. analyse	7
3.1 Algemeen	7
3.2 Beschrijving van de (Fugro) LiDAR 2013 data	8
3.3 Datalevering door Fugro	10
3.4 Verwerking van de data t.b.v. analyses	10
3.4.1 Presentatie bodemhoogte op 10 m x 10 m grid	10
3.4.2 Presentatie bodemhoogte op 10 m x 10 m grid na nat / droog filtering	12
4 Analyse verschilkaarten	15
4.1 Sedimentatie – erosieplots en histogram t.o.v. 2013	15
4.2 Erosie en sedimentatie snelheid	17
5 Analyse per kombergingsgebied	23
6 Conclusies, discussie en aanbevelingen	29
6.1 Conclusies	29
6.2 Discussie	29
6.3 Aanbevelingen	30
7 Referenties	31
Bijlage(n)	
A Memo	A-1

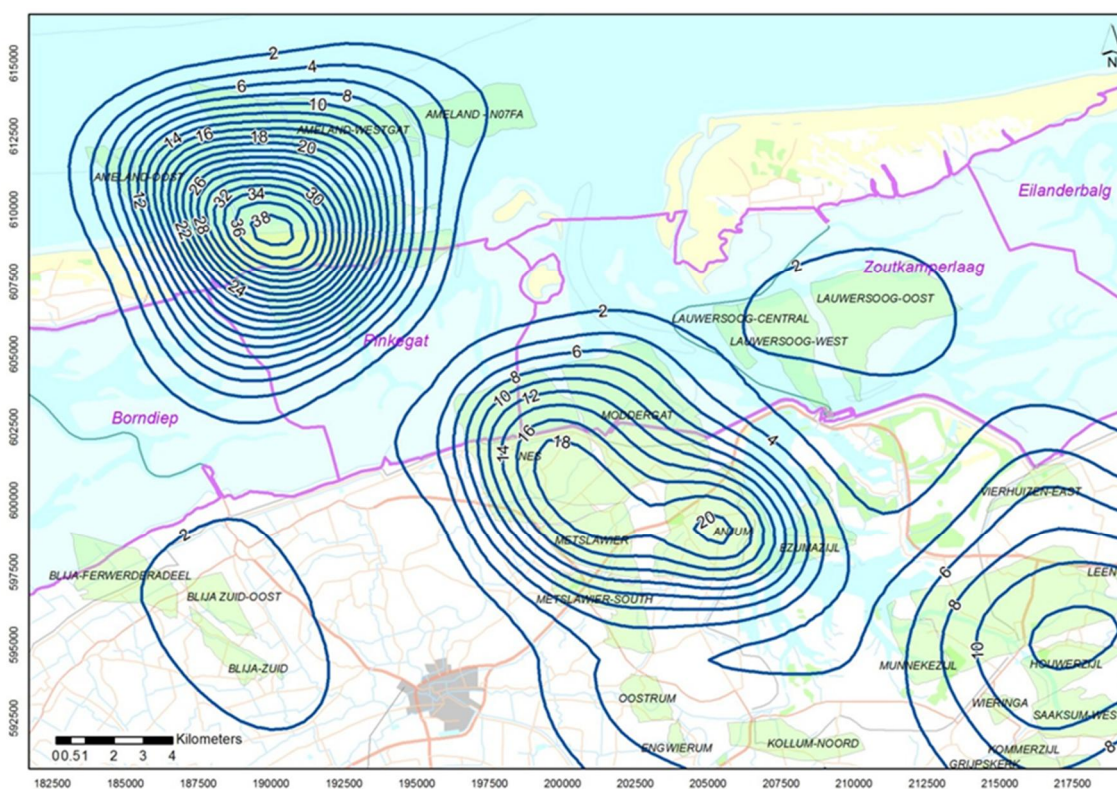
1 Inleiding

1.1 Kader

Dit rapport maakt onderdeel uit van een tweeledige studie in het kader van de monitoring van effecten bodemdaling door gaswinning. In stap 1 is de impact van verschillende vergriddings- of foutfilteringsmethoden van de verwerking van de punt metingen, de zgn. "las punten", op de nauwkeurigheid nader geanalyseerd (zie memo in bijlage). Dit rapport beschrijft stap 2, met daarin de resultaten van een analyse van door Fugro ingewonnen LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2013).

1.2 Achtergrond

Bij de uitgave van een vergunning voor gaswinning door de NAM is een monitoringsverplichting opgenomen. Het monitoringsprogramma van de NAM geeft hier invulling aan. Doel van het monitoringsprogramma is om vast te stellen of er al dan niet **een effect van de bodemdaling door gaswinning** is. Dit effect wordt o.a. door middel van veranderingen van de hoogte en oppervlak droogvallende wadplaat in kaart gebracht. Achterliggende vraag is of de wadplaat in staat is om de relatieve zeespiegelstijging te volgen. Hierin is relatieve zeespiegelstijging gedefinieerd als het netto effect van zeespiegelstijging en bodemdaling (autonome bodemdaling en bodemdaling door gaswinning). Figuur 1.1 geeft de locaties van gaswinning weer. In 1986 is de gaswinning bij Ameland begonnen. De velden in het Waddengebied (Moddergat en Lauwersoog) zijn in gebruik sinds 2007.



Figuur 1.1 Voorspelde ruimtelijke verdeling van de bodemdaling in 2050, volgens de huidige prognose (Wang, 2013).

Tot 2009 werd enkel naar oppervlakte droogvallende wadplaat gekeken. Hiertoe werden luchtfoto's gemaakt. Om ook wadplaathoogte te kunnen monitoren worden sinds 2010 LiDAR opnamen gemaakt door Fugro. Deze LiDAR opnamen worden geanalyseerd door Deltares. Tabel 1.1 geeft een overzicht van de beschikbare LiDAR opnames en analyses. Het interessegebied betreft het Friesche Zeegat bestaande uit de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.

Tabel 1.1 Overzicht van de verschillende LiDAR opnames en analyses van Friesche Zeegat.

Lidar referentie	Datum van opname	Referentie Deltares studie
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) Data updated in 2012!	24-9-2011, 25-9-2011, 26-9-2011, 27-9-2011	
2012 (najaar) Data updated in 2013!	15-10-2012, 16-10-2012, 26-10-2012	Elias et al., 2013
2013 (najaar)	18-10-2013, 19-10-2013, 20-10-2013	

1.3 Voorgaande studies

In voorgaande studies is gebleken dat ook de LiDAR opnamen (nog) niet geschikt zijn om conclusies te trekken over de morfologische ontwikkeling van de wadplaathoogtes. Oftewel, we kunnen nog niet zeggen of de wadplaten in staat zijn om de relatieve zeespiegelstijging te volgen omdat:

- Meetfout: de fout in de LiDAR data zoals aangegeven door Fugro ligt in dezelfde orde van grootte als de gemeten verandering tussen de momenteel beschikbare LiDAR opnamen. Je kan pas iets zeggen over de morfologische ontwikkeling van de wadplaathoogtes als de gemeten verandering significant is ten opzichte van de meetfout;
- Tijdschalen: de natuurlijke dynamiek in de morfologische ontwikkeling van de wadplaten is opgebouwd uit meerdere trends met ieder een eigen tijdschaal. Denk bijvoorbeeld aan geulmigratie of storm events. De **trend waar de interesse naar uit gaat is de variatie in wadplaathoogte door relatieve zeespiegelstijging** welke een veel langere tijdschaal heeft dan de 3 jaar waarvoor de LiDAR metingen beschikbaar zijn (2010-2013). Op basis van deze LiDAR dataset kunnen we nog niet zeggen of de wadplaten zakken of stijgen als gevolg van relatieve zeespiegelstijging aangezien fluctuaties met kortere tijdschalen in deze korte periode het beeld domineren. Een voorbeeld van verandering op kleinere tijdschaal is geulmigratie. In Elias et al. (2013) is gekeken naar de snelheid van bodemverandering voor een langere meetreeks van vaklodingen van Rijkswaterstaat voor 1987 – 2012. Bij nadere analyse bleek dat de veranderingen in gemeten bodemhoogte gedomineerd worden door geul verplaatsingen. De veranderingen van de plaathoogte zijn zeer gering in vergelijking.

1.4 Huidige studie

Wat betekent de conclusies uit voorgaande studies voor de huidige studie?

In termen van meetfout dienen we na te gaan of deze teruggebracht kan worden. In stap 1 van deze studie is verder onderzocht of een andere manier van dataverwerking de foutenmarge van de LiDAR data kan verkleinen. In dit onderdeel is de nauwkeurigheid van de ruwe LAS punten (zie Hoofdstuk 3.3) gekwantificeerd door de bias met de zogenaamde ground truth metingen (GCPs, zie Hoofdstuk 3.2) te bepalen en afgezet tegen de door Fugro aangegeven nauwkeurigheid van 6,8 cm voor individuele opnames.

Uitgangspunt in deze analyse is dat deze fout voor de vergridde LiDAR data zoals aangeleverd door Fugro (ASCII 1x1 m uit Hoofdstuk 3.3) geldt. Verder is gekeken naar de impact van de keuzes ten behoeve van vergridding in termen van interpolatiemethode en gridgrootte op de uiteindelijke nauwkeurigheid ook weer afgezet tegen de door Fugro aangegeven fout.

Onze belangrijkste conclusie is dat een andere manier van vergridding weinig winst in nauwkeurigheid levert ten opzichte van de door Fugro geleverde vergridde data (de ASCII 1x1 m, zie Hoofdstuk 3.3). Echter, de definitie van de fout is nog wel punt van discussie. Hier komen we in Hoofdstuk 6.2 op terug.

Voor huidig onderdeel (stap 2) betekent deze conclusie dat we gewoon met de vergridde data zoals aangeleverd door Fugro kunnen werken. Zie Bijlage 1 voor de memo met daarin de bevindingen van onderdeel 1.

In termen van tijdschalen betekenen de conclusies uit eerdere studies dat, indien de gemeten verandering significant is ten opzichte van de meetfout, de veranderingen wel toegekend kunnen worden aan de natuurlijke dynamiek in de morfologie van de wadplaten. Maar we kunnen op basis van deze korte LiDAR dataset nog niet zeggen of de wadplaten zakken dan wel stijgen of dat het plaatareaal toe- of afneemt als gevolg van relatieve zeespiegelstijging (netto effect van zeespiegelstijging en bodemdaling: autonome en door gaswinning).

1.5 Doelstelling

Ondanks de bevindingen uit eerdere studies blijft de doelstelling:

In kaart brengen van de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten in het Friesche Zeegat (kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag) sinds 2010.

2 Aanpak

Voor het in kaart brengen van de morfologische ontwikkeling van de wadplaten wordt dezelfde aanpak gehanteerd als in voorgaande studies (Elias et al. 2013, Cronin en Wang, 2012, Wang et al. 2010). De basis voor deze analyse vormen de vergriddde LiDAR data zoals aangeleverd door Fugro (ASCII 1x1 m uit Hoofdstuk 3.3). De analyse zal de volgende onderdelen bevatten:

In Hoofdstuk 3 wordt een beschrijving van de LiDAR 2013 data gegeven. Gebiedsdekking, vluchtenschema en weersomstandigheden passeren hierbij de revue. Vervolgens worden de data verwerkt ten behoeve van de analyses beschreven in Hoofdstuk 4 en 5. De eerste stap is het omzetten naar kaartbladen met een resolutie van 10 m x 10 m waardoor de data behapbaar worden voor verdere analyse. Vervolgens wordt de "vergriddde 10 m x 10 m" dataset gecorrigeerd voor water door alleen de data met een waarde boven de -0.5 m NAP te gebruiken. Doordat de LiDAR opnames alleen bij waterstanden lager dan -0.7 m NAP bij Nes worden gevlogen, is de verwachting dat de waarden hoger dan -0.5 m NAP geen waterspiegel meer bevatten (met uitzondering van de plassen die op de platen blijven staan). Hierdoor zijn de berekende plaatarealen representatief voor oppervlakte van de platen boven de -0.5m NAP contour. Dit geeft een beter beeld van de gemeten plaathoogte verandering, omdat anders de verandering overheerst wordt door een waterstandsverschil in de geulen en niet de bodemverandering.

Hoofdstuk 4 beschrijft een analyse van verschilkaarten. Hierbij worden de LiDAR data uit het najaar van 2013 vergeleken met alle eerdere Fugro LiDAR data (voorjaar 2010, voor- en najaar 2011 en najaar 2012). Een vergelijking met de RWS data is al in Elias et al. (2013) niet zinvol gebleken omdat deze data op een andere manier verwerkt en ingewonnen zijn. Hierdoor wijkt de bodemligging teveel af van de Fugro LiDAR bodems. De verschilkaarten leveren sedimentatie/erosie plots in meter van de nieuwste bodem (najaar 2013) ten opzichte van alle eerdere LiDAR bodems. Daarnaast worden de erosie/sedimentatie snelheden op basis van de LiDAR data met de vaklodingen data over de periode 1987-2012 vergeleken. Als laatste stap wordt het aantal cellen met een bepaalde hoogteverandering ten opzichte van de 2013 meting cumulatief uitgezet, om te kijken welk deel van de veranderingen significant zijn ten opzichte van de meefout.

In Hoofdstuk 5 analyseren we arealen van de wadplaten per komberingsgebied Pinkegat en Zoutkamperlaag. Deze analyse is gebaseerd op hypsometrische curven en histogrammen. Een hypsometrische curve geeft het areaal ten opzichte van de bodemhoogte cumulatief weer. Het histogram geeft eveneens het areaal ten opzichte van de bodemhoogte weer, niet cumulatief maar verdeeld over diepteklassen. Zie Elias et al. (2013) en Cronin en Wang (2012) voor details.

3 De data: beschrijving en verwerking t.b.v. analyse

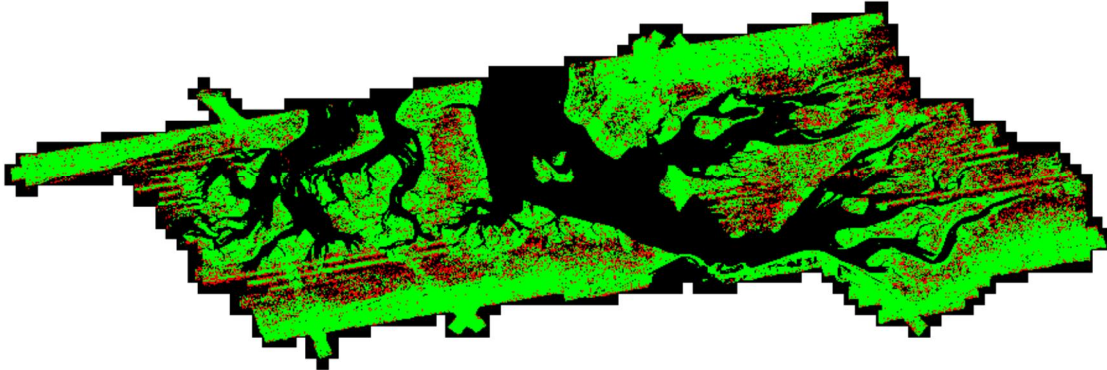
3.1 Algemeen

LiDAR (Light Detection And Ranging) is een technologie die de afstand tot een object of oppervlak berekent met 1) het tijdsverschil tussen uitzenden van een laserpuls en ontvangen van de reflectie, 2) de hoek waaronder de laserpuls is uitgezonden en 3) de absolute locatie van de sensor. De reflectie wordt beïnvloed door de absorptie van de te meten oppervlakken en de hoek van het te meten oppervlak t.o.v. de laser. Meting van natte oppervlakken als wadplaten wordt bemoeilijkt doordat er minder reflectie wordt ontvangen. Recht onder het vliegtuig is de reflectie wel goed, maar meer naar de zijkant van de scan wordt de reflectie minder. Daarnaast is het lastig natte en droge gebieden te onderscheiden, d.w.z. waterspiegel en wadplaat. Dit wordt nog verder bemoeilijkt omdat er op de wadplaten bij laagwater nog steeds een dunne waterfilm aanwezig kan zijn.

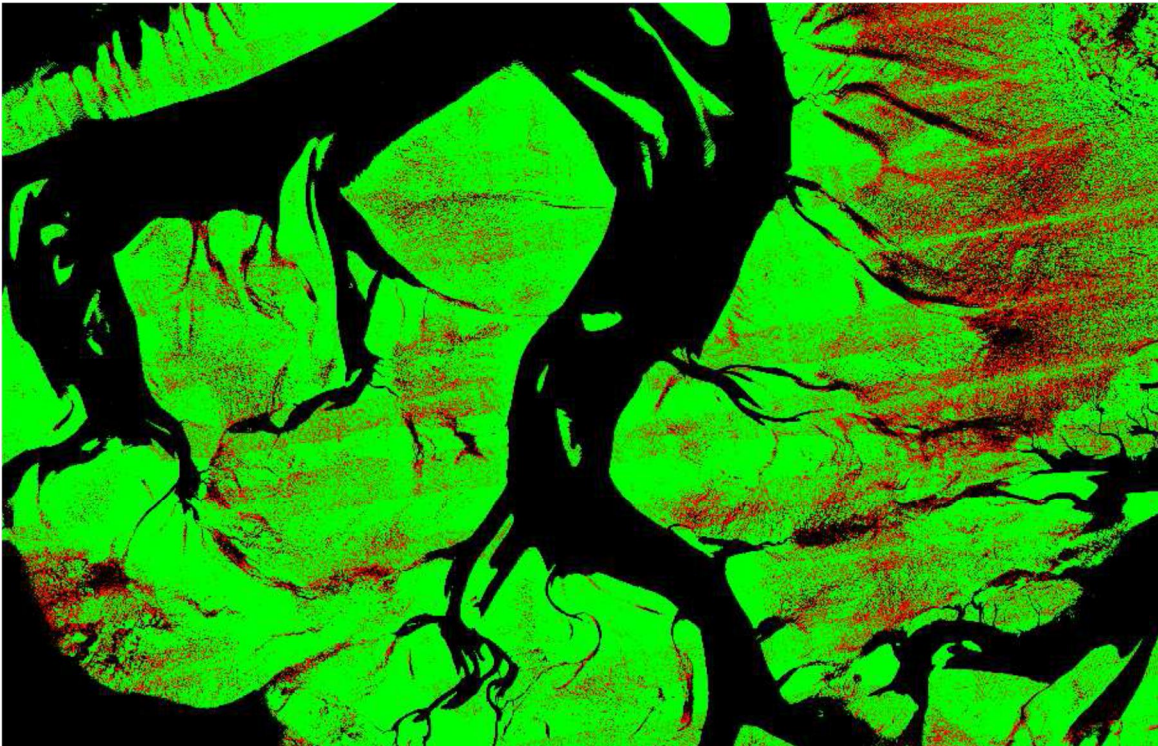
De kwaliteit van de data is daarmee afhankelijk van:

- Type oppervlak:
 - Boven land wordt meer reflectie ontvangen (ca. 4-5 punten per m²) dan boven intergetijdengebied. De punt dichtheid van de data reduceert, en dit effect wordt sterker naar de randen van de vluchtbaan. Dit is terug te zien in de puntendichtheid boven water, dat een duidelijk streeppatroon laat zien, zie Figuur 3.1 en Figuur 3.2.
 - Ruwere oppervlakken verstrooien de reflectie sterker, waardoor een kleiner deel terug wordt opgevangen. Echter, enige ruwheid is wel gewenst, aangezien bij een spiegelglad oppervlak alleen de puls recht onder de sensor kan worden terug ontvangen.
 - Daarnaast beïnvloedt het type oppervlak de mate van absorptie en reflectie binnen bepaalde bandbreedten van de laserpuls.
- Weersomstandigheden:
 - Regen, bewolking en mist. LiDAR kan niet door regen, bewolking of mist kijken.
 - Impliciet wind en daarmee golfwerking, vanwege de ruwheid van het oppervlak (zie vorige bullit).
- Positie van de sensor / het vliegtuig:
- De fout van het meetinstrument.

Fugro geeft de volgende definitie van de fout: van de theoretische nauwkeurigheid in enkele LiDAR opnamen is de systematische fout 3.8 cm en de stochastische fout 2.7 cm (Fugro 2013). Voor verschilkaarten wordt door Fugro een nauwkeurigheid van $3.8 * 2 + \sqrt{2} * 3.0 = 11.8 \text{ cm}$ aangegeven voor 68% van de afwijkingen.



Figuur 3.1 Kaart met datadichtheid. Groen: 4 of meer punten per m^2 , rood: minder dan 4 punten per m^2 , zwart: geen punten of lager dan -0.70m NAP. Bron: Fugro (2013).



Figuur 3.2 Detail kaart datadichtheid.

3.2 Beschrijving van de (Fugro) LiDAR 2013 data

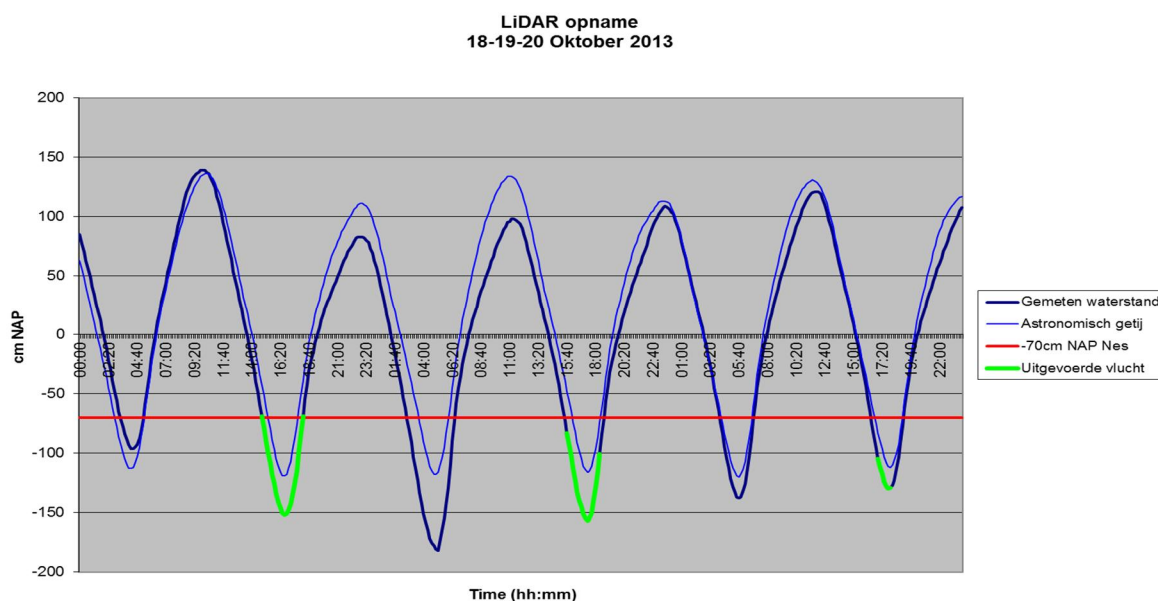
In oktober 2013 is er op 18, 19 en 20 oktober een nieuwe LiDAR survey uitgevoerd door Fugro. Daarnaast zijn in dezelfde week (wk 42) en 2 weken daaropvolgend (week44) een aantal ground control points (GCP's) gemeten op de wadplaten. Deze GCP's dienen als een 'ground-truth', om de nauwkeurigheid te verifiëren en om eventueel de dataset integraal op te tillen of te laten zakken.

De vlieglijnen van de LiDAR opnames in 2013 zijn per opnamedag (18, 19 en 20 oktober 2013) aangegeven in Figuur 3.3. Net als voorgaande jaren zijn de vluchten uitgevoerd tijdens laagwater, bij waterstanden lager dan -0.7 m NAP bij Nes (Ameland). Er wordt gevlogen op een hoogte van 440 m met een snelheid van 222 km/h, wat betekent dat de vliegduur van één lijn ongeveer 10 minuten bedraagt.



Figuur 3.3 Vlieglijnen, dwarsstroken en data waarop LiDAR opnames zijn uitgevoerd, bron: Fugro (2013).

Tijdens de meetdagen was het goed weer, de lucht was helder. Tijdens de tweede dag heeft het licht geregend. De vluchtlijnen die hierdoor zijn beïnvloed zijn tijdens de derde dag opnieuw gevlogen. De waterstanden tijdens de vluchtdagen zijn weergegeven in Figuur 3.4. Tijdens de eerste en tweede opnamedag is er een groot verschil tussen het astronomisch getij en de gemeten waterstand, dit verschil kan verklaard worden door effecten van wind.



Figuur 3.4 Gemeten waterstanden bij Nes (zwart) gedurende de survey dagen. Momenten waarop data is ingewonnen zijn aangegeven met groen.

In 2013 is voor het eerst met een nieuwe scanner gewerkt, de Riegl Q680i laserscanner, waar in het verleden met de FLIMAP 1000 scanner is gewerkt. Deze scanner zou beter moeten presenteren voor sterk absorberende oppervlakken, waarvoor de reflectie laag is. Daarnaast zijn er meer GCP's (zie Hoofdstuk 3.2) gebruikt dan in voorgaande jaren, omdat er zes GCP's zijn toegevoegd aan de randen van het meetgebied. De GCP's worden gebruikt om de dataset te corrigeren. Zie ook Fugro (2013).

3.3 Datalevering door Fugro

De Fugro LiDAR data voor 2010 (voorjaar), 2011 (voorjaar en najaar), 2012 (najaar) en 2013 (najaar) zijn allen in dezelfde twee formaten aangeleverd:

- 1 als ASCII bestanden op een 1 m x 1 m grid (hierna te noemen "ASCII 1x1 m"). De ASCII bestanden bevatten x-, y- en z-waarden. De x- en y-coördinaat geven horizontale positie aan in RijksDriehoek coördinaten en de z-coördinaat is de gemeten hoogte t.o.v. NAP.
- 2 als ruwe LAS punten ook wel XYZiRGB bestanden (hierna te noemen "LAS punten"). De LAS data bevatten alle punten, d.w.z. 0-5 punten per m². De LAS punten worden aangeleverd in LAS formaat 1.2 en bevatten ook informatie als vluchtlijn, tijd, return nummer, intensiteit, scan hoek en RGB. Voor de 2013 LiDAR data zijn geen RGB waarden beschikbaar. Deze data zijn al op zekere hoogte verwerkt door Fugro, zo zijn bijvoorbeeld uitschieters verwijderd.

De ASCII 1x1 m data (1) vormen de basis voor deze analyse.

3.4 Verwerking van de data t.b.v. analyses

De ASCII 1x1m data worden op dezelfde manier verwerkt als in voorgaanden jaren en staat beschreven in Cronin en Wang (2012). Samengevat worden de volgende stappen doorlopen:

- 1 De ASCII 1x1 m data worden omgezet naar een resolutie van 10 m x 10 m en gegroepeerd per kaartblad. Bij het omzetten wordt geen data geïnterpoleerd, de punten binnen het 10 m x 10 m vak worden gemiddeld. Vakken zonder punten blijven leeg. De indeling van de kaartbladen is identiek aan de 'vaklodingen' data van Rijkswaterstaat. In Elias et al. (2013) is gekeken naar het effect van verschillende gridgroottes (5 m, 10 m en 20 m) op resultaat analyse en geconstateerd dat het effect verwaarloosbaar klein is. Vanuit praktisch oogpunt is gekozen om met 10m x 10m grids te werken.
- 2 Visualiseren van de bodemhoogtes op 10 m x 10 m grid (Hoofdstuk 3.4.1)
- 3 Visualiseren van de bodemhoogtes op 10 m x 10 m grid na toepassing nat/droog filter (Hoofdstuk 3.4.2). De dekking (aantal cellen met een waarde binnen de polygoon) is weergegeven in Tabel 3.1. Deze dataset wordt gebruikt voor de analyses.

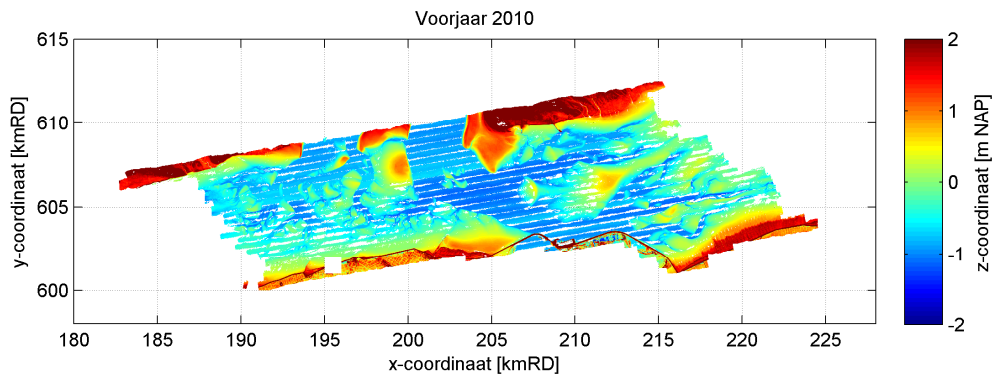
LiDAR opname	Dekking in [%]	
	In polygoon	In polygoon + filtering water
Voorjaar 2010	92.75	50.28
Voorjaar 2011	80.48	50.10
Najaar 2011	90.56	50.79
Najaar 2012	94.82	50.59
Najaar 2013	100.00	53.26

Tabel 3.1 Weergave van het percentage cellen met waarden voor de verschillende filteringslagen.

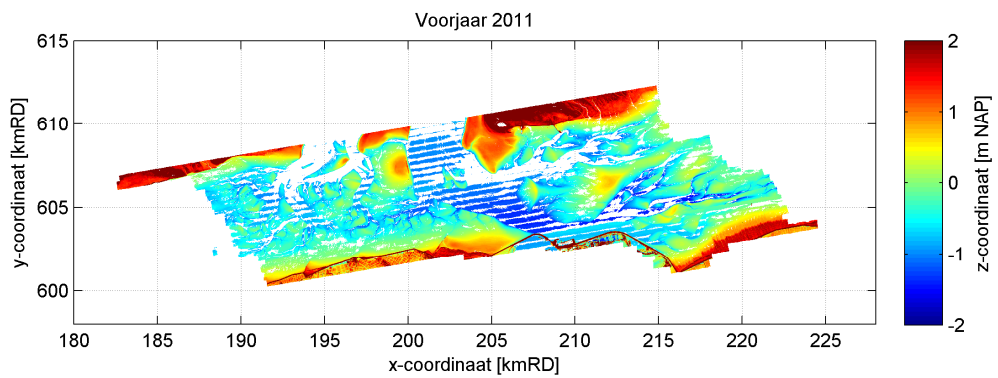
De polygoon genoemd in Tabel 3.1 is de omhullende van de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat. De polygoon is met een zwarte lijn aangegeven in Figuur 3.6.

3.4.1 Presentatie bodemhoogte op 10 m x 10 m grid

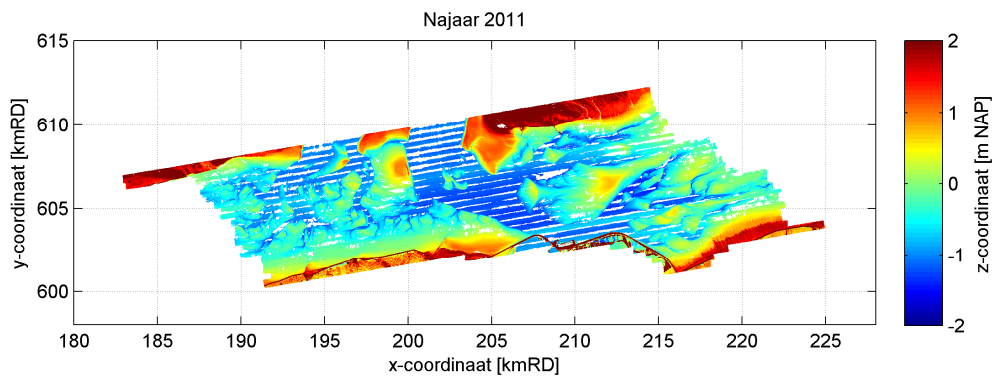
Figuur 3.5 toont de ASCII 1x1 m data voor alle beschikbare Fugro LiDAR data die zijn omgezet naar een 10 m x 10 m grid. De waterspiegel is duidelijk zichtbaar en heeft het sterkste streep patroon. Het is opvallend dat de data van 2013 een volledige dekking hebben, ook op het water. Gezien de datadichtheid in Figuur 3.1 doet dit vermoeden dat er al een interpolatieslag heeft plaatsgevonden om tot de ASCII 1x1 m data te komen.



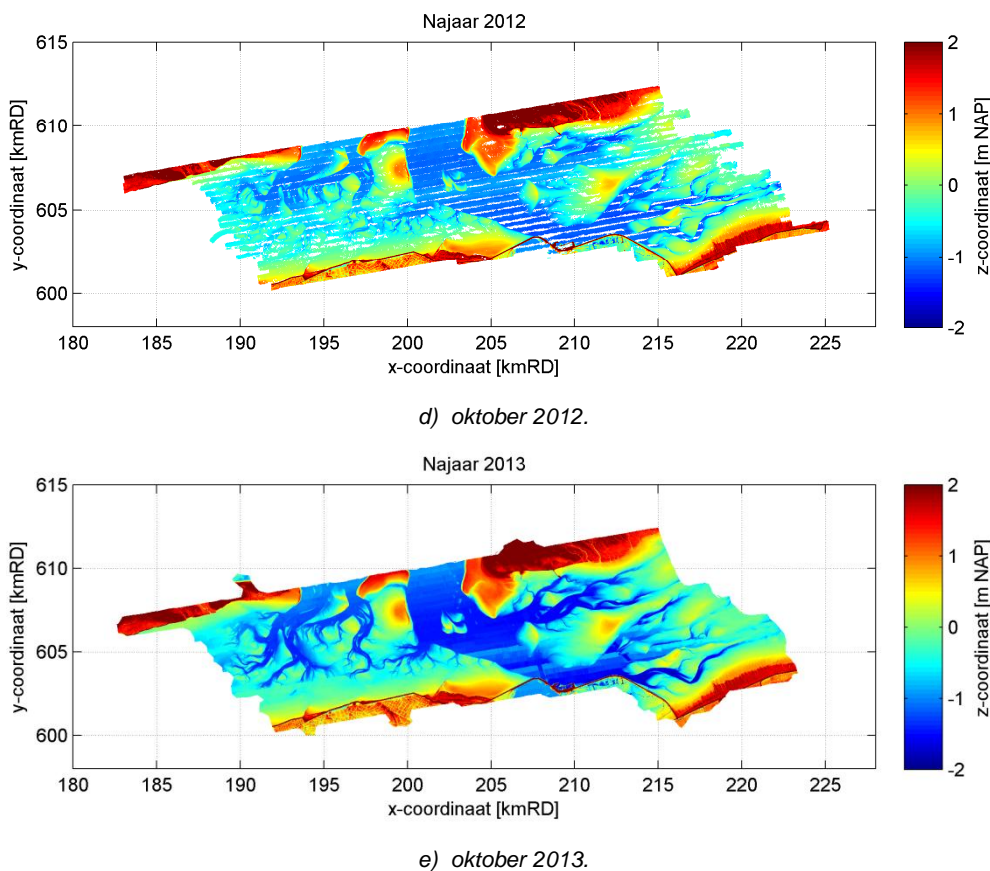
a) april 2010.



b) april 2011.



c) september 2011.

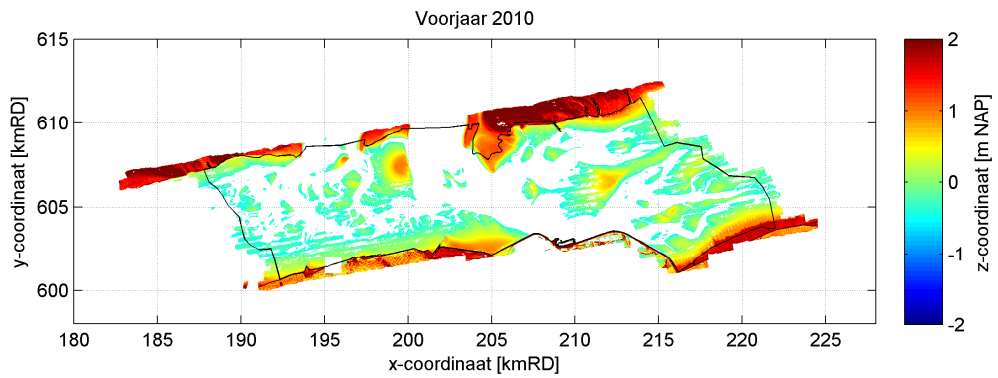


Figuur 3.5 Visualisatie van de ASCII 1x1m LiDAR bodemhoogte gegevens op een 10m x 10m grid voor de LiDAR opnames gemaakt tussen april 2010 en oktober 2013.

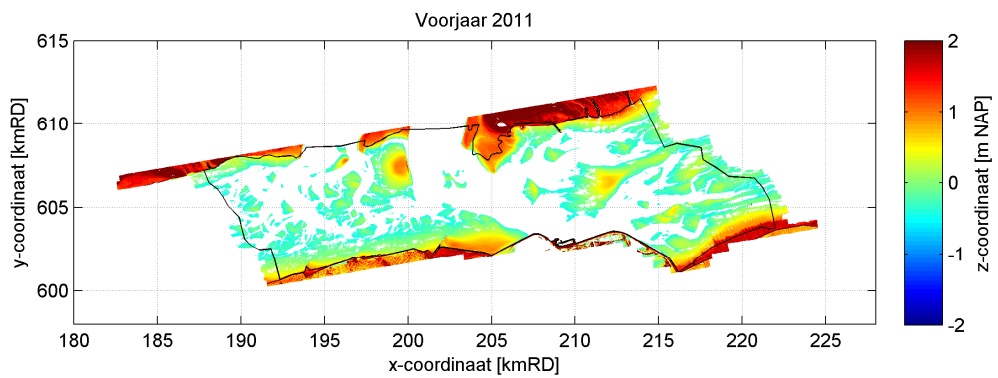
3.4.2 Presentatie bodemhoogte op 10 m x 10 m grid na nat / droog filtering

Door water uit de dataset te filteren, wordt het van de verschillen in plaat hoogte tussen twee opnamen niet verstoord door verschillen in waterstanden. In de ongefilterde set domineren variaties in waterstanden in de geulen het beeld op de verschilkaarten. Echter, filtering van water op een meer geavanceerde manier dan alle punten lager dan -0.5m NAP te verwijderen is zonder aanvullende informatie niet triviaal en verkeert nog in experimentele fase. Hierdoor zijn natte wadplaat en water niet te onderscheiden. In Elias et al. (2013) is met een handmatige detectie van de waterlijn geëxperimenteerd. Deze correctie is niet reproduceerbaar en de nauwkeurigheid van weergave nat / droog is niet gegarandeerd. Ook is gekeken of de RGB waarden hier uitkomst kunnen bieden. Maar uit gesprekken met Fugro blijkt dit pad ook dood te lopen.

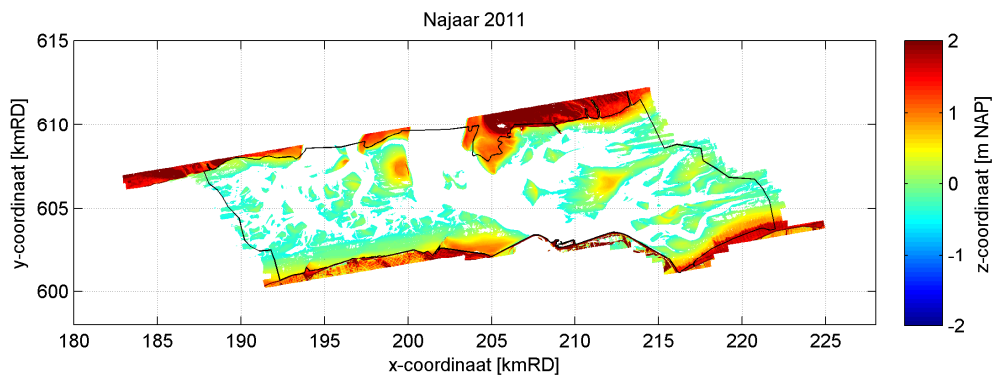
Aangezien de interesse uitgaat naar de ontwikkelingen van de plaat hoogte en -oppervlak en niet naar de plaat-geul overgang is besloten met een grove filtering van enkel waarden hoger dan -0,5m NAP te werken. **De consequentie is dat de plaatarealen berekend in deze studie enkel representatief zijn voor plaatoppervlak boven de -0,5m NAP contour.**



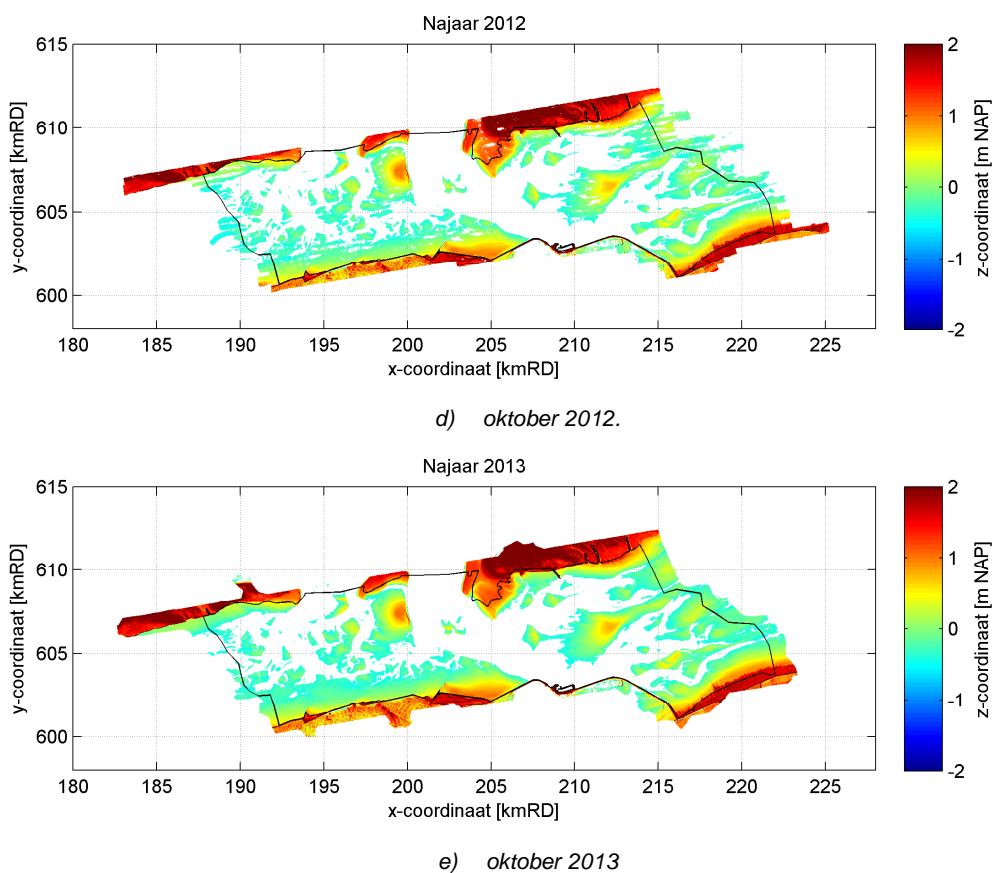
a) april 2010.



b) april 2011.



c) september 2011.



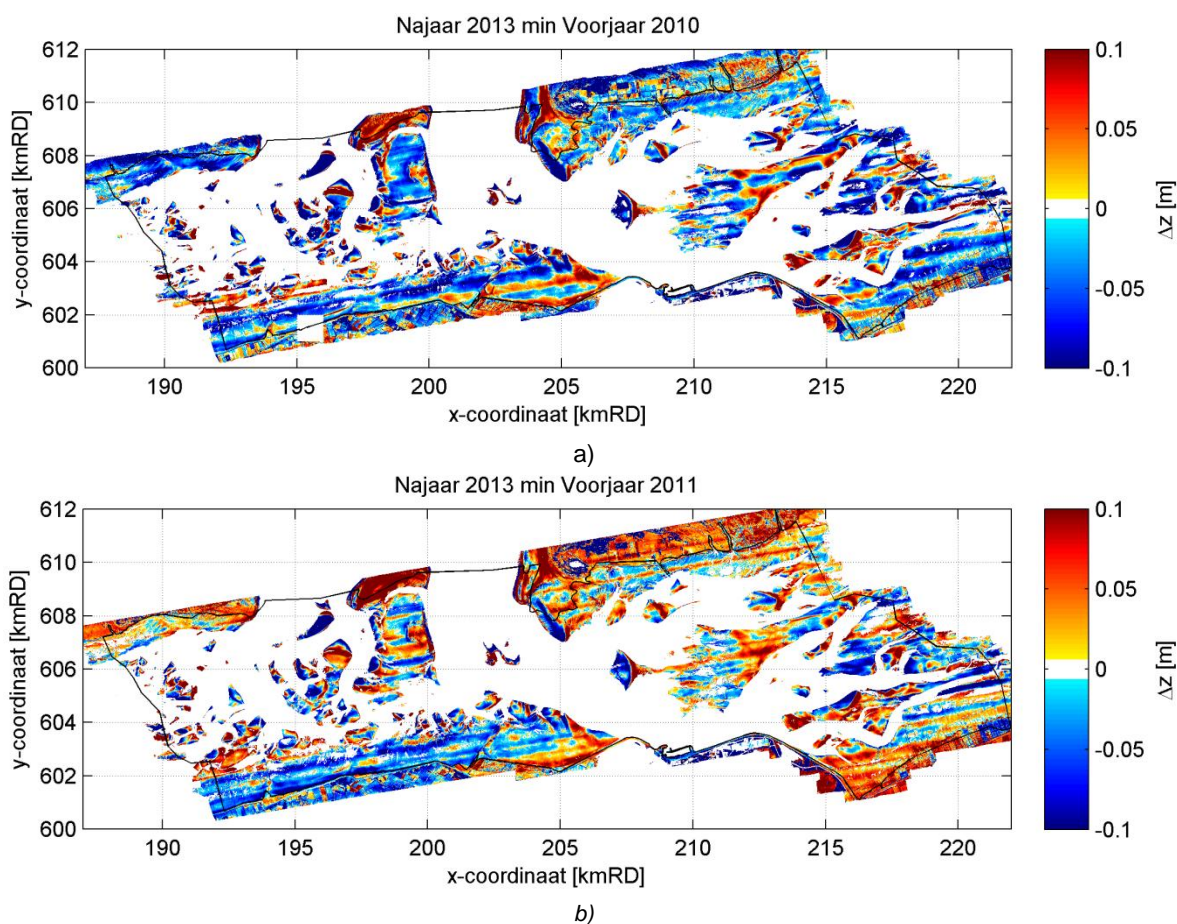
Figuur 3.6 Visualisatie van de ASCII 1x1 m gegevens op een 10 m x 10 m grid waarbij alle waarden kleiner dan -0,5 m NAP verwijderd zijn voor de LiDAR opnames gemaakt tussen april 2010 en oktober 2013.

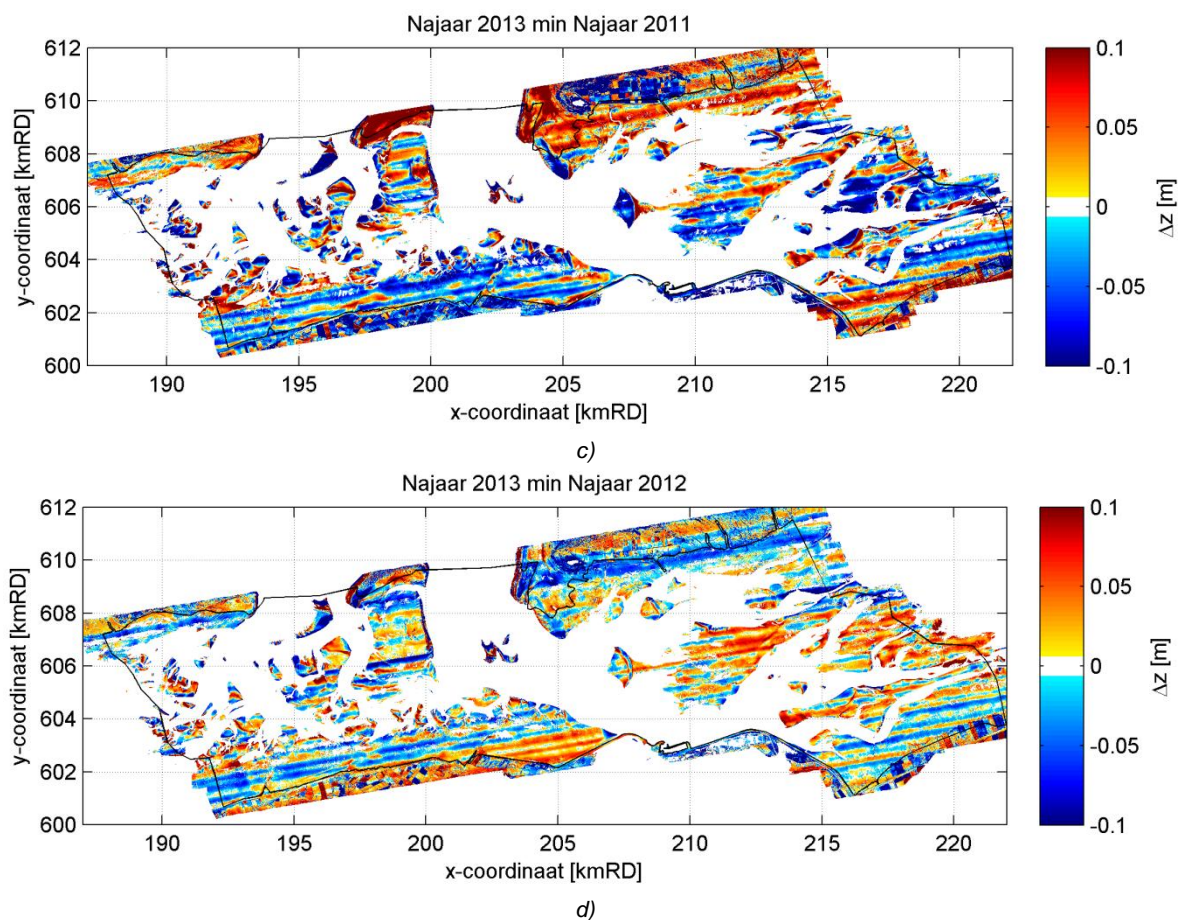
4 Analyse verschilkaarten

In voorgaande studies is al gebleken dat het nog niet mogelijk is om conclusies te trekken over de morfologische ontwikkeling van de wadplaathoogtes op basis van de huidige LiDAR dataset (2010-2013). In dit hoofdstuk zullen we wel de verschillen tussen de LiDAR opnamen in kaart brengen en beargumenteren in termen van sedimentatie en erosie.

4.1 Sedimentatie – erosieplots en histogram t.o.v. 2013

De bodem van het najaar van 2013 wordt vergeleken met alle eerdere LiDAR bodems door verschilkaarten te maken. De verschilkaarten zijn geconstrueerd met de 10 m x 10 m data zoals weergegeven in Hoofdstuk 3.4.2. Het resultaat staat weergegeven in Figuur 4.1.

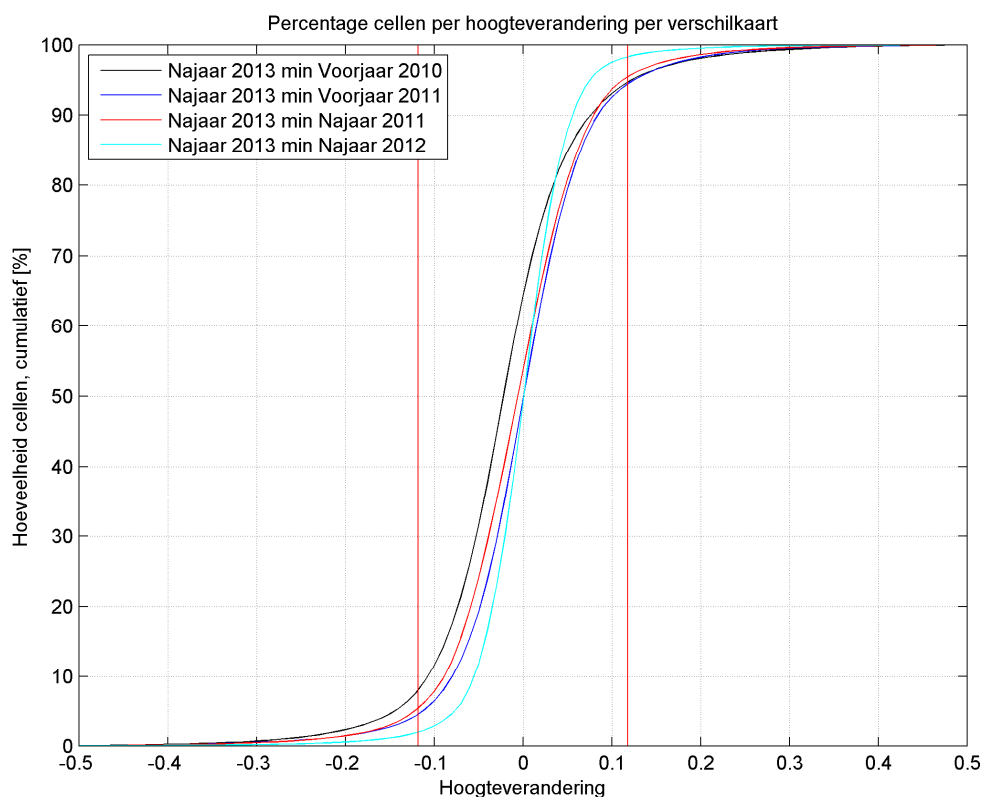




Figuur 4.1 Sedimentatie (positief) en erosie (negatief) in m voor najaar 2013 t.o.v. de andere LiDAR opnamen op basis van 10 m x 10 m data met alleen water eruit gefilterd.

Het vlekkerige patroon op de wadplaten waarin de vluchtbanen duidelijk zichtbaar zijn valt op. Deze patronen zijn niet fysisch verklaarbaar in termen van sedimentatie of erosie en moeten dus het gevolg zijn van fouten in de dataset. De geobserveerde veranderingen tussen de opnamen zijn relatief klein ten opzichte van de door Fugro gerapporteerde fout voor verschilkaarten van 10,8 cm voor 68% van de afwijkingen (Fugro 2013). Dit is in lijn met eerdere bevindingen. Dit is ook gevisualiseerd in Figuur 4.2, waar het aantal cellen in procenten met een bepaalde hoogteverandering cumulatief is uitgezet. Hoe steiler de lijn rond de 0 m bodemverandering zit, des te meer punten er zijn met een bodemverandering rond de 0 m. Voor de vergelijking tussen 2013 en 2012 is de lijn erg steil, en vallen dus bijna alle bodemveranderingen binnen de foutmarge. In Figuur 4.2 is ook te zien dat naarmate er een langere periode tussen de verschilkaarten zit, het aantal cellen met een hoogteverandering die groter is dan de foutmarge toeneemt. Wordt de bodem van 2010 vergeleken met 2013, dan is te zien dat 10% van de cellen een erosietrend laat zien die groter is dan de foutmarge en ~7% van de cellen een sedimentatietrend toont die groter is dan de foutmarge.

Ondanks de hoge mate van detail waarmee de kavels en wegen kunnen worden onderscheiden op het vaste land (als gevolg van de hoge punt dichtheid), laten de wegen en steden ook een verschil zien bij vergelijking met 2013. Je zou 0 cm verandering verwachten in deze gebieden, of een effect van bodemdaling. Naast de aangegeven invloedsfactoren op de nauwkeurigheid in Hoofdstuk 3.1 kan er mogelijk ook een verklaring gevonden worden in de manier waarop de dataset is gecorrigeerd na vergelijking met de GCP's (integraal optillen of laten zakken van de dataset).



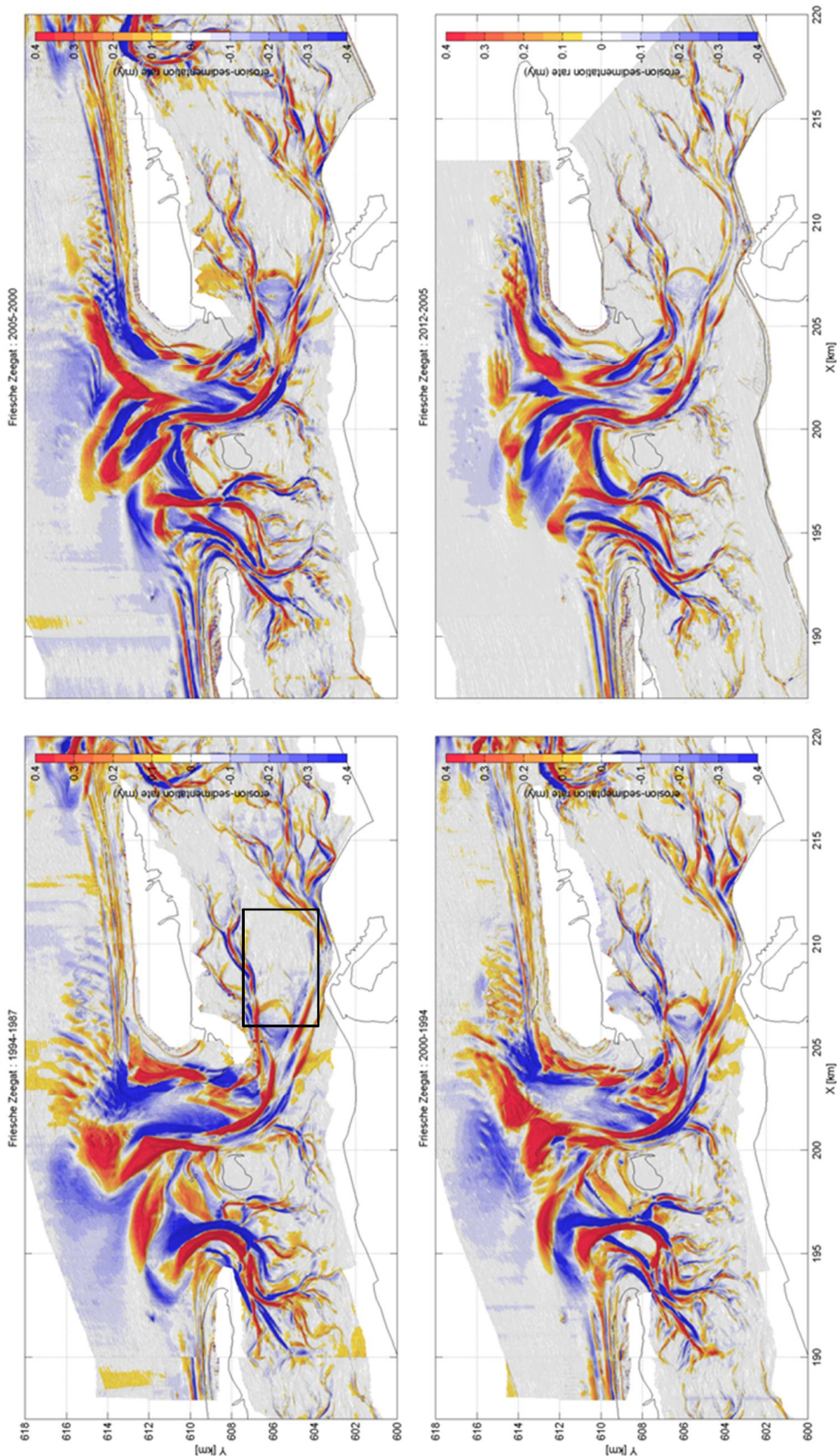
Figuur 4.2 Verdeling van het aantal cellen [%] cumulatief uitgezet tegen de hoogteverandering ten opzichte van de 2013 LiDAR meting. Rode lijnen geven de foutmarge voor verschilkaarten van 11.8 cm aan.

4.2 Erosie en sedimentatie snelheid

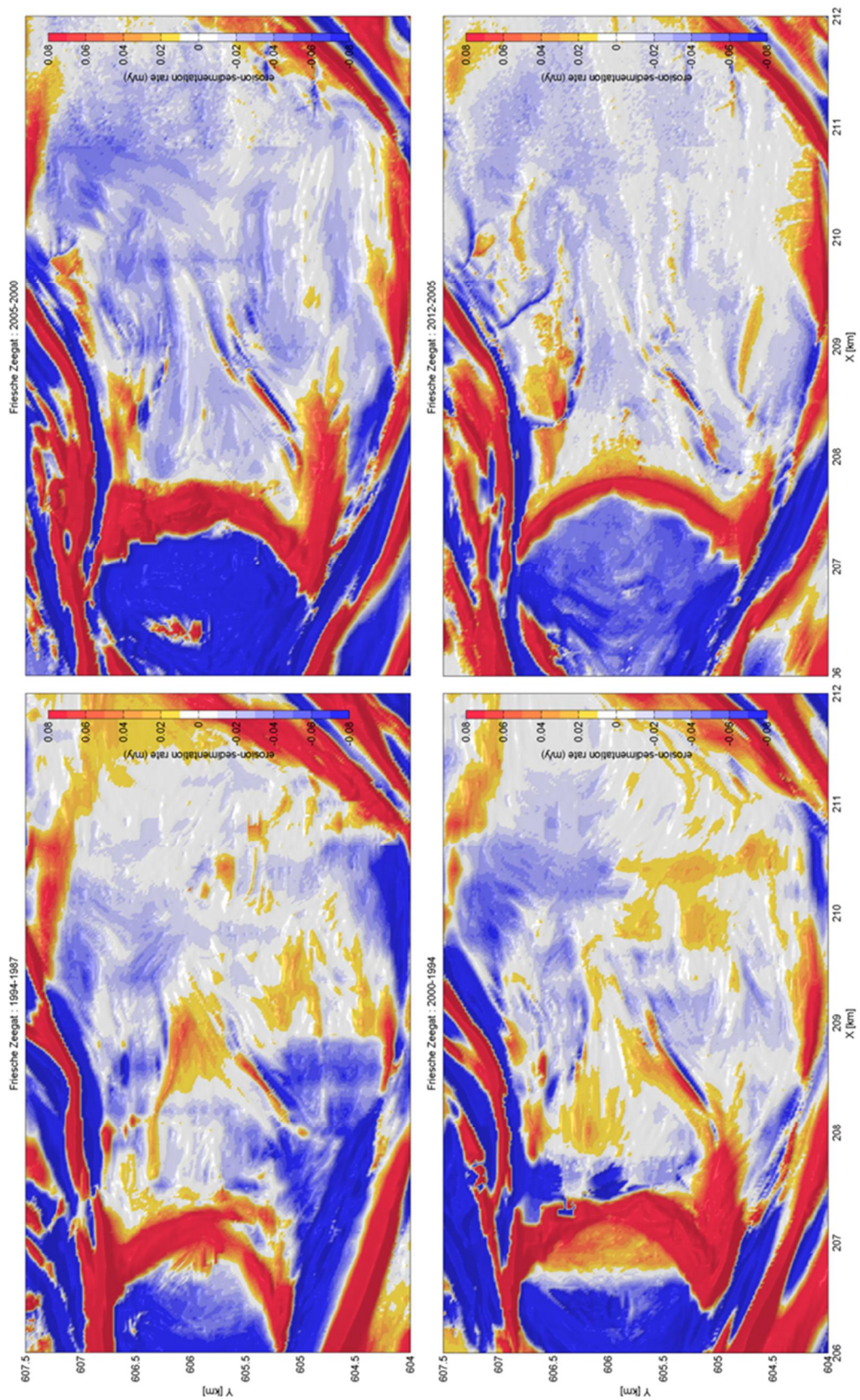
In deze paragraaf vergelijken we naar de *snelheid* van bodemveranderingen, door de bodemveranderingen uit de vorige paragraaf te interpoleren of extrapoleren naar veranderingen per jaar. De figuren van erosie/sedimentatiesnelheden zorgen ervoor dat de veranderingen tussen de verschillende jaren beter met elkaar kunnen worden vergeleken en dat de snelheden kunnen worden vergeleken met de erosie/sedimentatie snelheden bepaald uit een lange-termijn meetreeks van vaklodingen van Rijkswaterstaat voor 1987-2012.

In Figuur 4.3 zijn de lange-termijn trends (1987-2012) van de bodemverandering in het Friesche Zeegat weergegeven op basis van de RWS data. In het Friesche zeegat domineren geulmigraties het beeld. De veranderingen op de platen tussen de opeenvolgende opnames (orde 24 cm/6 jaar) zijn significant ten opzichte van de meetfout. Oftewel, het geobserveerde gedrag is representatief voor de natuurlijke dynamiek in de morfologische ontwikkeling van de wadplaten / wadplaathoogtes. Zie ook Hoofdstuk 1.3.

Kijken we in meer detail naar ontwikkeling van een plaat (Figuur 4.4), dan zien we hier vooral in de twee oudere metingen (1987-2000) een ruimtelijk variabel patroon van sedimentatie en erosie. De recente bodemveranderingen (2000-2012) worden gedomineerd door afnemende erosie met erosiewaarden tussen 0 en 0.04 m/jaar. Er zijn geen duidelijke trendbreuken of veranderingen te zien tussen de laatste metingen (2005-2012) en de voorgaande metingen. Gemiddeld over de recente metingen (2005 – 2012) ligt de erosiesnelheid van de platen in de orde 2 tot 3 cm/jaar. Er is geen verschil in snelheid te onderscheiden in de gaswinningsgebieden, zie Figuur 1.1, in vergelijking met het overige gedeelte van het bekken.



Figuur 4.3 Gemeten sedimentatie-erosiesnelheden (m/jaar) gebaseerd op de vaklodingen over de periode 1987-2012.



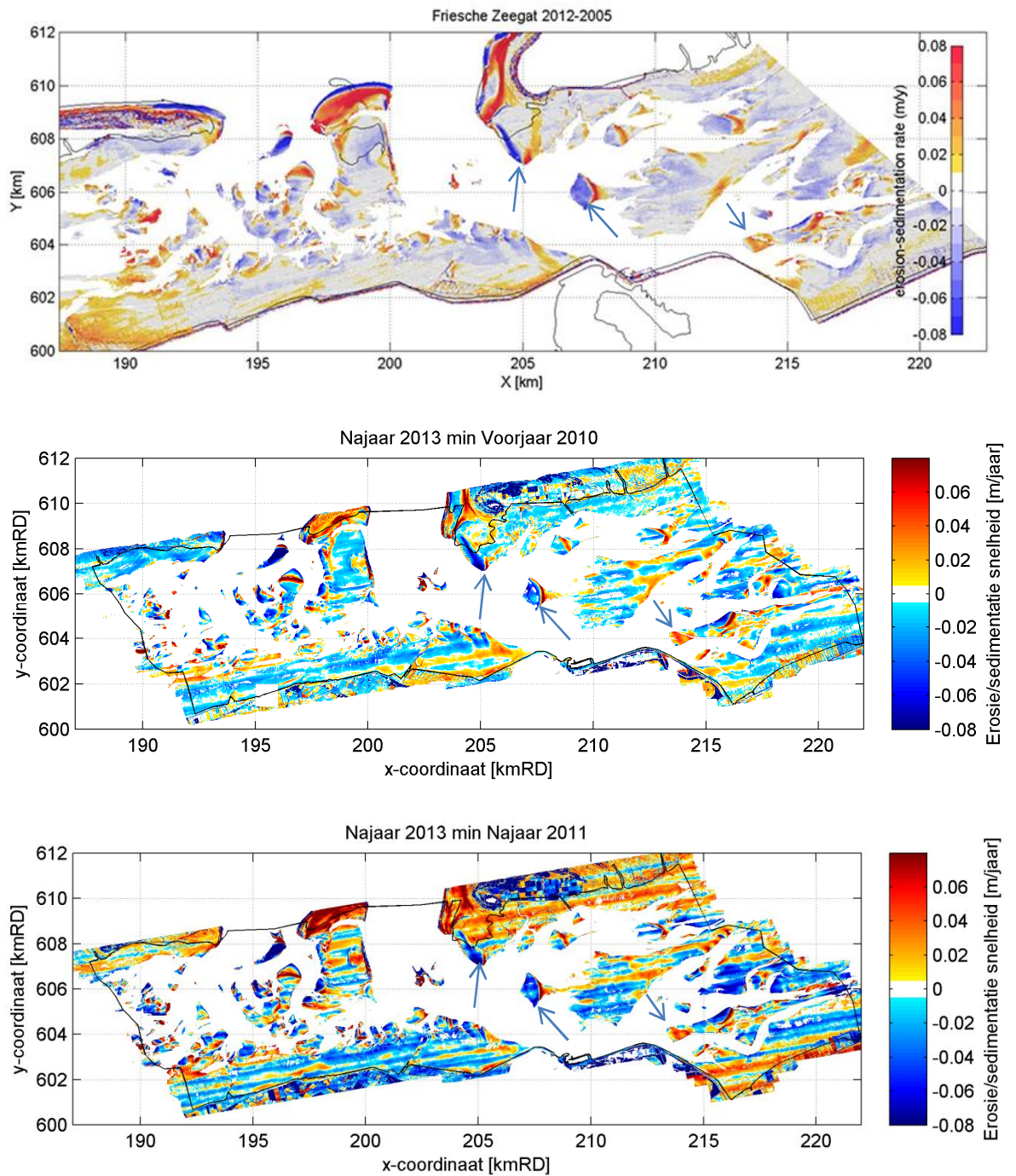
Figuur 4.4 Detailopname van de gemeten erosie/sedimentatie snelheden (m/jaar) gebaseerd op de vaklodingen over de periode 1987-2012. Zie Figuur 4.3 voor ligging van dit detail.

In Figuur 4.5 vergelijken we de opgetreden erosiesnelheid op basis van de Rijkswaterstaat data (boven) en de LiDAR metingen van periode 2013 (najaar) minus 2010 (voorjaar) en van 2013 (najaar) minus 2011 (najaar). De laatste dataset is opgenomen om minder effect van seizoensvariatie mee te nemen door twee najaarsbodems te vergelijken. Alle datasets zijn genormaliseerd naar m/jaar.

Hoewel de LiDAR data van Fugro (een deel van de vaklodingen bestaat ook uit LiDAR opname) nog steeds een gestreept patroon laten zien, zijn sommige patronen nog wel duidelijk terug te zien. Een paar voorbeelden hiervan zijn aangegeven met een pijltje.

In beide datasets is de bulk van het oppervlak eroderend. De erosiesnelheden zijn over het grootste deel kleiner dan 3 cm/jaar. In de LiDAR data zijn gebieden met een hogere erosiesnelheid waarneembaar (tot 6 cm/jaar). De erosie/sedimentatie tendens lijkt over de periode 2010 – 2013 zwakker dan de periode 2011 – 2013. Wellicht komt dit doordat de meetfout wordt uitgemiddeld over een langere periode. Aangezien de locaties met deze hoge erosiesnelheden overeenkomen met de vluchtbanen lijkt het aannemelijk dat deze verklaard kunnen worden door meetfouten.

Gemiddeld over de recente metingen (2005 – 2012) ligt de erosiesnelheid van de platen in de orde 2 tot 3 cm/jaar. Er is geen verschil in snelheid te onderscheiden in de gaswinningsgebieden (zie Figuur 1.1) in vergelijking met het overige gedeelte van het bekken.



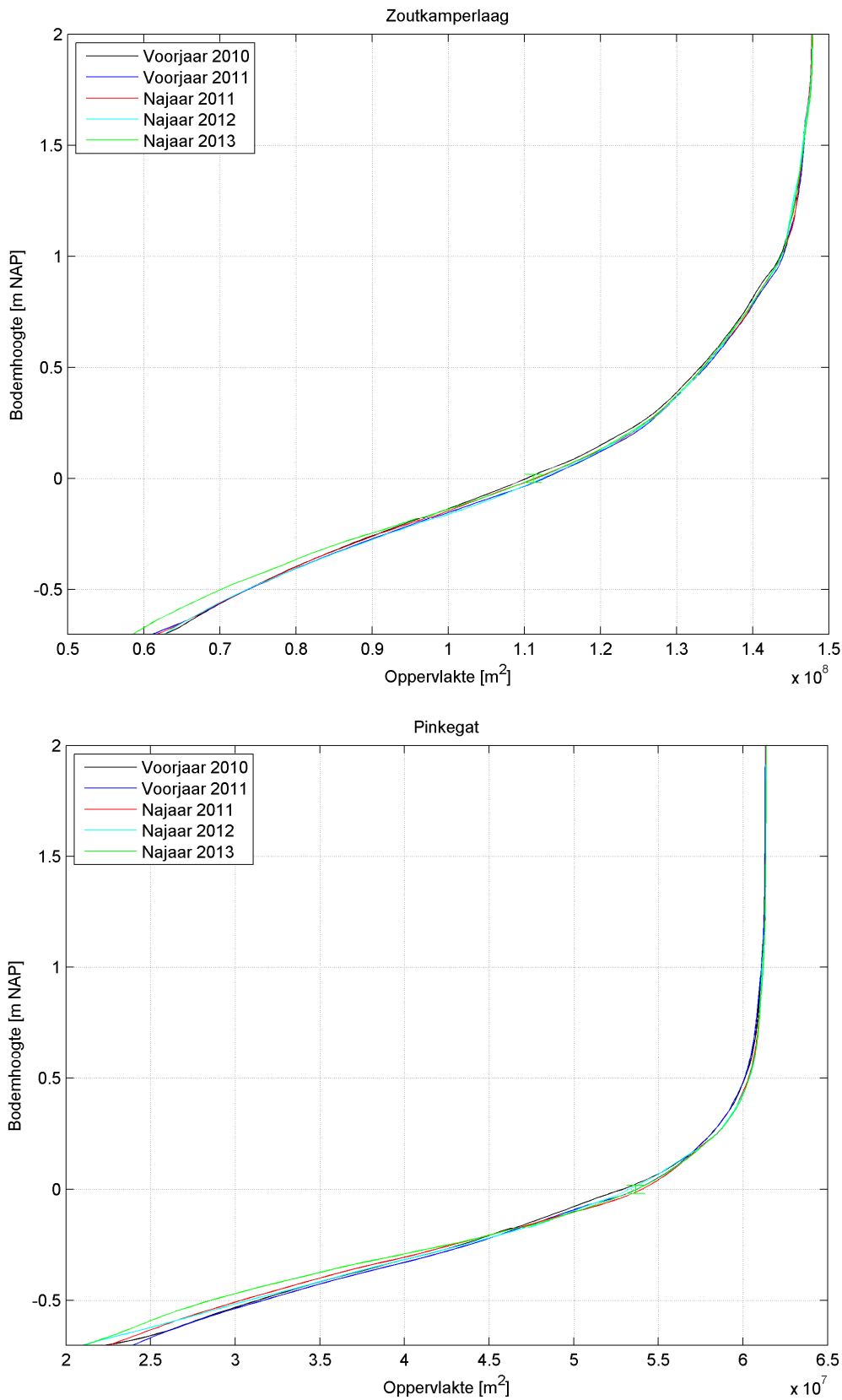
Figuur 4.5 Snelheid van sedimentatie (positief) en erosie (negatief) in m/jaar op basis van RWS vakclodingen voor de periode 2005-2012 (boven) en voor de LiDAR 2013 najaar minus 2010 voorjaar (midden) en LiDAR 2013 najaar minus 2011 najaar (onder).

5 Analyse per kombergingsgebied

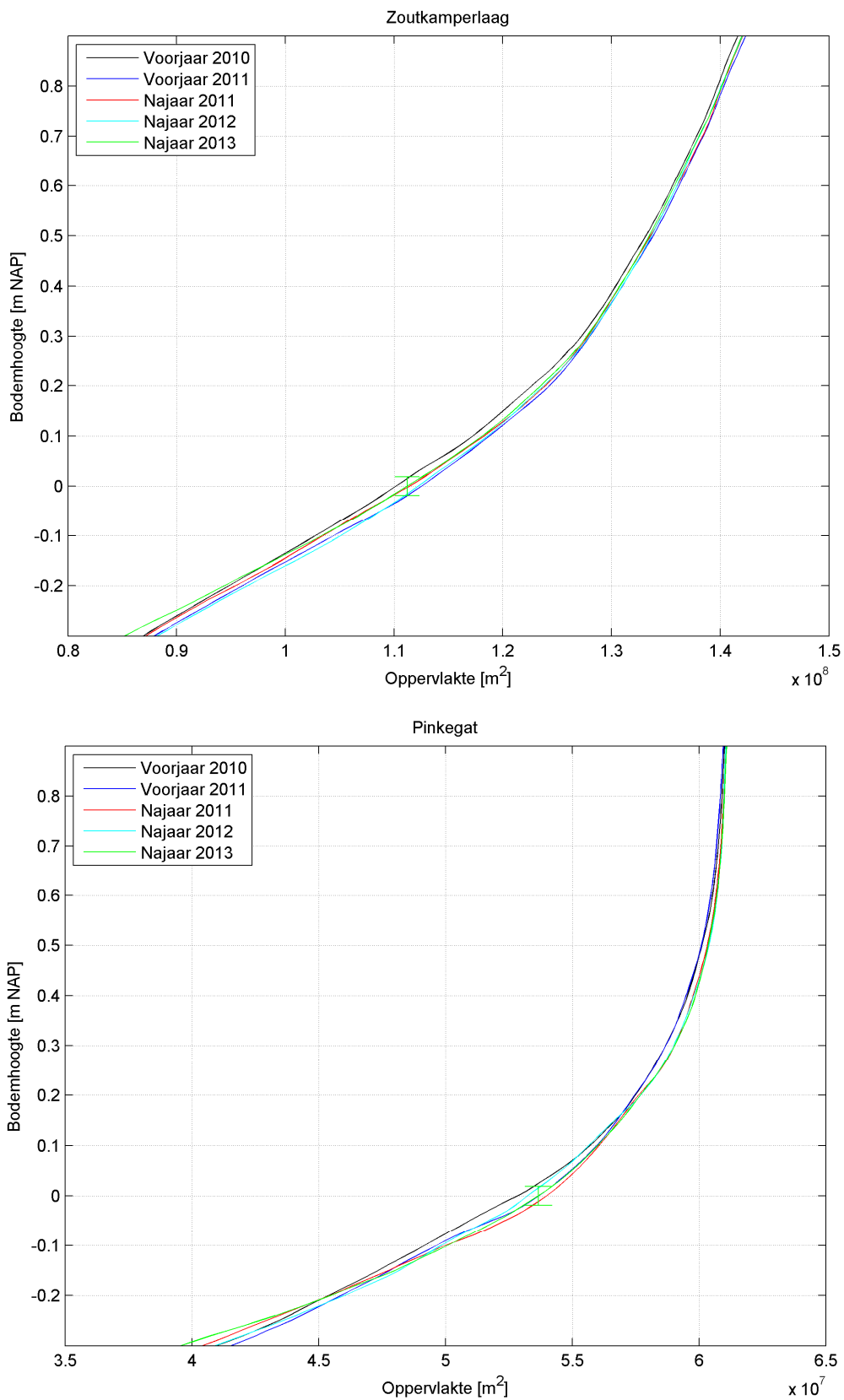
De analyse van de twee kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat afzonderlijk is gebaseerd op hypsometrische curven en histogrammen. De hypsometrische curven geven per bodemhoogte het totale oppervlak van de LiDAR meting onder deze bodemhoogte. Het histogram geeft de oppervlakte verdeeld naar hoogteklaas weer (zie Cronin en Wang (2012) voor details). De hypsometrische curve wordt altijd per bekken bekeken en heeft een typerende S-vorm, omdat er relatief veel intergetijdengebied is. Aan de hand van de hypsometrische curven en histogrammen kunnen de verschillende LiDAR-metingen met elkaar worden vergeleken.

Een kwestie die aandacht vraagt is verschillen in de gebiedsdekking van de data die de basis vormen voor deze analyse. In Cronin en Wang (2012) worden enkel de werkelijk aanwezige datapunten gebruikt voor de analyse. Er vanuit gaande dat alle missende punten water betreffen, geeft dit een goed beeld van de hypsometrische curve boven de -0.5m NAP. In Elias et al. (2013) zijn de gaten opgevuld door driehoeksinterpolatie vanuit de omliggende punten om zo 100% gebiedsdekking te krijgen. Impliciete aanname bij deze aanpak is dat interpolatie van de omliggende punten een voldoende nauwkeurige beschrijving van de missende data geeft. In huidige studie is daarom besloten om de methode van Cronin en Wang (2012) te hanteren, omdat er vanuit wordt gegaan dat alle missende punten waterpunten zijn.

Figuur 5.1 geeft de hypsometrische curven berekend op basis van de vijf LiDAR opnamen en Figuur 5.2 geeft hier een detail van. De hypsometrische curven van zowel Zoutkamperlaag als het Pinkegat laten een trend van verlaging zien van de wadplaten boven het niveau -0.1 m NAP t.o.v. het jaar 2010. Beneden het niveau van -0.1 m NAP neemt het areaal in 2013 juist weer toe. De veranderingen in beide vloedkommen tussen opeenvolgende opnames zijn erg klein ten opzichte van de meetfout, zie de groene errorbar op 0 m NAP. De errorbar geeft de grootte van de systematische fout aan voor 2013, deze is voor alle jaren en voor alle bodemhoogtes gelijk. Doordat de veranderingen klein zijn ten opzichte van de fout, kunnen er geen conclusies getrokken worden over natuurlijke fluctuatie dan wel morfologische trends van de wadplaten.



Figuur 5.1 Hypsometrische curven voor Zoutkamperlaag en Pinkegat voorjaar 2010, voorjaar 2011, najaar 2011, voorjaar 2012, najaar 2012 en najaar 2013. De groene errorbar bij 0 m NAP geeft de grootte van de systematische fout weer, die voor alle jaren en alle bodemhoogtes gelijk is.

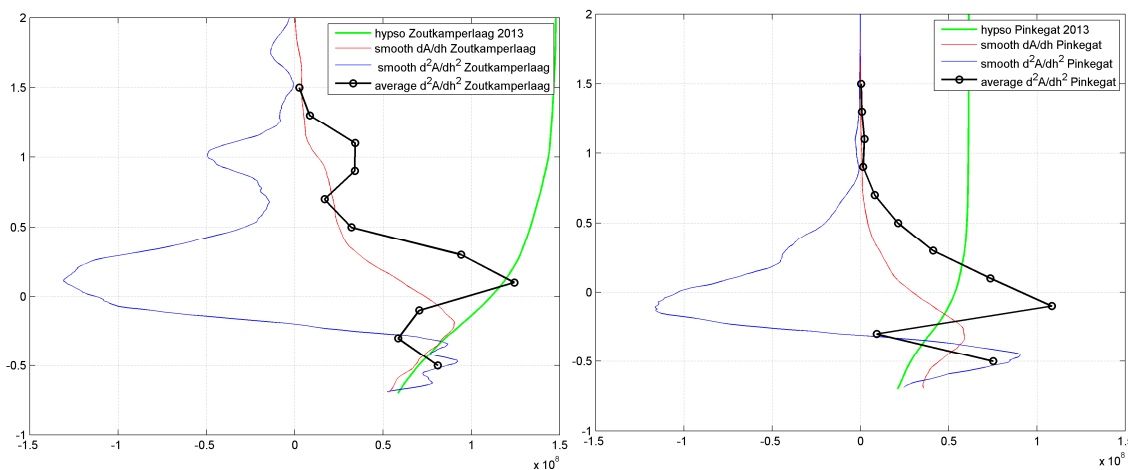


Figuur 5.2 Detail weergave van de hypsometrische curven voor Zoutkamperlaag en Pinkegat voorjaar 2010, voorjaar 2011, najaar 2011, voorjaar 2012, najaar 2012 en najaar 2013. De groene errorbar bij 0 m NAP geeft de grootte van de systematische fout weer, die voor alle jaren en alle bodemhoogtes gelijk is.

Doordat de lijnen dicht op elkaar liggen zijn de verschillen in de hypsometrische curven moeilijk te onderscheiden. Het histogram gepresenteerd in Figuur 5.4 geeft een duidelijkere weergave van de verschillen. Voor iedere hoogteklaas is het oppervlak weergegeven. Omdat er een systematische fout zit in de hoogte, werkt dit ook door in de oppervlakte per hoogteklaas. Daarom is ook deze fout berekend, door de tweede afgeleide van de hypsometrische curve (Figuur 5.3) te vermenigvuldigen met de systematische fout, in formulevorm:

$$e_{\text{areaal}} = \left| \frac{d^2 A}{dz^2} \right| \cdot \Delta h \cdot e_{z,\text{sys}}$$

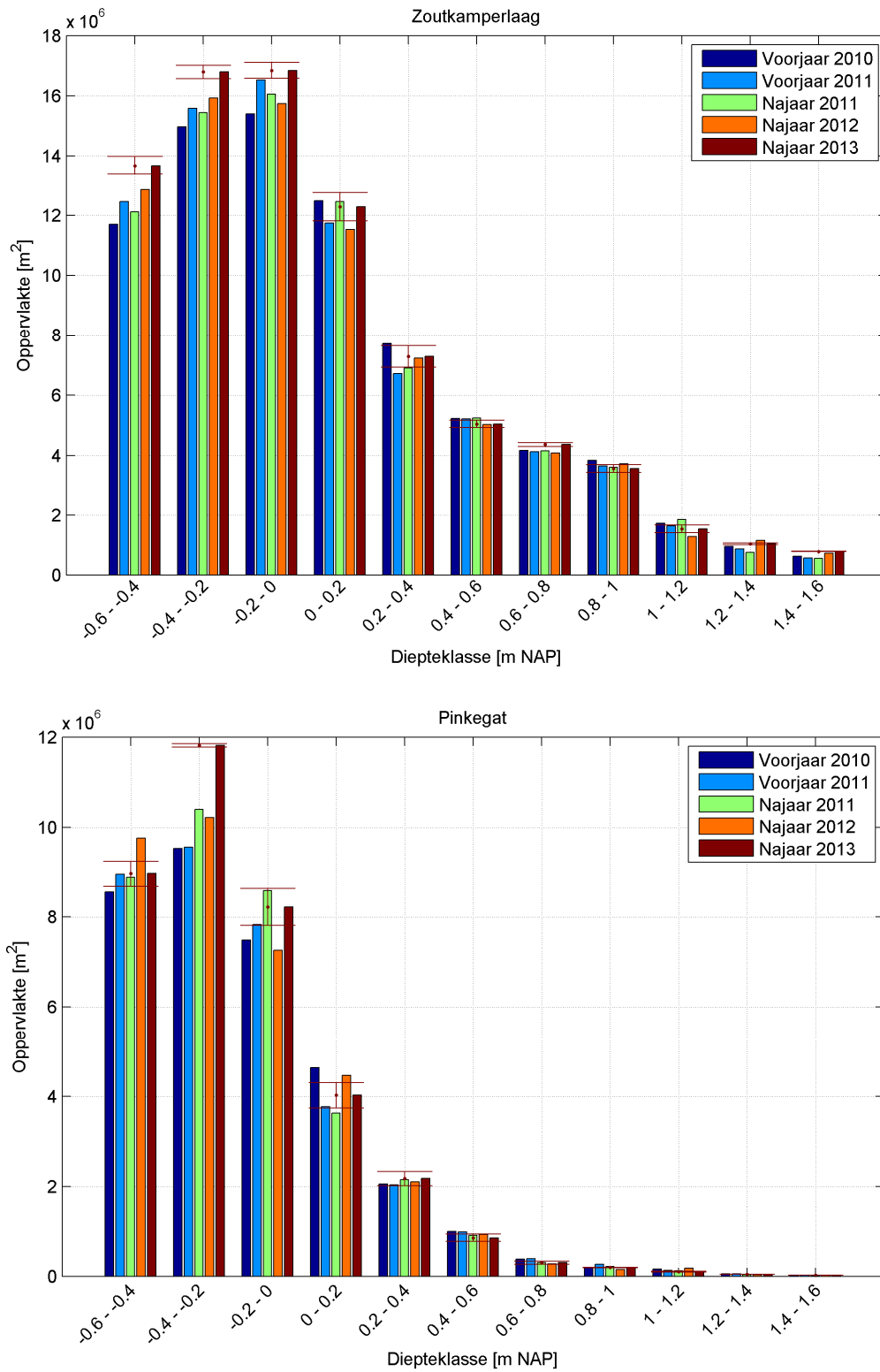
Deze fout is voor 2013 met bruine errorbars weergegeven in de histogrammen zoals afgebeeld in Figuur 5.4.



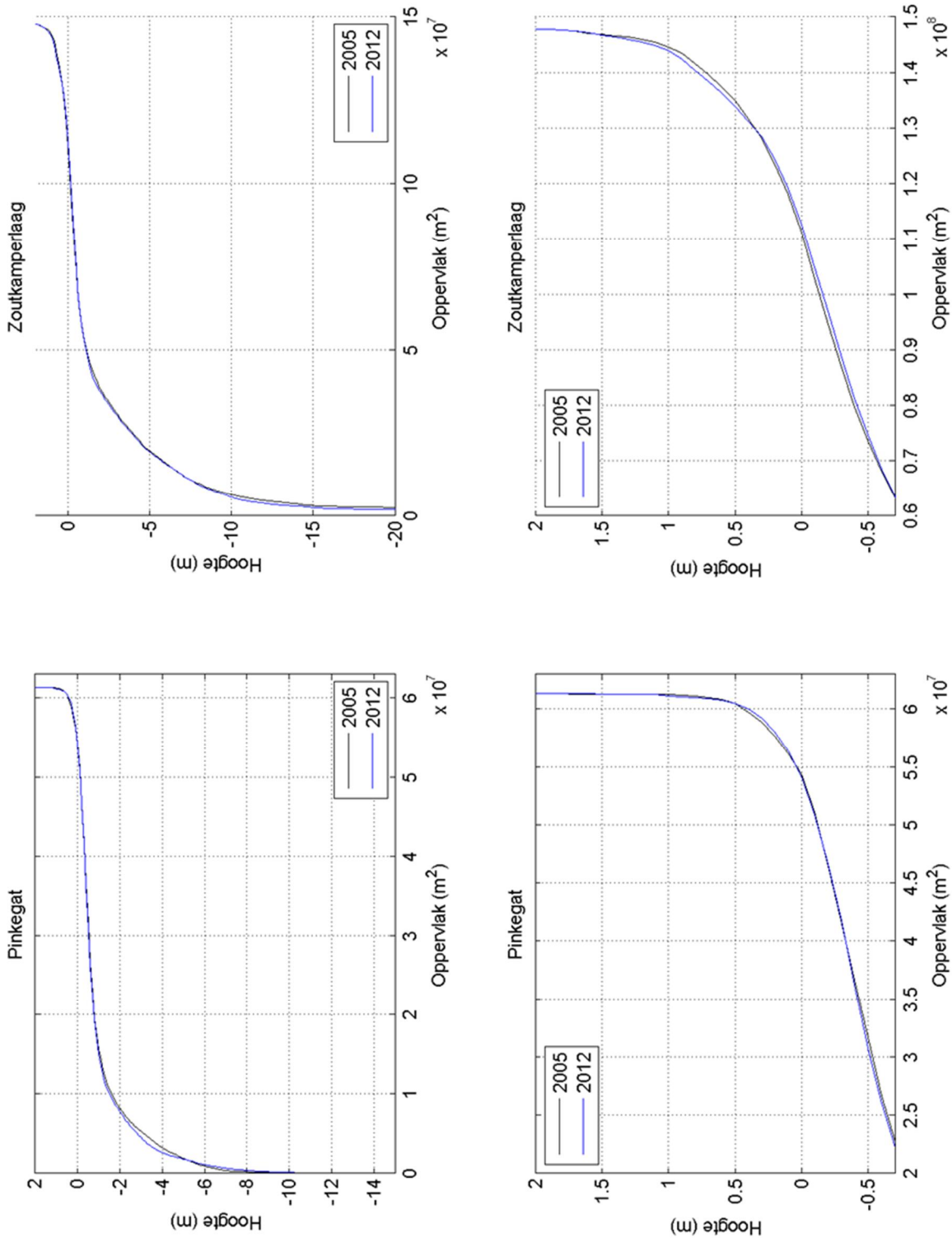
Figuur 5.3 Hypsometrische curve (groen) met eerste (rood) en tweede afgeleide (blauw). Op de horizontale as de oppervlakte [m²] en op de verticale as bodemhoogte [m NAP]. Afgeleiden zijn “gesmooth” met een window van 0.2 m. Zwarte lijn betreft de absolute waarde van het gemiddelde van de tweede afgeleide op het betreffende interval van de histogram.

Zowel Zoutkamperlaag als Pinkegat hebben een identieke respons in oppervlakte: er is een verschil in trend in het areaal boven en onder de 0 m NAP. In het diepere profiel (-0.6 en -0,2 m NAP bij Zoutkamperlaag en -0.4 -0.2 m NAP bij Pinkegat) zien we een toename van plaatoppervlakte door de tijd. Het merendeel van de klassen boven NAP in Zoutkamperlaag en alle klassen in het Pinkegat vertonen een afname in oppervlakte t.o.v. de 2010 bodem.

Ter referentie zijn ook voor de Rijkswaterstaat LiDAR data van 2005 en 2012 de hypsometrische curven bepaald (Figuur 5.5). Ook al zijn deze data op een andere manier verwerkt kan dit toch een beeld van de trend geven. Ook uit deze curven blijkt dat de veranderingen relatief gering zijn. De oppervlakten in het Pinkegat nemen iets toe beneden de 0 m NAP en af hierboven. In Zoutkamperlaag is dit beeld omgedraaid met een toename boven de 0 m NAP en een afname hieronder.



Figuur 5.4 Histogrammen van het oppervlak van de verschillende hoogteklassen voor Zoutkamperlaag en Pinkegat. De oppervlakte is per hoogte interval van 0,2 m bepaald. De bruine errorbars geven de grootte van de systematische fout per klasse voor het jaar 2013.



Figuur 5.5 Hypsometrische curven gebaseerd op de Rijkswaterstaat Vaklodingen voor de jaren 2005/2006 en 2012.

6 Conclusies, discussie en aanbevelingen

De LiDAR data verzameld door Fugro in het najaar van 2013 is vergeleken met de LiDAR data van najaar 2012, voor- en najaar van 2011 en de gegevens van voorjaar 2010. Het interessegebied betreft het Friesche Zeegat bestaande uit de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag.

Doel van deze exercitie is het in kaart brengen van de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten in het Friesche Zeegat sinds 2010. Hierbij gaat de interesse specifiek uit naar de langjarige trend van de variatie in wadplaathoogte en totaal oppervlak droogvallend wad als gevolg van relatieve zeespiegelstijging. Hierin is relatieve zeespiegelstijging gedefinieerd als het netto effect van zeespiegelstijging en bodemdaling (autonome bodemdaling en bodemdaling door gaswinning).

6.1 Conclusies

De conclusies zijn in lijn met de eerdere analyses Cronin en Wang (2012), Elias et al. (2013):

- De verschillen tussen de meetresultaten van de vijf geanalyseerde LiDAR opnames klein zijn ten opzichte van de fout in de data zoals aangegeven door Fugro. Hierdoor is onduidelijk welk deel van deze verschillen door natuurlijke dynamiek in morfologie en welk deel door meetfout verklaard kan worden (zie ook Hoofdstuk 1). Hierdoor kunnen geen conclusies getrokken worden over de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten.
- Er kunnen geen conclusies getrokken worden over het effect van relatieve zeespiegelstijging op wadplaathoogte omdat de meetfrequentie en –duur van de LiDAR data nog niet representatief is voor de tijdschaal waarop deze trend zich uit. Morfologische trends met kortere tijdschalen die van invloed zijn op de wadplaathoogte (bijvoorbeeld geuldynamiek en seizoensvariatie) kunnen het beeld van gemeten wadplaathoogtevariatie domineren.
- Het is opvallend dat de bodem van 2013 volledige dekking binnen de polygoon die het interessegebied aangeeft heeft, zeker omdat uit de punt dichtheid blijkt dat er niet overal dekking is en de gebieden zonder dekking groter zijn dan 10 m x 10 m.
- Op basis van de RWS datasets waarin de gemeten veranderingen wel significant zijn ten opzichte van de meetfout kan worden geconcludeerd:
 - De verticale verandering van de platen is voor de RWS dataset over de periode 2005-2012 slechts enkele centimeters;
 - De verticale verandering is vrijwel uniform over het gehele kombergingsgebied van zowel Pinkegat en Zoutkamperlaag;
 - Er zijn afwisselend gebieden met sedimentatie en erosie, maar een lokale depressie veroorzaakt door gaswinning is in de data niet te onderscheiden.
 Dit lijkt overeen te komen met de gemeten verandering in de LiDAR dataset voor 2010-2013 al kunnen hier nog geen conclusies aan verbonden worden voor wat betreft morfologische ontwikkelingen van de wad platen (zie eerste bullit).

6.2 Discussie

Deze conclusies leiden ons terug naar de vraag: zijn de LiDAR data geschikt voor het in kaart brengen van de morfologische veranderingen van de hoogte van de wadplaten als gevolg van het netto effect van zeespiegelstijging en bodemdaling?

Dit leidt ons tot een discussie over de definitie van de fout zoals aangegeven door Fugro (zie 3.1). Op basis van de huidige definitie van de fout verwachten we niet snel een significante verandering ten opzichte van de meetfout te meten. Dit is nog ongeacht voor welke trend in de natuurlijke dynamiek de gemeten veranderingen representatief is. Wij blijven vraagtekens zetten bij de definitie van de fout zoals aangegeven door Fugro (zie 3.1).

Deze is al eerder bediscussieerd in Wang et al. (2010) en Elias et al. (2013). Aangezien de nauwkeurigheid van de data bepaald wordt door weersomstandigheden, type oppervlak en de positie van de sensor zouden we een ruimtelijk variërende fout verwachten. Ook is de definitie van de fout ($3.8 + 3.0 = 6.8 \text{ cm}$) en de manier waarop deze doorwerkt in de berekening van de fout voor verschilkaarten ($3.8 * 2 + \sqrt{2} * 3.0 = 11.8 \text{ cm}$) onduidelijk. De verwachting is dat de stochastische fout uitmiddelt door het samen nemen van punten tijdens de vergridding naar 10 m x 10 m. In onze interpretatie kan de systematische fout bij verschilkaarten variëren tussen -3.8 cm en 3.8 cm als een soort van stochastisch getal. Belangrijke boodschap is dat deze systematische fout niet gebruikt kan worden als verklaring voor de streeppatronen in de verschilkaarten, aangezien in onze interpretatie een systematische fout identiek is over het gebied.

Daarnaast wordt de bruikbaarheid van LiDAR voor huidig doel beperkt doordat filteren van nat / droog nog niet mogelijk is. De verwachting is dat dit punten ondervangen kan worden (zie aanbevelingen).

Mocht de fout door andere definitie kleiner worden en de gemeten veranderingen significant groter (ook doordat de meetperiode langer wordt) dan mag de gemeten verandering aan de natuurlijke dynamiek worden gewijd. Vervolg vraag is dan hoeveel LiDAR data en met welke frequentie je nodig hebt om een uitspraak te kunnen doen over de morfologische trend in wadplaat hoogte als gevolg van relatieve zeespiegelstijging.

6.3 Aanbevelingen

- Nader onderzoek naar de definitie van de fout in de LiDAR data.
- Ineens vergriden naar 10m x 10m ipv eerst Fugro vergriden naar 1m x 1m en dan Deltares naar 10m x 10m
- Bij vervolg LiDAR metingen:
 - o proberen een hogere resolutie op natte wad te realiseren, en
 - o een beter onderscheid tussen nat / droog mogelijk maken (dan huidige afkapgrens van -0,50 m NAP) door inwinnen van extra informatie, zoals multispectrale metingen of luchtfoto's (zie ook memo in bijlage),
- Onderzoeken of een verbeterslag in de verwerking van de data mogelijk is. Hierbij kan gedacht worden aan:
 - o De manier van filteren outliers in LAS data (Deltares ontvangt een gefilterde set);
 - o Manier van combineren van de data: bijvoorbeeld bij overlappende banen maar ook bij overlap met dwarsstroken. "Momenteel wordt er bij dubbele waarden altijd gekozen om het laagste niveau te behouden" (Fugro).
 - o In de toekomst, naarmate meer LiDAR data beschikbaar komen, overgaan op een statistische analyse van de data. Het is de verwachting dat op basis van de karakteristieken van de data diverse trends gedetecteerd kunnen worden. De vraag blijft in hoeverre deze representatief zijn voor de natuurlijke dynamiek in morfologie.
 - o Een analyse van getijvoortplanting in het gebied om inzicht te krijgen in de relatie tussen de waterstanden in verschillende deelgebieden ten opzichte van de waterstand bij Nes. Het feit dat de waterstand bij Nes lager is dan -0.7 m NAP (moment waarop data mag worden ingewonnen), garandeert nog niet dat dit tijdens de metingen elders in het gebied ook geldt. Deze analyse dient twee doelen: 1. onderbouwen dan wel corrigeren van de gekozen drempelwaarde van -0.5 m NAP in de analyse, 2. een mogelijke optimalisatie van het vluchtschema (meten bij zo laag mogelijk waterstand overal in het gebied).

7 Referenties

- Cronin, K. en Wang, Z.B., 2012, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1204654-000.
- Elias, E.P.L., Wang, Z.B. en Cronin, K., 2013, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2012): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1206958-000.
- Fugro, 2013, Waddenzee LiDAR Survey – Final report, versie 3.
- Wang, Z.B., 2013, Herberekening behoefte aan zandsuppletie in verband met bodemdaling door gaswinning uit Waddenzee velden op basis van winningsplan Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen 2011 en Meet- en regelcyclus 2012.
- Wang, Z.B., Cronin, K. en van Ormondt, 2010, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1202285-000.

A Memo

Memo

Aan
Harry Piening (NAM)

Datum	Kenmerk	Aantal pagina's
7 april 2014	1209136-000-ZKS-0008	24
Van	Doorkiesnummer	E-mail
Tommer Vermaas	+088 335 714 4	tommer.vermaas@deltares.nl

Onderwerp
Analyse impact dataverwerking op nauwkeurigheid van de Fugro lidar data

Dit memo beschrijft het resultaat van een "Analyse van de impact van dataverwerking op de nauwkeurigheid van de Fugro lidar data op basis van de LiDAR metingen van najaar 2013. Het betreft stap 1 van de studie "Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2013) - Monitoring effect bodemdaling door gaswinning" zoals omschreven in de offerte d.d. 5 december 2013. In stap 2 worden de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten in Friesche Zeegat ten opzichte van voorgaande jaren (2010 – 2012) in kaart gebracht. De basis voor deze analyse vormen de "vergridde lidar 1 m" (de verwerkte LAS punten naar een 1m x 1m grid) zoals geadviseerd in stap 1.

Kopie aan
Jeroen Jansen (NAM), Loana Arentz, Zheng Wang

Analyse impact dataverwerking op nauwkeurigheid van de Fugro lidar data

1 Introductie

Voor het verkrijgen van inzicht in bodemdaling worden sinds 2010 in het waddengebied in het voor- en najaar LiDAR metingen uitgevoerd. Huidige studie betreft een analyse van LiDAR data van het Friesche Zeegat opgenomen door Fugro in het najaar van 2013. Het Friesche Zeegat bestaat uit de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag en is interessegebied voor deze studie. De analyse is gericht op het in kaart brengen van de ontwikkelingen van de wadplaten in het kader van de monitoring van de effecten van bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee.

De resultaten van de laatste studie (Elias et al., 2013) gaven aanleiding om, voorafgaand aan de morfologische analyse, nader te kijken naar de nauwkeurigheid van de LiDAR opnames op de wadplaten na vergridding. In deze studie zijn de LiDAR data in het Friesche Zeegat van najaar 2012 vergeleken zijn met de 4 voorgaande opnames (2010-2012) en werd o.a. geconstateerd dat het (nog) niet mogelijk is om de morfologische verandering vast te stellen op basis van de Fugro LiDAR metingen. Dit is omdat de verschillen tussen de meetresultaten van de 4 geanalyseerde LiDAR opnames (2010 – 2012) klein zijn ten opzichte van de bijbehorende fouten zoals aangegeven door Fugro.

Bovendien is uit voorgaande studies (Wang et al. 2010, Cronin en Wang 2012, Elias et al. 2013) gebleken dat:

- de ASCII 1m data veel *outliers* vertoont.
- de data nauwkeurigheid lijkt te variëren over de vluchtpaden. Bij verschilplaatjes tussen opeenvolgende jaren resulteert dit in vlekkerige banen van sedimentatie en erosie.

Hierdoor is het vermoeden ontstaan dat de ASCII 1m data op de wadplaten niet de theoretische nauwkeurigheid haalt van 6.8 cm haalt. De ASCII 1m data vormen de basis voor de analyses van de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten.

Om deze redenen is voorgesteld om voorafgaand aan de reguliere morfologische analyse van de wadplaten, voor de nieuwe data voor het najaar van 2013 een extra analyse te doen naar de nauwkeurigheid van de vergriddingsmethodes.

Hiervoor zijn de volgende stappen uitgevoerd:

- 1) Kwantificeren van de nauwkeurigheid van de “las punten” door de bias met de “ground truth” en de spreiding van de punten te bepalen;
- 2) Kwantificeren van de nauwkeurigheid van interpolatiemethode (geïnterpoleerde 1m x 1m grids) door de bias met de “las punten” en de spreiding van de punten te bepalen;
- 3) Voor 1 interpolatiemethode zullen de “las punten” ook worden geïnterpoleerd met verschillende gridgroottes, waarvoor ook statistieken worden berekend;
- 4) Het in kaart brengen van andere bronnen van fouten die voor deze data van belang zijn.

2 Data en aanpak

2.1 Beschrijving van de data

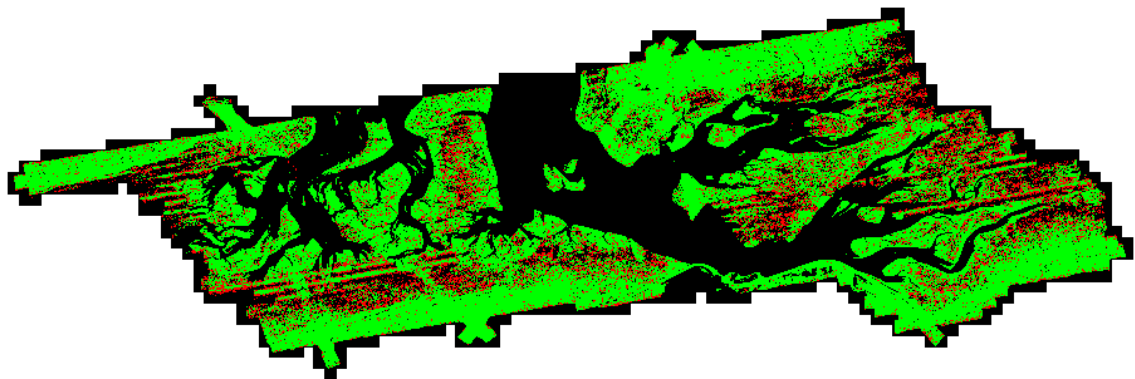
De data analyse richt zich op de LiDAR opname van najaar 2013 (18, 19 en 20 oktober).

Door Fugro zijn de data in 3 formats aangeleverd:

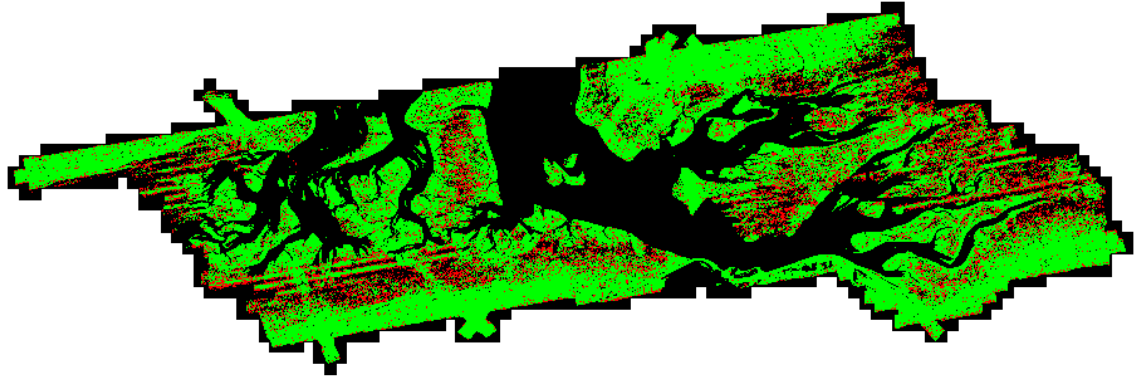
- Ruwe LAS punten ook wel XYZiRGB bestanden (hierna te noemen "LAS punten") aangeleverd als ".las" bestanden, ingedeeld in gebieden van 1000 x 1250 m, zogenaamde 'vakbladen'. De LAS punten bevatten de volgende informatie: x,y,z,scan hoek, intensiteit, aantal reflecties, reflectie nummer, gps tijdstip en classificatie. Deze data zijn al op zekere hoogte verwerkt door Fugro.
- ASCII 1m grids, geïnterpoleerd op een 1m x 1m grid uit de ".las" bestanden en geleverd als ".asc" bestanden ingedeeld in dezelfde vakbladen als de LAS punten (hierna te noemen "ASCII 1m"). De ASCII bestanden bevatten de x-, y- en z-waarden, x en y geven horizontale positie aan in RijksDriehoek coördinaten en z is de gemeten hoogte t.o.v. NAP.
- XYZ-waardes van 'ground control points' (GCP), gemeten op 13 locaties, waarvan 4 op het wad en 9 op een hard oppervlak aan de kust (Figuur 2.3). Het aantal 'ground control points' verschilt per locatie.

Door Fugro zijn alle punten ingedeeld in 'non-ground' en 'ground'. De analyse beperkt zich tot de punten die zijn geclassificeerd als 'ground' (zijnde punten met classificatie=2). Ook de natte gebieden zijn regelmatig geclassificeerd als 'ground'. Zie ook 3.4.

De dichtheid van de LAS punten is door Fugro berekend en weergegeven op een kaart van het gebied (

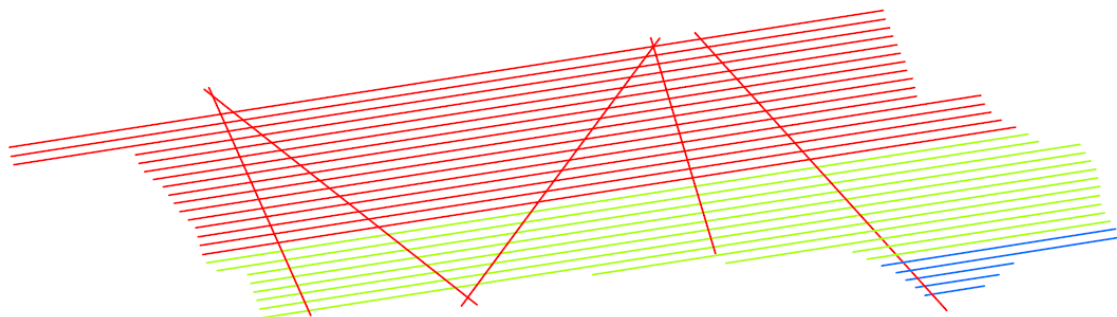


Figuur 2.1). Wij hebben aangenomen dat het hier enkel de 'ground' geclassificeerde punten betreft. De dichtheid ligt, met uitzondering van de natte gebieden, boven de 3.5 punt per m².



Figuur 2.1 Kaart met datadichtheid, groen: minimaal 4 punten per m², rood: minder dan 4 punten per m², zwart: geen punten of lager dan -0,70m NAP. Bron: Fugro (2013).

De vlieglijnen van de LiDAR-opnames zijn per opnamedag 18, 19 en 20 oktober 2013 aangegeven in Figuur 2.2.



Legend

ASM11085_NAM Waddenzee

Date

- 18-10-2013
- 19-10-2013
- 20-10-2013

Figuur 2.2 Vlieglijnen en data waarop LiDAR opnames zijn uitgevoerd, bron: Fugro (2013).

De ground control points (hierna te noemen GCPs) zijn voor de locaties met hard oppervlak in dezelfde periode gemeten als de LAS punten. GCPs zijn gemeten op het wad en op het vaste land: 4 GCPs op het wad en 9 GCPs op het vaste land (zie Figuur 2.3). Voor de ground control points op het wad geeft Fugro de dagen aan waarop ze zijn gemeten:

- 2M007: 24-10-2013
- 002H0032: 25-10-2013
- 002D0049: 29-10-2013
- 002G0124: 31-10-2013

Voor de punten op het vaste land wordt enkel aangegeven dat deze in dezelfde periode zijn gemeten (Fugro 2013). Wij hebben dezelfde periode geïnterpreteerd als de periode waarin de wad GCPs zijn gemeten.



Figuur 2.3 Overzicht van ground control locaties, bron: Fugro (2013), blauw markers zijn plots op het wad, groene markers verwijzen naar de ground control plots (GCP met nummer).

2.2 Bepalen nauwkeurigheid LAS punten t.o.v. “gnd truth” (stap 1)

Om de nauwkeurigheid van de LAS punten t.o.v. de “ground truth” te bepalen zijn de LAS punten in directe nabijheid van de 13 GCP gebruikt. Om punten met punten te kunnen vergelijken zijn voor alle interpolatiemethodes de LAS punten geïnterpoleerd naar twee gridgroottes: een gridgrootte van 1 m, met daarbij een 1m zoekradius rondom de gridcel waarin het GCP punt valt. En een gridgrootte van 0.3 m met 0.6 m zoekradius. De zoekradius is de afstand waarbinnen de LAS punten worden meegenomen in de berekening. Hierbij zijn de volgende interpolatiemethodes gebruikt:

- Averaging (alle punten binnen de zoekradius wegen even zwaar mee).
- Inverse distance weight (IDW, de weging van punten is afhankelijk van de afstand, hoe dichterbij hoe zwaarder het gewicht);
- Kriging (de weging van de punten wordt bepaald o.b.v. de toename van de variantie van de punten met de afstand tot de gridcel (een semivariogram));

Voor de kriging interpolatie naar 0.3 m grid is uiteindelijk een zoekradius van 1 m gebruikt (i.p.v. 0.6 m), omdat een zoekradius van 0.6 m resulteerde in te weinig punten per gridcel voor deze methode.

Voor alle gemeten ‘ground control’ punten is de afwijking met de 2x3 geïnterpoleerde grids (2 gridgroottes en 3 methodes) bepaald. Per GCP is de waarde vergeleken met de geïnterpoleerde waarde van de gridcel waarin de GCP ligt. Hierbij zijn de volgende parameters berekend:

- Gemiddelde afwijking, ook wel bias genoemd (het gemiddelde van alle afwijkingen, de positieve en negatieve afwijkingen middelen elkaar uit).

- Standaarddeviatie, ook wel de stochastische fout genoemd (statistische maat voor de spreiding van de data: de gemiddelde afwijking t.o.v. het gemiddelde).
- Root-mean-squared-error, hierna te noemen rmse (de gemiddelde absolute afwijking tussen de GCP's en de gridwaardes, de positieve en negatieve afwijkingen middelen elkaar niet uit). Rmse is een maat voor de nauwkeurigheid.

Bij *normaal verdeelde* data liggen de afwijkingen symmetrisch rondom de gemiddelde afwijking. In dat geval geeft de standaarddeviatie de 68% nauwkeurigheidsmarge aan (68% van de afwijkingen is dan kleiner dan de standaarddeviatie). Om de verdeling van de afwijkingen te zien zijn alle afwijkingen in een histogram weergegeven per GCP locatie.

De door Fugro aangegeven nauwkeurigheid van 6.8 cm, is gebaseerd op de specificaties van de gebruikte meetapparatuur. Deze nauwkeurigheid wordt behaald als de RMSE lager ligt dan de aangegeven 6.8 cm.

Alle interpolaties van punten zijn uitgevoerd met door TNO/Deltares ontwikkelde software die gemaakt is om zeer grote puntbestanden te kunnen interpoleren (GridSampler 3.2). Berekening van de statistische parameters is uitgevoerd met het rekenprogramma Matlab.

2.3 Bepalen nauwkeurigheid interpolatiemethode naar 1m x 1m grid (stap 2)

Voor de volledige dataset (hele gebied) zijn met de drie interpolatiemethodes alle geleverde LAS punten geïnterpoleerd naar een 1m x 1m grid met een zoekradius van 1 m. Hierbij volgen we precies dezelfde stappen als in 2.2, met als enige verschil dat de nieuwe geïnterpoleerde waarden deze keer vergeleken worden met de las punten i.p.v. met de GCPs.

Voor alle gemeten LAS punten is de afwijking met de grids bepaald. Voor al deze grids en de door Fugro geleverde grids zijn dezelfde statistische parameters berekend als in 2.2, met uitzondering van de standaarddeviatie (vanwege de lange rekentijd).

2.4 Interpolatie met verschillende gridgroottes (stap 3)

Op basis van de resultaten van 2.2 en 2.3 (zie hoofdstuk 3) blijkt de IDW interpolatiemethode de meest nauwkeurige. Om deze reden is IDW gekozen om de impact van gridgrootte op nauwkeurigheid te kwantificeren.

Met de inverse distance weight methode zijn voor de volledige dataset (hele gebied) alle LAS punten ook geïnterpoleerd naar een 2 m grid (zoekradius 2.5 m) en een 0.3 m grid (zoekradius 0.6 m). Voor alle gemeten LAS punten is de afwijking met de grids bepaald en zijn dezelfde statistische parameters berekend als in 2.2, met uitzondering van de standaarddeviatie (vanwege de lange rekentijd).

2.5 In kaart brengen van andere bronnen van fouten (stap 4)

Voor stap 4 zijn voor een klein deelgebied op het wad de LAS punten verkend. Hierbij is gekeken naar de verschillende parameters, waaronder de classificatie in 'ground' en 'non-ground', intensiteit en scan hoek van de punten. De vluchtlijn en RGB waardes ontbraken bij de geleverde punten. De RGB kan mogelijk bijdragen aan het herkennen van non-ground punten. Met de vluchtlijn kunnen waardes van twee overlappende vluchtlijnen worden vergeleken, mogelijk kan het ook een rol spelen bij het herkennen van non-ground punten. Ook is er in de vakliteratuur gezocht naar analyse van LAS punten in vergelijkbare gebieden.

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden per stap zoals beschreven in voorgaande hoofdstukken de resultaten gepresenteerd. Hierbij geeft de RMSE steeds de gemiddelde fout aan in meters. Ook de eenheid van de mean en standaarddeviatie (std) is in meters weergegeven.

3.1 Bepalen nauwkeurigheid t.o.v. “ground truth” (stap 1)

Een samenvatting van de resultaten na vergelijking met de ground control points (GCPs) is weergegeven in Tabel 3.1. Tabel 3.1 geeft, per interpolatiemethode en per gridgrootte, de gemiddelde waarden van de statistische parameters (zie 2.2) voor de 9 GCPs op het vaste land en de 4 GCPs op het wad. Een uitgebreid overzicht van de resultaten is weergegeven in de tabellen in Appendix I.

De verdeling van de afwijkingen met de GCPs is voor veel GCP locaties niet *normaal verdeeld* (zie Appendix II). Wanneer de afwijking niet normaal verdeeld is geeft de standaarddeviatie dus niet de 68% nauwkeurigheid aan, maar dient gezien te worden als een maat voor de spreiding van de data.

Voor de 9 ground control plots op het vaste land varieert de nauwkeurigheid voor de 1 m grids voor de 3 interpolatiemethoden tussen de 2.1 en 3.4 cm (rmse eerste kolom). Deze waarden liggen slechts iets lager voor de 0.3 m grids en variëren tussen de 1.8 en 3.1 cm. Van de interpolatiemethoden levert “averaging” de grootste afname op, namelijk 1.8 cm t.o.v. 3.4 cm, rmse tweede kolom. Tussen de negen locaties met hard oppervlak zijn verschillen te zien, maar voor allemaal ligt de nauwkeurigheid onder de 6.8 cm (zie rmse waarden in tabellen in Appendix I).

Voor de 9 GCPs op het vaste land ligt de gemiddelde afwijking tussen de -1.2 en +0.6 cm voor de 1 m grids (mean eerste kolom). Deze afwijking is voor Averaging en IDW lager voor de 0.3 m grids, maar voor Kriging hoger (mean tweede kolom). Er is dus een kleine systematische afwijking die voor de IDW interpolatie het kleinste is en vergelijkbaar met de 0.2 cm van Fugro (Tabel 3.2). De standaarddeviatie ligt tussen de 1.1 en 1.7 cm voor de 1 m grids (std eerste kolom) en wordt voor alle interpolatiemethodes lager bij interpolatie naar 0.3 m grids (std tweede kolom). De stochastische fout is dus kleiner voor de 0.3 m grids.

De nauwkeurigheid van de IDW grids is vergelijkbaar met de door Fugro gerapporteerde werkelijke nauwkeurigheid. Ook de gemiddelde afwijking en de standaarddeviatie zijn vergelijkbaar. De Averaging en Kriging interpolatiemethoden leveren een lagere nauwkeurigheid op van respectievelijk 3.4 en 3.1 cm.

Voor de 4 locaties op het wad ligt de nauwkeurigheid tussen de 5.1 en 5.3 cm voor de 1 m grids (rmse derde kolom). Dit is een factor twee hoger dan voor de GCPs op het vaste land. De gemiddelde afwijking is voor de 1 m grids lager dan die op het vaste land, maar is voor de 0.3 m grids hoger. De nauwkeurigheid voor de 0.3 m grids is vrijwel gelijk aan de nauwkeurigheid van de 1 m grids, 5.2 cm voor zowel averaging als IDW interpolatie (rmse vierde kolom). Ook bij de wad GCPs is de nauwkeurigheid vergelijkbaar en zelfs iets hoger dan de door Fugro gerapporteerde nauwkeurigheid voor deze locaties (4.5 cm, Tabel 3.2), en ligt onder de theoretische nauwkeurigheid van 6.8 cm.

Tabel 3.1 Nauwkeurigheid t.o.v. ground control points. Kriging 0.3 m ontbreken de waardes door de lagere zoekradius. De locaties van de ground control plots zijn te zien in Figuur 2.3.

	Gemiddelde van GCP's 1t/m9, 1 m grid	Gemiddelde van GCP's 1t/m9, 0.3 m grid	Gemiddelde van 4 GCP's wad, 1 m grid	Gemiddelde van 4 GCP's wad, 0.3 m grid
Averaging				
mean [m]	-0.012	0.001	-0.004	-0.014
std [m]	0.017	0.006	0.017	0.018
rmse [m]	0.034	0.018	0.053	0.052
IDW				
mean [m]	0.000	0.001	-0.006	-0.014
std [m]	0.011	0.007	0.017	0.018
rmse [m]	0.021	0.019	0.053	0.052
Kriging				
mean [m]	0.006	0.012	-0.009	nvt
std [m]	0.016	0.012	0.017	nvt
rmse [m]	0.031	0.031	0.051	nvt

Tabel 3.2 Door Fugro (2013) gerapporteerde werkelijke nauwkeurigheid

	Gemiddelde van GCP's 1t/m9	Gemiddelde van 4 GCP's wad
mean [m]	0.002	-0.011
std [m]	0.006	0.016
rmse [m]	0.017	0.045

3.2 Bepalen nauwkeurigheid interpolatiemethode naar 1m x 1m grid (stap 2)

De statistieken voor de analyse van het volledige onderzoeksgebied zijn gegeven in Tabel 3.3. Door het grote aantal punten middelen stochastische fouten zich uit, de gemiddelde afwijking (mean) van vrijwel 0 geeft aan de er door de interpolatie geen systematische afwijking ontstaat.

De nauwkeurigheid is voor de 1 m grids van Fugro en IDW resp. 2.1 en 2.3 cm, maar voor kriging en averaging grids resp. 5.4 en 4.8 cm (rmse). De vrij grote maximale afwijkingen zijn de waardes van de hoogste en laagste afwijking van alle punten.

Tabel 3.3 Nauwkeurigheid voor verschillende interpolatiemethodes van alle geleverde punten

	maximale negatieve afwijking [m]	maximale positieve afwijking [m]	Aantal punten	Mean [m]	RMSE [m]
Fugro 1 m	-5.95	4.94	1.03E+09	0.0000	0.021
Kriging 1 m	-6.24	16.14	1.02E+09	0.0001	0.054
Average 1 m	-3.26	13.43	1.03E+09	0.0003	0.048
IDW 1 m	-4.55	6.22	1.03E+09	0.0000	0.023

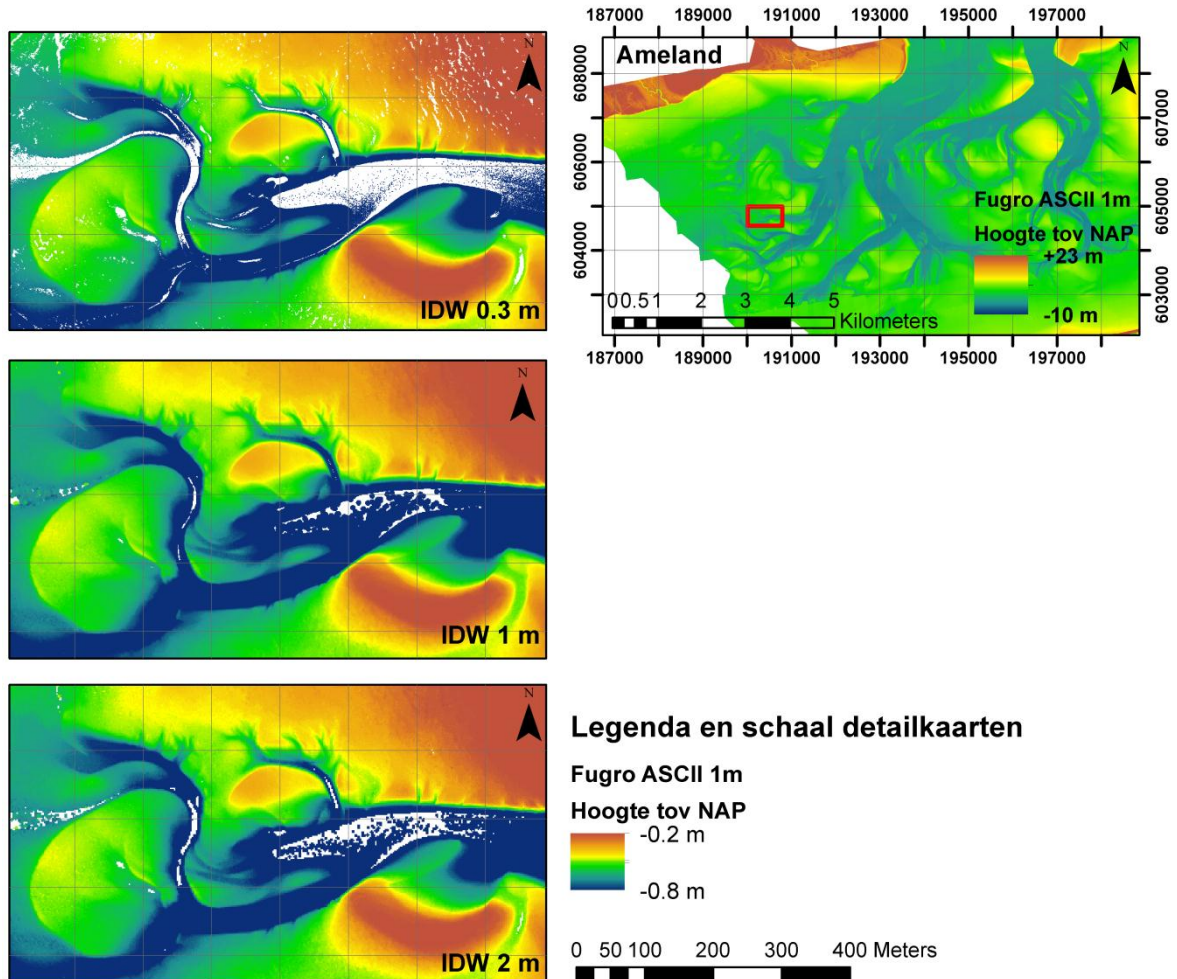
3.3 Interpolatie met verschillende gridgroottes (stap 3)

In Tabel 3.4 staan de resultaten van de interpolatie met verschillende gridgroottes met de IDW interpolatiemethode weergegeven. De IDW 1 m waardes zoals gepresenteerd in Tabel 3.3 zijn ter vergelijking opgenomen in Tabel 3.4. Voor alle drie de gridgroottes is de gemiddelde afwijking (mean) vrijwel 0 en ontstaat er dus geen systematische fout bij de interpolatie. De IDW 30 cm grids hebben een grotere nauwkeurigheid van 0.6 cm (rmse) en de 2 m grids een kleinere van 3.8 cm (rmse). Ook de nauwkeurigheid van de 2 m grids ligt dus nog ruim onder de theoretische nauwkeurigheid van 6.8 cm.

Tabel 3.4 Nauwkeurigheid voor verschillende interpolatiemethodes van alle geleverde punten

	maximale negatieve afwijking [m]	maximale positieve afwijking [m]	Aantal punten	Mean [m]	RMSE [m]
IDW 30 cm	-3.50	5.86	1.03E+09	0.0000	0.006
IDW 1 m	-4.55	6.22	1.03E+09	0.0000	0.023
IDW 2 m	-6.00	6.09	1.03E+09	0.0000	0.038

In Figuur 3.1 zijn de grids met deze drie gridgroottes te zien voor een deelgebied. De 30 cm grids geven een meer gedetailleerd beeld, maar hebben meer lege pixels in gebieden met lagere datadichtheid door de kleinere zoekradius die gebruikt is.



Figuur 3.1 Resultaten van verschillende gridgroottes op basis van IDW interpolatie. De locatie van de detailkaarten is aangegeven met de rode rechthoek, coördinaten in Rijksdriehoek.

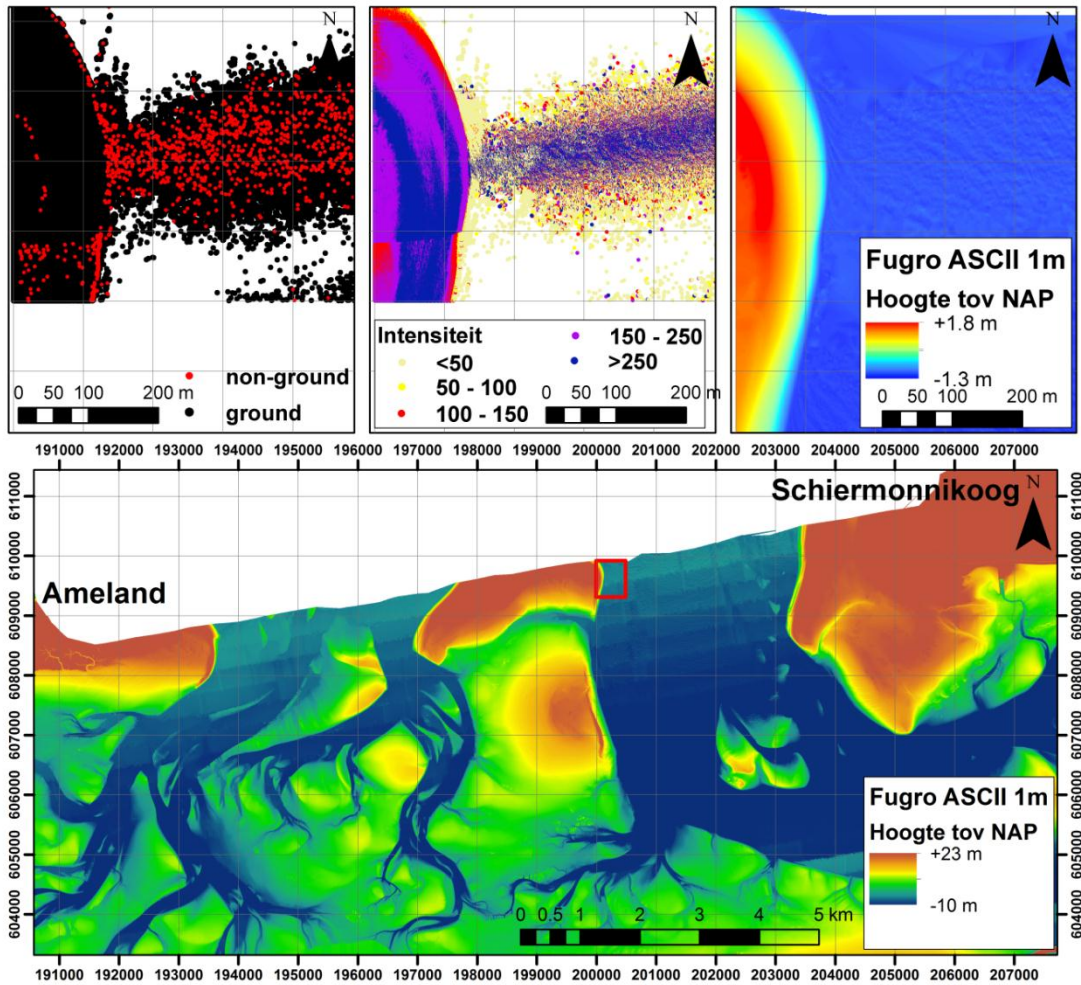
3.4 In kaart brengen van andere bronnen van fouten (stap 4)

Resultaten van een visuele verkenning van de LAS punten zijn weergegeven in Figuur 3.2. Figuur 3.2 laat aan de linkerkant een kwelder zien en aan de rechterkant de rand van een geul. In de detailkaart met classificatie van de LAS punten (links boven) is te zien dat slechts weinig punten zijn geïdentificeerd als non-ground (rode punten). Ook punten die in de geul liggen worden geïdentificeerd als "ground". Het is onduidelijk hoe de classificatie van ground en non-ground punten geschiedt (Fugro 2013).

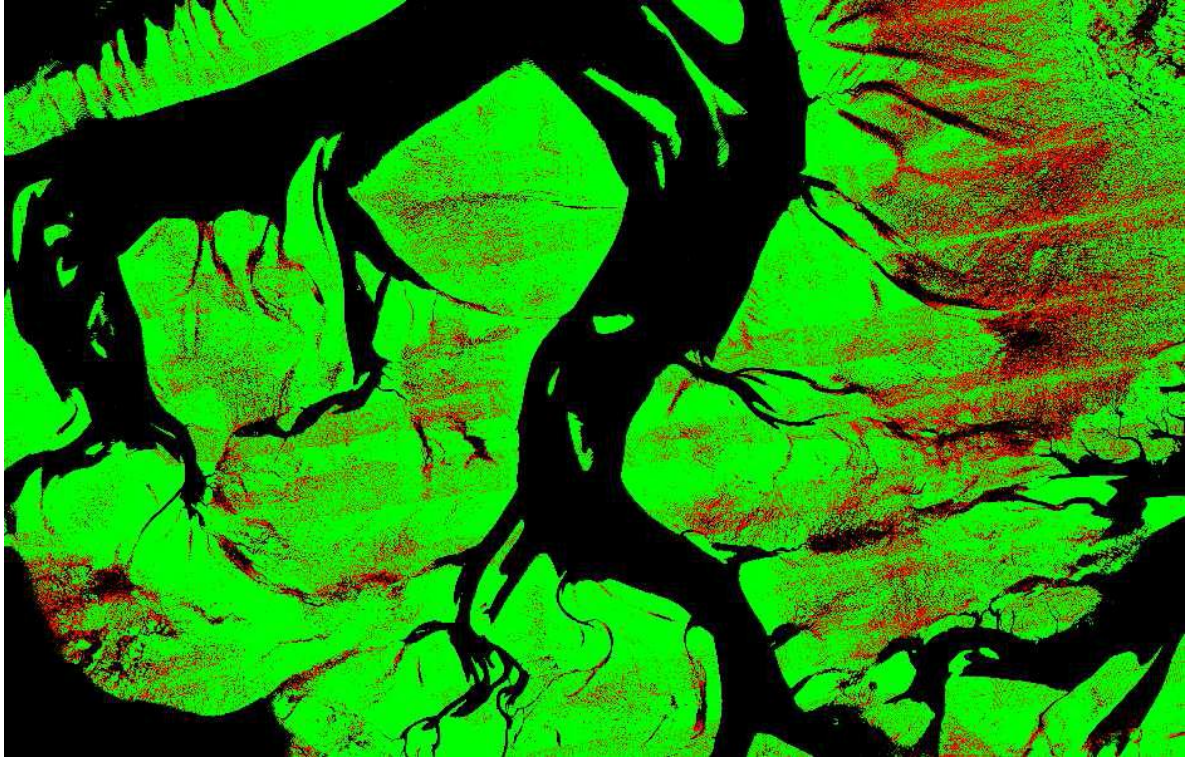
In de intensiteit van de punten (midden boven) is te zien dat de punten op het land een relatief hogere intensiteit hebben dan in de geul (eenheid intensiteit onbekend). De punten met lagere intensiteit liggen vrijwel allemaal in de geul. In de data dichtheidskaart van Fugro (2013) is te zien dat de punten op nat oppervlak een lagere dichtheid hebben (Figuur 3.3).

De intensiteit en de dichtheid lijken dus geschikt om de natte punten beter te onderscheiden van de droge punten. Zonder de natte punten zullen de geulen niet in het uiteindelijke grid komen. Filtering van natte gebieden uit LAS punten op basis van dit soort parameters is nog in

experimentele fase, maar al wel met enige mate van succes toegepast op vergelijkbare gebieden (Duitse Waddengebied, Brzank, 2006). Het filteren van natte punten is aanzienlijk makkelijker te doen wanneer extra informatie wordt ingewonnen, zoals multispectrale metingen of luchtfoto's.



Figuur 3.2 Testgebied gebruikt voor verkenning LAS punten. De locatie van de detailkaarten is aangegeven met de rode rechthoek, coördinaten in Rijksdriehoek.



Figuur 3.3 Detail van data dichtheidskaart gemaakt door Fugro (2013), groen: minimaal 4 punten per m^2 , rood: minder dan 4 punten per m^2 , zwart: geen punten of lager dan -0,70m NAP.

4 Conclusies

De berekende nauwkeurigheid na vergelijking van de LAS punten met de ground control points (stap 1) ligt lager dan de theoretische nauwkeurigheid van 6.8 cm. Voor de GCP's op het vaste land wordt een nauwkeurigheid berekend van ca. 2 cm (RMSE). Dit is vergelijkbaar met de door Fugro (2013) gerapporteerde nauwkeurigheid van 1.7 cm. Voor de 4 ground control plots op het wad wordt een lagere nauwkeurigheid van ca. 5 cm (RMSE) berekend. Fugro geeft hier een RMSE van 4.5 cm. De berekende nauwkeurigheid verschilt per GCP locatie, maar elke locatie heeft een RMSE onder de 6.8 cm.

Interpolatie naar een 0.3 m grid levert bij een vergelijking met de ground control punten geen significante verbetering op in termen van nauwkeurigheid, en voor sommige locaties zelfs een verslechtering. Deze verslechtering is waarschijnlijk te verklaren door de datadichtheid, die op sommige plaatsen te laag is om naar de 0.3 m grids te interpoleren.

De berekende nauwkeurigheid na interpolatie naar 1 m x 1 m grids is voor de verschillende methodes (stap 2) even groot als voor de door Fugro geleverde ASCII 1 m grids. De interpolatie levert geen systematische fout op tussen de 2.1 en 5.4 cm.

De afwijking die ontstaat door interpolatie zelf (stap 3) wordt wel beter (RMSE=0.006 m voor alle punten t.o.v. 0.023 m bij een 1 m grid). Interpolatie naar een 2 m grid resulteert in een lagere nauwkeurigheid (RMSE=3.8 cm), die echter ook nog lager ligt dan 6.8 cm.

We moeten concluderen dat in de vergridding van de data (interpolatiemethode en gridgrootte) weinig tot geen verbetering mogelijk lijkt ten opzichte van de door Fugro aangeleverde ASCII 1m data. Het vermoeden blijft echter bestaan dat de grootste verbeteringslag in de filtering van de LAS punten ligt (nog vóór de vergridding). De LAS punten op het wad zijn vrijwel allemaal als 'ground' geclassificeerd, zonder dat water eruit is gefilterd. Filtering van natte gebieden uit LAS punten is zonder aanvullende informatie nog in experimentele fase, maar al wel met enige mate van succes toegepast op vergelijkbare gebieden (Duitse Waddengebied, Brzank, 2006). Het inwinnen van extra informatie, zoals multispectrale metingen of luchtfoto's, kan een beter onderscheid tussen nat en droog aanzienlijk makkelijker maken.

Met betrekking tot de vragen die de aanleiding gaven voor dit onderzoek kunnen wij concluderen dat:

- *De ASCII 1 m grids halen niet de genoemde nauwkeurigheid van 6.8 cm en vertonen veel outliers:*

De theoretische nauwkeurigheid van 6.8 cm geeft aan dat de *gemiddelde afwijking* lager ligt dan deze waarde. Op basis van een vergelijking van de LAS punten met de gemeten ground control points blijkt dat dezelfde nauwkeurigheid wordt behaald. Dit geldt voor zowel de locaties op het vaste land als op wad. Aangezien de rmse (maat voor nauwkeurigheid) een *gemiddelde afwijking* is (en dus vergeleken is met de 6.8 cm), klopt het dat er ook grotere afwijkingen bij zitten. Fugro geeft aan dat de theoretische nauwkeurigheid van 6.8 cm aangeeft dat 68% van de fouten kleiner moet zijn dan deze waarde, en 95% van de fouten kleiner van 9.8 cm. De genoemde *outliers* vallen dus binnen deze definitie van nauwkeurigheid.



- *De data nauwkeurigheid lijkt te variëren over de vluchtpaden. Bij verschilplaatjes tussen twee jaren zijn vlekkerige banen te zien:*

Door verschillen in bijvoorbeeld vlieghoogte en de kanteling van het vliegtuig zullen er ook verschillen zijn in de LAS punten die worden opgenomen. Daarnaast is de richting waar vanuit het overlappende deel wordt opgenomen anders. Deze verschillen verklaren de vlekkerige banen en vallen binnen de nauwkeurigheid van de data.

Wanneer we het verschil tussen twee jaren beschouwen wordt de nauwkeurigheid van het verschil lager: dit komt doordat beide opnamen een fout hebben. Van het verschil wordt de systematische fout twee maal groter en de stochastische fout $\sqrt{2}$ groter. Van de theoretische nauwkeurigheid is de systematische fout 3.8 cm en de stochastische fout 3.0 cm (Fugro 2013). Hiermee komt de nauwkeurigheid voor verschilkaarten op $3.8 * 2 + \sqrt{2} * 3.0 = 11.8 \text{ cm}$ voor 68% van de afwijkingen. Voor 95% van de afwijkingen wordt de stochastische fout twee maal zo groot en is de nauwkeurigheid $3.8 * 2 + \sqrt{2} * (2 * 3.0) = 16.1 \text{ cm}$ (Fugro 2013). De verschillen die tussen de banen geobserveerd worden (vlekkerige banen) in de verschilkaarten liggen grotendeels binnen deze grootte van 16.1 cm.

Literatuur

Cronin, K. en Wang, Z.B., 2012, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1204654-000.

Elias, E.P.L., Wang, Z.B. en Cronin, K., 2013, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2012): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1206958-000.

Fugro, 2013, Waddenzee LiDAR Survey – Final report, versie 3.

Brzank, A. en Heipke, C., 2006. Classification of lidar data into water and land points in coastal areas. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (2006): 197-202.

Wang, Z.B., Cronin, K. en van Ormondt, 2010, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1202285-000.

Kopie aan

Jeroen Jansen (NAM), Loana Arentz, Zheng Wang

Appendix I Statistische parameters per GCP locatie

Tabel 4.1 *Nauwkeurigheid voor verschillende interpolatiemethodes naar een 1 m grid voor de 9 plots met hard oppervlak*

	GCP 1	GCP 2	GCP 3	GCP 4	GCP 5	GCP 6	GCP 7	GCP 8	GCP 9	Gemiddelde
Averaging										
mean	-0.026	-0.004	-0.019	0.029	-0.058	-0.013	-0.033	-0.029	0.048	-0.012
std	0.008	0.014	0.012	0.026	0.042	0.006	0.010	0.014	0.021	0.017
rmse	0.027	0.015	0.022	0.039	0.071	0.015	0.034	0.032	0.053	0.034
IDW										
mean	-0.021	0.003	-0.006	0.015	0.002	-0.002	-0.019	-0.024	0.049	0.000
std	0.005	0.008	0.008	0.019	0.019	0.007	0.010	0.007	0.012	0.011
rmse	0.022	0.008	0.010	0.024	0.018	0.007	0.022	0.025	0.050	0.021
Kriging										
mean	-0.023	0.000	-0.003	0.007	0.044	-0.007	-0.030	-0.015	0.079	0.006
std	0.011	0.014	0.011	0.035	0.017	0.006	0.014	0.016	0.016	0.016
rmse	0.025	0.014	0.012	0.035	0.047	0.010	0.033	0.022	0.081	0.031

Tabel 4.2 *Nauwkeurigheid voor verschillende interpolatiemethodes naar een 0.3 m grid voor de 9 plots met hard oppervlak*

	GCP 1	GCP 2	GCP 3	GCP 4	GCP 5	GCP 6	GCP 7	GCP 8	GCP 9	Gemiddelde
Averaging										
mean	-0.022	0.003	-0.006	0.013	0.017	-0.002	-0.018	-0.023	0.045	0.001
std	0.004	0.004	0.005	0.013	0.006	0.005	0.006	0.006	0.006	0.006
rmse	0.022	0.005	0.007	0.018	0.018	0.005	0.019	0.024	0.046	0.018
IDW										
mean	-0.022	0.004	-0.005	0.010	0.017	-0.001	-0.019	-0.021	0.046	0.001
std	0.005	0.007	0.007	0.012	0.008	0.005	0.009	0.005	0.006	0.007
rmse	0.022	0.008	0.009	0.016	0.019	0.005	0.021	0.022	0.047	0.019
Kriging										
mean	-0.023	0.002	-0.001	0.006	0.060	-0.001	-0.029	<i>nodata</i>	0.079	0.012
std	0.006	0.013	0.011	0.026	0.012	0.000	0.014	<i>nodata</i>	0.011	0.012
rmse	0.024	0.013	0.011	0.026	0.061	0.001	0.032	<i>nodata</i>	0.079	0.031

Tabel 4.3 *Nauwkeurigheid voor verschillende interpolatiemethodes naar een 1 m grid voor de 4 plots op het wad*

	GCP 2M007	GCP 002G0124	GCP 002H0032	GCP 002D0049	Gemiddelde
Averaging					
mean	-0.018	0.044	0.025	-0.081	-0.004
std	0.009	0.009	0.015	0.027	0.017
rmse	0.020	0.045	0.029	0.085	0.053
IDW					
mean	-0.022	0.043	0.024	-0.084	-0.006
std	0.016	0.010	0.011	0.029	0.017
rmse	0.027	0.044	0.026	0.088	0.053
Kriging					
mean	-0.024	0.044	0.014	-0.085	-0.009
std	0.000	0.011	0.013	0.026	0.017
rmse	0.024	0.045	0.019	0.088	0.051

Tabel 4.4 *Nauwkeurigheid voor verschillende interpolatiemethodes naar een 0.3 m grid voor de 4 plots op het wad*

	GCP 2M007	GCP 002G0124	GCP 002H0032	GCP 002D0049	Gemiddelde
Averaging					
mean	-0.025	0.044	0.025	-0.099	-0.014
std	0.018	0.009	0.010	0.036	0.018
rmse	0.030	0.045	0.027	0.104	0.052
IDW					
mean	-0.029	0.044	0.025	-0.097	-0.014
std	0.019	0.009	0.011	0.034	0.018
rmse	0.034	0.045	0.027	0.101	0.052
Kriging					
mean	<i>nodata</i>	<i>nodata</i>	0.013	<i>nodata</i>	nvt
std	<i>nodata</i>	<i>nodata</i>	0.010	<i>nodata</i>	nvt
rmse	<i>nodata</i>	<i>nodata</i>	0.017	<i>nodata</i>	nvt

Appendix II Histogrammen

De histogrammen geven per ground truth locatie de verdeling van de afwijkingen ten opzichten van de GCP weer. De rode lijn geeft de afwijking 0 aan. Waarden zijn voor de IDW vergridding naar een 1 m grid.

