

**Analyse Lidar data voor het
Friesche Zeegat (2010 - 2012)**

Monitoring effecten bodemdaling door gaswinning



Analyse Lidar data voor het Friesche Zeegat (2010 - 2012)

Monitoring effecten bodemdaling door gaswinning

Edwin Elias
Zheng Bing Wang
Katherine Cronin

1206958-000


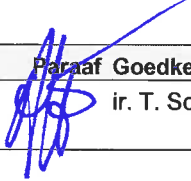



Titel
Analyse Lidar data voor het Friesche Zeegat (2010 - 2012)

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Nederlandse Aardolie Maats chappij B.V.	1206958-000	1206958-000-ZKS-0004	39

Trefwoorden
Lidar data, Waddenzee, Bodemdaling, Intergetijdegebieden

Samenvatting

In het kader van de monitoring van de effecten van bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee worden de ontwikkelingen van de wadplaten gemonitord. In 2010, 2011 (2x) en 2012 zijn hiervoor door Fugro Lidar opnames gemaakt. De 2010-2011 data is gerapporteerd in Cronin en Wang (2012). Dit rapport vult voorgaande analyses aan met de opnames van 2012. Vrijwel de gehele hypsometrische curve van de 2012 data (najaarsmeting) ligt binnen de omhullende van de eerdere metingen. Het verschil tussen de metingen ligt binnen de foutenmarges (voor bodemhoogte van één meting 3,5 cm, voor verschil tussen twee metingen 5 cm). De verschillen tussen de meetresultaten van de geanalyseerde lidar-opnames zijn klein t.o.v. de bijbehorende fouten. Daardoor is het (nog) niet te zeggen welk deel van de verschillen door morfologische veranderingen is veroorzaakt.

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	ma. 2013	dr. E.P.L. Elias		dr. A.J.F. van der Spek		ir. T. Schilperoort	
		prof. dr. ir. Z.B. Wang					
		K. Cronin PhD					

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doelstelling van de analyse	1
1.3 Aanpak van de analyse en opbouw rapport	1
2 Verwerking van de data	2
2.1 Ingewonnen data	2
2.1.1 Lidar data (NAM)	2
2.1.2 Bestaande bodemhoogte-gegevens	5
2.2 Verwerking van de lidar data	5
2.3 Morfologische veranderingen	12
3 Analyse intergetijdengebieden	23
3.1 Methode van analyse	23
3.2 Resultaten	24
3.3 Beschouwing over de nauwkeurigheid en toepasbaarheid van de data	29
4 Conclusies en aanbevelingen	30
5 Referenties	31
Appendix A: Hoogtekaarten Rijkswaterstaat 2005 - 2012	32
Appendix B: Voorbeeld handmatige correctie Lidar	36
Appendix C: Verificatie van de nauwkeurigheid van de 2012 lidar opname	38

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In het kader van de monitoring van de effecten van bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee worden de ontwikkelingen van de wadplaten gemonitord. Tot 2009 gebeurde dit door het nemen van luchtfoto's. In het voorjaar van 2010 is een pilot Lidar opname gemaakt door Fugro voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. De resultaten daarvan zijn geanalyseerd en gerapporteerd door Deltares (Wang et al., 2010). In 2011 zijn twee lidar opnames uitgevoerd, één in het voorjaar en één in het najaar (Cronin en Wang, 2012), in 2012 zijn daar twee opnamen bijgekomen. In het voorjaar is er door Rijkswaterstaat een lidar opname gemaakt. In het najaar heeft Fugro in opdracht van de NAM een opname verricht (Fugro, 2012). Dit rapport beschrijft de analyse van deze nieuwe Lidar data. Het rapport en de methode van analyse zoals gepresenteerd in Cronin en Wang (2012) is hierbij als uitgangspunt genomen.

1.2 Doelstelling van de analyse

De analyse heeft twee doelen:

- De lidar data toegankelijk maken door ze te visualiseren en door het evalueren van de relevante morfologische parameters (plaatareaal, -hoogte en -volume) met de bijbehorende nauwkeurigheid.
- De ontwikkelingen van de wadplaten sinds de lidar metingen in 2010 bepalen en vergelijken met historische ontwikkelingen.

1.3 Aanpak van de analyse en opbouw rapport

Voor de verwerking van de lidar data is dezelfde methode gehanteerd zoals gebruikt bij het analyseren van de eerdere lidar opnames (Cronin en Wang, 2012). De resultaten hiervan worden gepresenteerd in Hoofdstuk 2. Ook zijn de morfologische parameters van de wadplaten op dezelfde manier bepaald. Voor het evalueren van de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten gebruiken wij de opname uit 2010 als referentie (Hoofdstuk 3). Dit Hoofdstuk geeft ook een beknopte beschouwing van de onzekerheden in de gemeten veranderingen. Conclusies worden gepresenteerd in Hoofdstuk 4.

2 Verwerking van de data

2.1 Ingewonnen data

2.1.1 Lidar data (NAM)

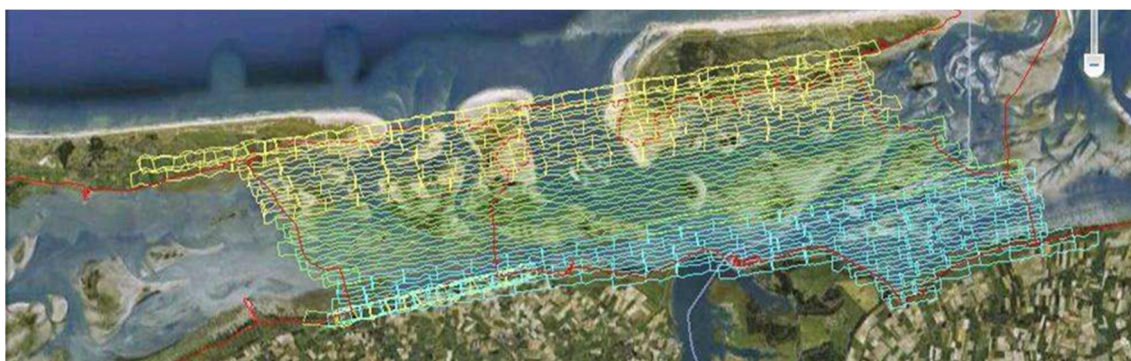
Lidar (Light Detection And Ranging) is een technologie die de afstand tot een object of oppervlak bepaalt door het meten van het tijdsverschil tussen uitzenden van een laserpuls en ontvangen van de reflectie. De lidar data, ingewonnen met behulp van het FLI-MAP 1000 systeem, zijn aangeleverd door Fugro. In totaal zijn er nu vier opnames gemaakt: in het voorjaar van 2010, het voorjaar en najaar van 2011, en het najaar van 2012. In het voorjaar van 2012 is door Rijkswaterstaat (RWS) het gehele gebied ook met behulp van Lidar ingemeten. Kwaliteitsborging en de verwerking van de ruwe (gemeten) lidar data, naar x,y,z bestanden van 1 m resolutie zijn door RWS uitgevoerd. Deze verwerking is niet identiek aan de verwerking van de NAM data. Ten behoeve van deze studie is de RWS data wel op een identieke wijze als de NAM lidar data vergrid en weergegeven. Het verschil in inwinning- en verwerkingstechniek geeft echter wel een afwijking in uiteindelijke hoogte (zie Figuur 2.15). Deze paragraaf behandelt alleen de door NAM ingewonnen data. Tabel 2.1 geeft een overzicht van de data van inwinning van de NAM lidar data. Figuur 2.1 tot en met Figuur 2.4 geven een illustratie van de metingen per meetdag (Fugro 2010; 2011a; 2011b, 2012).

Tabel 2.1 Overzicht van de datum van opname van de verschillende lidar data.

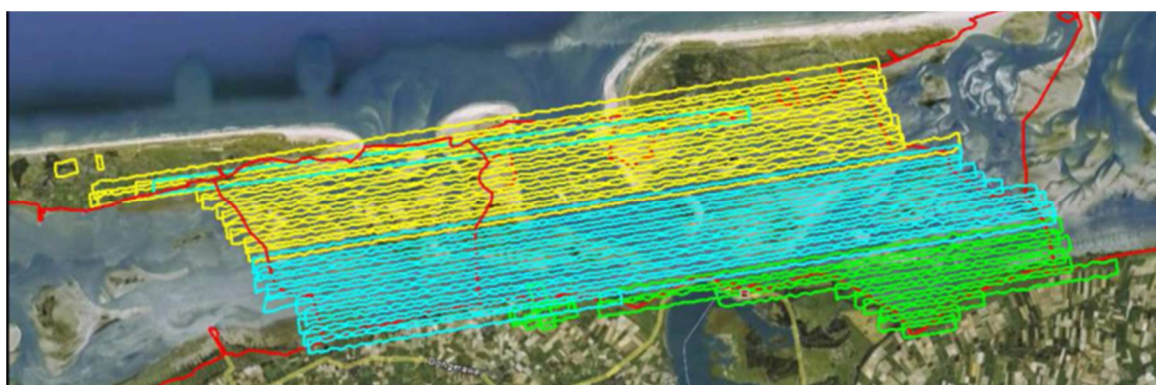
Lidar referentie	Datum van opname
2010	25-04-2010, 26-04-2010, 28-04-2010
2011 (voorjaar)	14-04-2011, 15-04-2011, 16-04-2011
2011 (najaar)	24-9-2011, 25-9-2011, 26-9-2011, 27-9-2011
2012 (voorjaar)	- Opgenomen door Rijkswaterstaat -
2012 (najaar)	15-10-2012, 16-10-2012, 26-10-2012

De weeromstandigheden tijdens de metingen in voorjaar 2011 waren beter (minder wind) dan die tijdens de metingen in voorjaar 2010. Daardoor waren er veel minder golven met als gevolg dat het wateroppervlak minder reflectie gaf. Het zelfde fenomeen speelt ook op de platen als er water is achtergebleven. Gedurende de eerste twee dagen (24 en 25 september) van de metingen in najaar 2011 was het perfect weer. Maar daarna werd het bewolkt en er ontstonden gaten in de data voor het gebied gemeten op 26 september. Op 27 september heeft Fugro aanvullende metingen gedaan om de gaten te vullen (paars in Figuur 2.3). De 2012 meting werd gekenmerkt door goede weersomstandigheden op 15 en 16 oktober. Inkomende regen en bewolking op de tweede dag maakten het noodzakelijk te wachten tot 26 oktober voordat het volledige gebied opgenomen kon worden. Alle opnamen werden opgenomen rond laag water en beneden de gestelde grens van -0.70m NAP (zie ook Figuur 2.5).

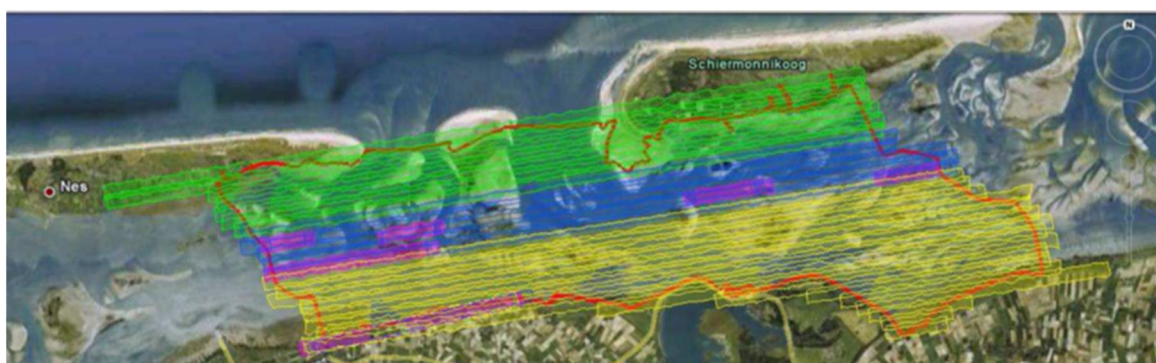
Cronin en Wang (2012) geven aan dat de lidar metingen van voorjaar 2010 uitgevoerd zijn bij waterstanden lager dan -0.7 m NAP. De metingen van voorjaar 2011 zijn uitgevoerd bij waterstanden lager dan -1.0 m NAP en die van najaar 2011 bij waterstanden lager dan -0.7 m NAP bij Nes en Schiermonnikoog.



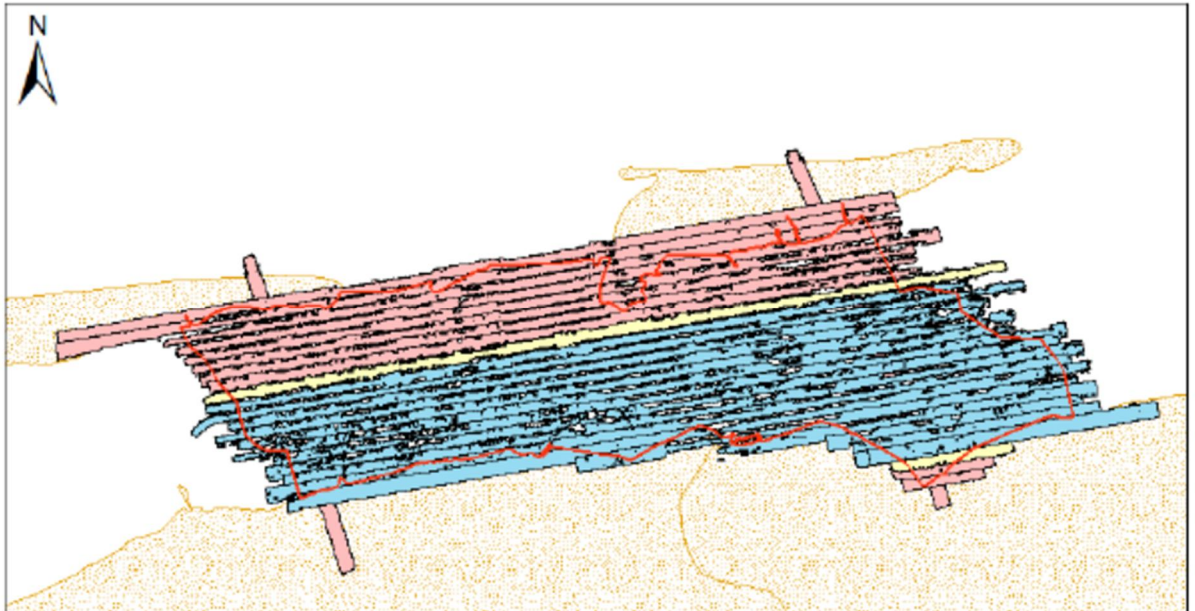
Figuur 2.1 Lidar data inwinning, gebiedsdekking en vluchtenschema: Geel: 25-03-2010, 09:05-13:08; Groen: 26-03-2010, 10:41-14:08; Blauw: 28-03-2010, 14:27-16:50. Bron: Fugro (2010).



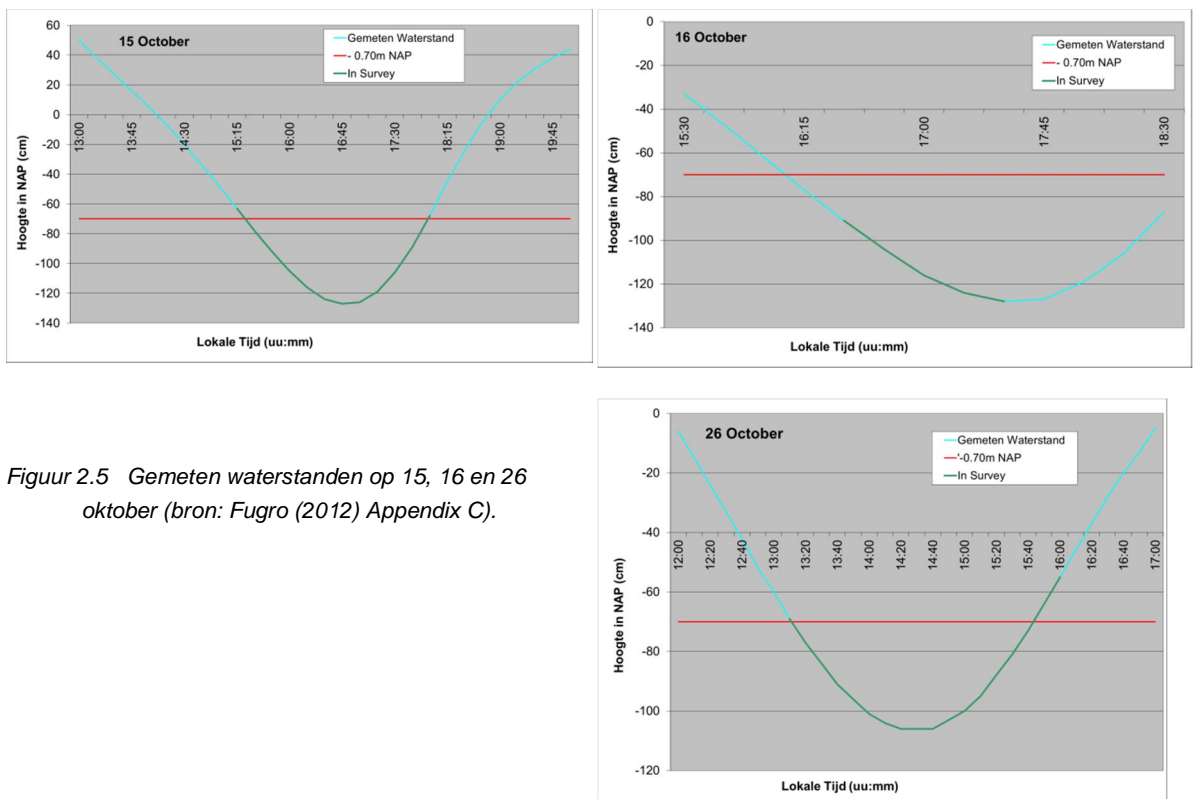
Figuur 2.2 Lidar data inwinning, gebiedsdekking en vluchtenschema: Geel: 14-04-2011; Blauw: 15-04-2011; Groen: 16-04-2011. Bron: Fugro (2011a).



Figuur 2.3 Lidar data inwinning, gebiedsdekking en vluchtenschema: Geel: 25-09-2011, Groen: 24-09-2011; Blauw: 26-09-2011, Paars: 27-09-2011 Fugro (2011b).



Figuur 2.4 Lidar data inwinning, gebiedsdekking en vluchtenschema: rood: 15-10-2012, geel: 16-10-2012; blauw: 26-10-2012, Bron: Fugro (2012).



Figuur 2.5 Gemeten waterstanden op 15, 16 en 26 oktober (bron: Fugro (2012) Appendix C).

Fugro heeft de data van voorjaar 2010 aan Deltares geleverd in zowel ASCII als LAS format. 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. De bestanden in het LAS formaat 1.2 bevatten ook extra informatie zoals vluchtlijn, tijd, return nummer, intensiteit, RGB, scan hoek. De fout in de bodemhoogtes gemeten in voorjaar 2010 wordt geschat op ongeveer 7 cm (Fugro, 2011a). De data van de metingen in 2011 en 2012 (met correctie in 2013) zijn aan Deltares geleverd als ESRI ASCII grid van 1m x 1m, en als XYZiRGB bestanden (Easting, Northing, Elevation, Intensity, Red, Green, Blue). Eén bestand beslaat een gebied van 1000m bij 1250m. Fugro (2012) geeft een foutenmarge van 6.2 cm voor de gemeten bodemhoogtes. Alle data gepresenteerd in deze studie heeft een hoogte t.o.v. NAP.

2.1.2 Bestaande bodemhoogte-gegevens

Bij de analyse van de metingen van voorjaar 2010 (Wang e.a., 2010) is als referentie een bodem gebruikt welke is samengesteld uit vaklodingen en Lidar uit 2006. In de rapportage van Cronin en Wang (2012) is geconcludeerd dat (1) de vaklodingen de vloedkommen niet geheel dekken (Figuur 2.6, boven) en (2) dat de opgevulde bodem (Figuur 2.6, midden) inconsistenties vertoont tussen de verschillende datasets. Inmiddels is een nieuwe bodem beschikbaar (Figuur 2.6, onder) gebaseerd op RWS vaklodingen en RWS lidar data voor dezelfde periode. Deze bodem lijkt consistent en heeft geen duidelijke grenzen of fouten tussen de verschillende datasets (zie Appendix A voor de meta-data van deze bodem).

2.2 Verwerking van de lidar data

De methode van verwerking van de aangeleverde Lidar data is volgens Cronin en Wang (2012). Voor de volledigheid worden de data van Cronin en Wang (2012) ook weergegeven. De gevolgde stappen worden doorlopen voor het creëren van de datasets:

- 1 De ruwe data, de xyz-bestanden, zijn eerst omgezet naar een kaartblad grid, in overeenstemming met de manier waarop Rijkswaterstaat de gegevens van lodingen en lidar-metingen verwerkt. Hierbij is de methode 'griddata_average' gebruikt. Dit houdt in dat de gemiddelde waarde van alle data binnen een gridcel wordt berekend en gebruikt. Er wordt dus niet geïnterpoleerd. Als er geen gegevens binnen een gridcel beschikbaar zijn, dan wordt voor de betreffende gridcel geen waarde berekend. Als er binnen een gridcel meerdere punten beschikbaar zijn, wordt de gemiddelde waarde berekend. Alle punten tellen even zwaar, onafhankelijk van de ligging van de punten binnen de gridcel. Voor elke lidar dataset zijn grids met 20x20m (identiek aan vaklodingen), 10x10m en 5x5m gebruikt. De resultaten van de analyse blijken niet gevoelig te zijn voor de resolutie van het grid, dat wil zeggen dat proeven op verschillende resolutie (10x10 m) en (5x5 m) niet het resultaat wijzigen. Uit praktisch oogpunt is er met 10x10m grids verder gerekend.
- 2 Visualiseren van de gegevens. Na stap 1 kunnen de gemeten bodemhoogtes worden gevisualiseerd in bijvoorbeeld contourplots, zie Figuur 2.7. Een aantal zaken valt in deze figuren op:
 - (a). De gegevens dekken niet het hele gebied. De witte vlekken geven gridcellen weer waarin geen datapunten vallen. Dit kan komen doordat er op de betreffende locatie water staat, zoals is aangegeven door Fugro (2010). "Vanwege water treedt er speculaire reflectie op in die delen van de scan die een scherpe hoek maken met het water, waardoor er geen reflectie naar de ontvanger optreedt." De streppatronen van de witte vlekken parallel aan de

vluchtroutes suggereren dat deze plekken vooral aan de rand van de vluchtstroken liggen.

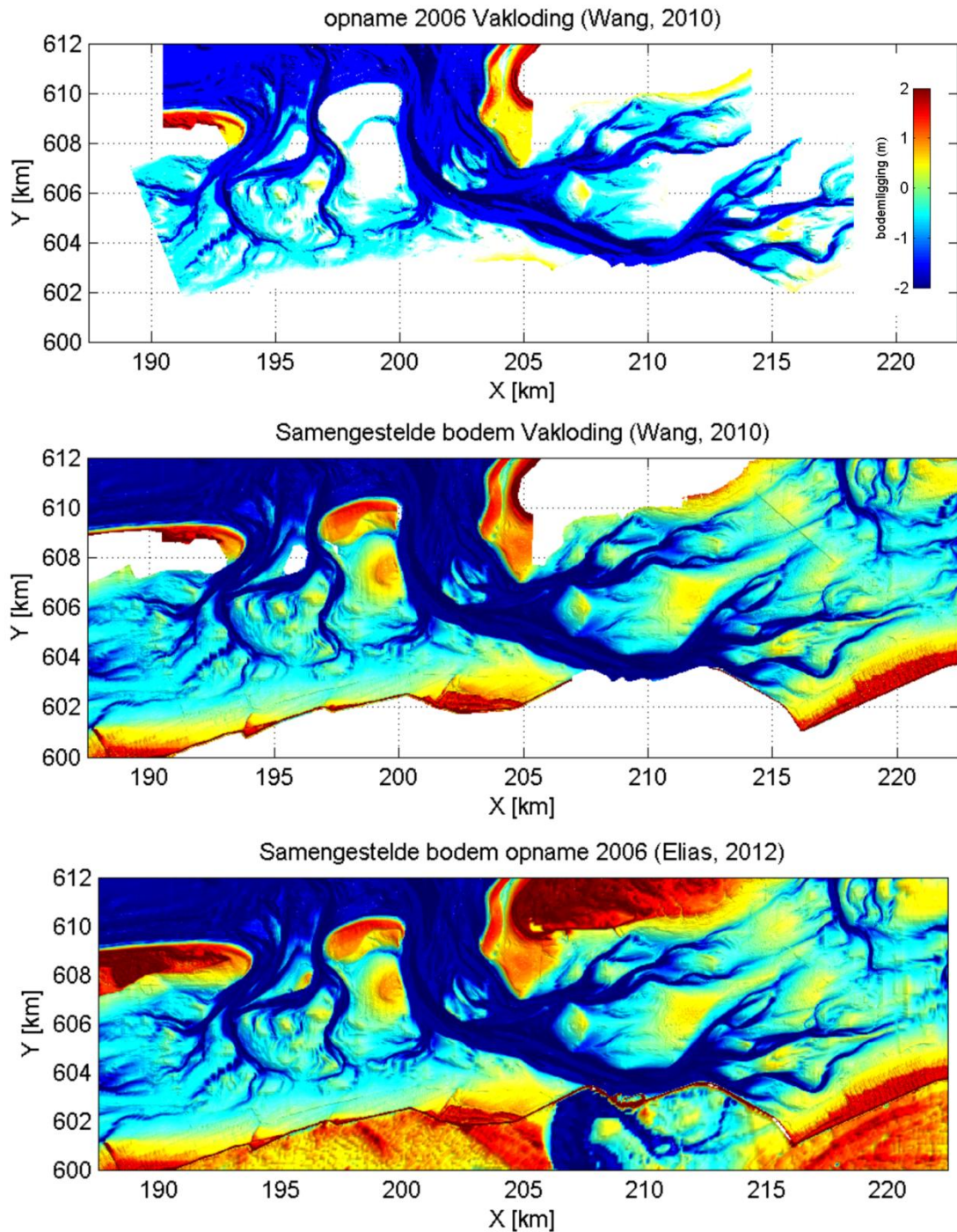
(b) de vluchtstroken dekken niet het gehele gebied. Er blijven gaten in de data beschikbaar, zoals opgemerkt bij (a) liggen deze vooral langs de vluchtbanen. De dekking van de 2012 meting is beter

(c). Hoogtemetingen zijn ook aanwezig in de geulen. Hier wordt dus de hoogte van het wateroppervlak gemeten. De kleurverschillen in de bovengenoemde blauwe geulpatronen, parallel aan de vliegrichting, laten zien dat de metingen bij verschillende waterstanden hebben plaatsgevonden (zie ook paragraaf 2.1).

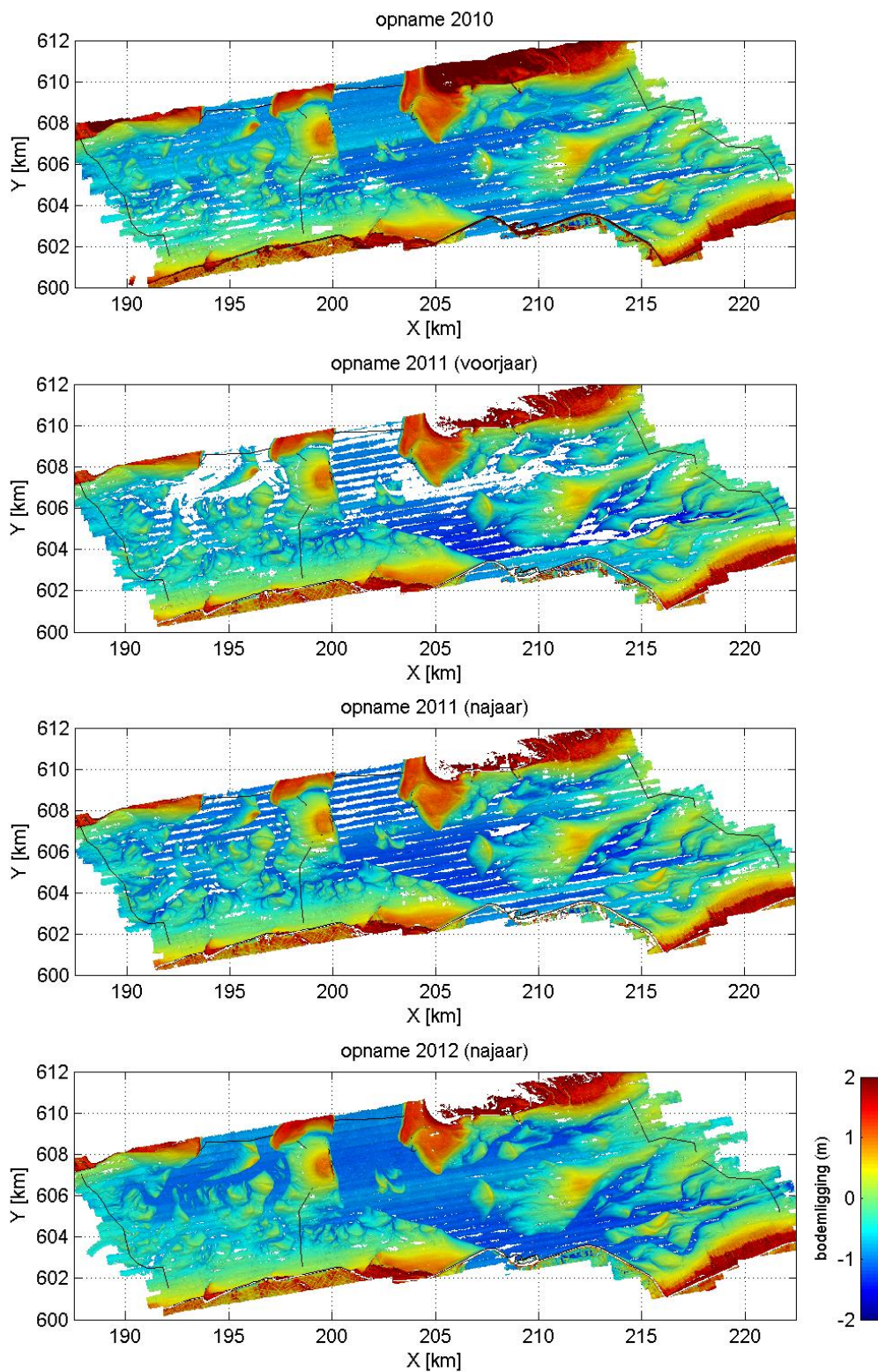
- 3 De data gebruikt voor het voorjaar 2011 is de nieuw verwerkte data zoals aangeleverd door Fugro in 2012 (Figuur 2.7, sub-figuur 2).
- 4 De data gebruikt voor het najaar 2012 is de nieuw verwerkte data zoals aangeleverd door Fugro in 2013 (Figuur 2.7, sub-figuur 3).

Naast de 'ruwe data plot' kunnen er ook gebiedsdekkende kaarten gemaakt worden (Figuur 2.8). De witte vlekken zijn hier opgevuld door een driehoeks interpolatie vanuit de omliggende meetpunten. Interpolatie geeft misschien een onnauwkeurigheid, maar maakt het mogelijk de analyses per deelgebied nauwkeuriger uit te voeren. Alle kaarten hebben op de plaatoppervlakten nu een identieke dekking van de data. Deze kaarten worden gebruikt als basis voor de verdere verwerking en analyse, zoals het bepalen van relevante morfologische parameters en vergelijking met de bestaande gegevens.

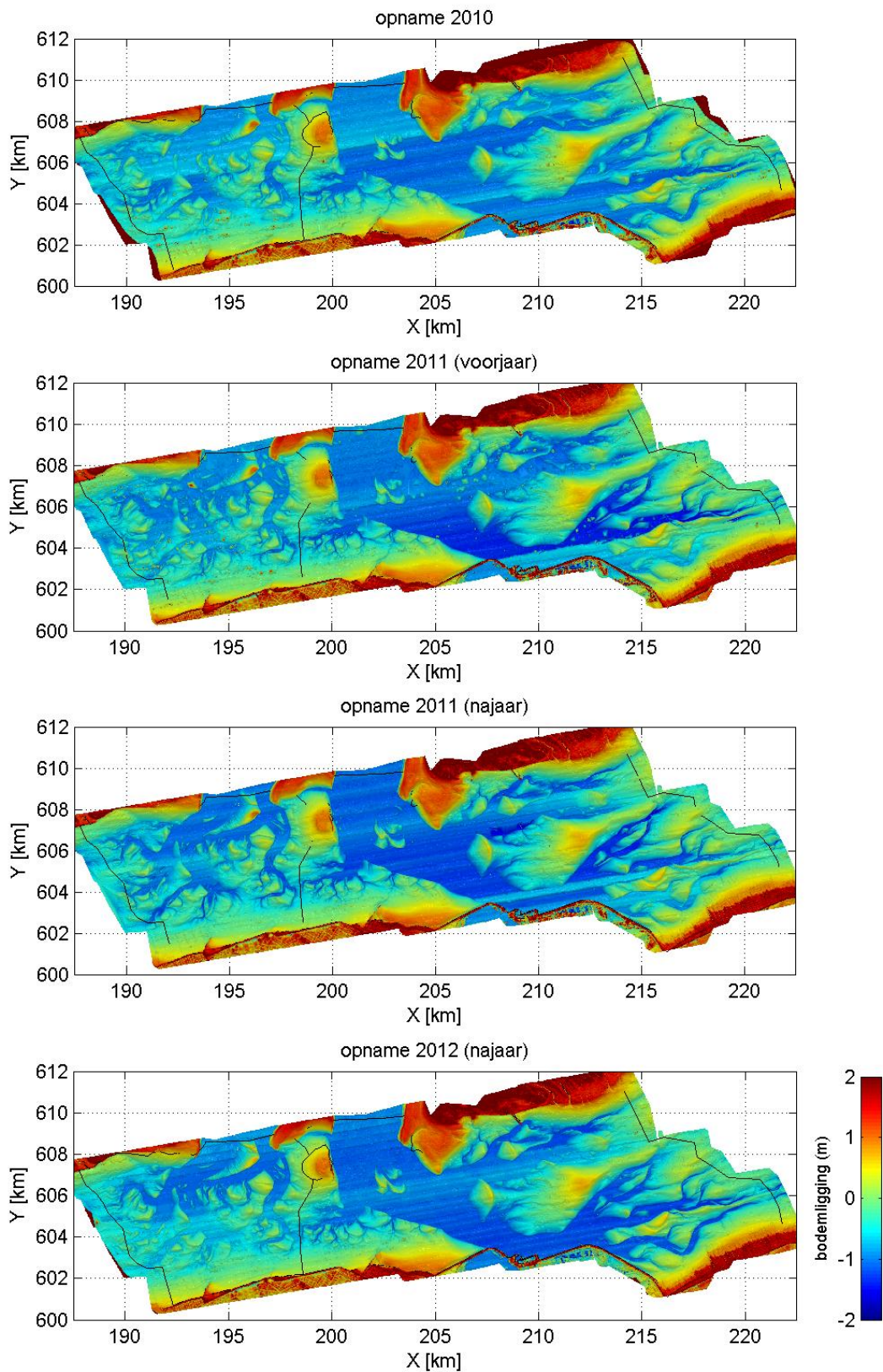
Opmerking: De data zijn eerst gecontroleerd op onrealistische waarden. Binnen de vloedkommen zijn waarden buiten de range – 2m tot +2 m NAP verwijderd. Inspectie van de kaarten geeft aan dat er echter nog steeds onnauwkeurige punten aanwezig zijn die binnen deze range vallen. Deze punten worden vooral duidelijk in sedimentatie-erosie plots zoals gepresenteerd in Figuur 2.16. De data voor het najaar van 2012 bevat significant minder van deze onnauwkeurigheden in relatie tot voorgaande jaren. Vooral in de onderste figuur zijn de onnauwkeurige punten zichtbaar als 'harde' kleuren. Het is raadzaam de originele LAS bestanden zorgvuldig te bekijken en analyseren op onregelmatige data. Bij vergridding worden deze onregelmatigheden samengenomen met goede data waardoor een diffuus beeld ontstaat.



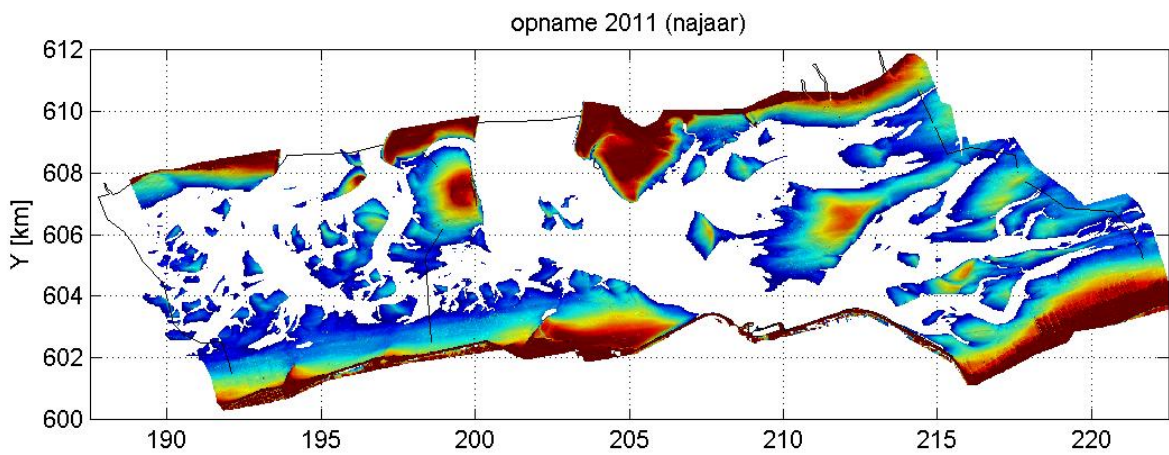
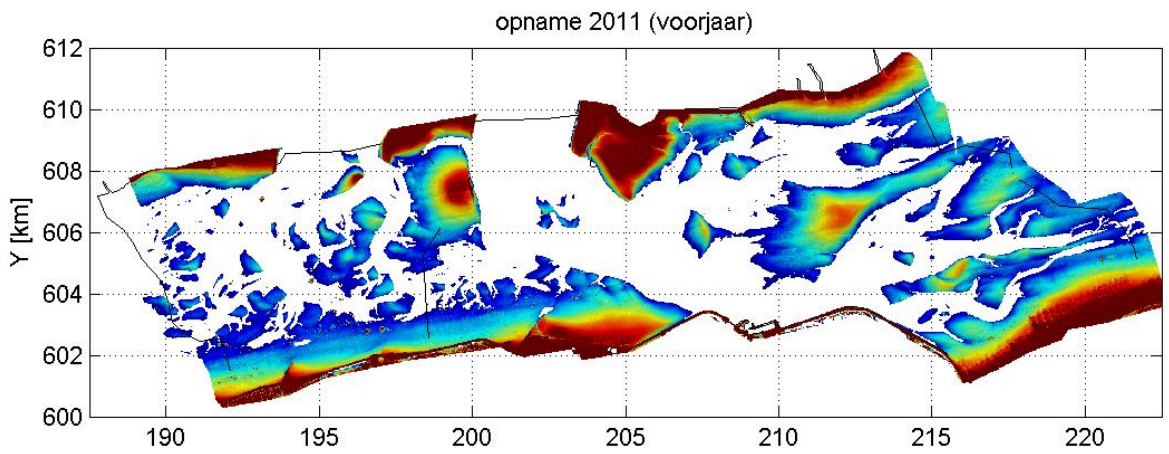
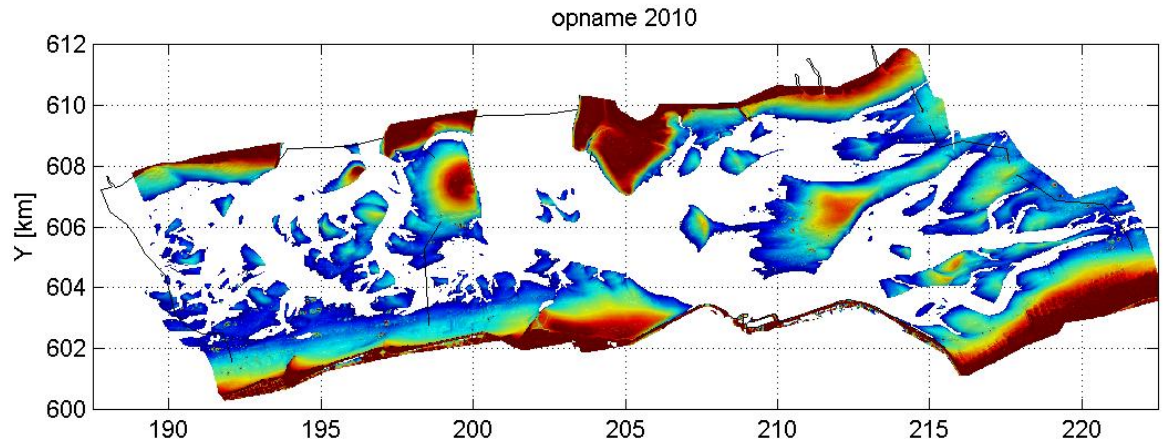
Figuur 2.6 Visualisatie van de 2006 bodemhoogte gegevens tov NAP. Boven: Vaklodningen data zoals gebruikt in Wang et al. (2010), midden: opgevulde 2006 bodem zoals gebruikt in (Wang et al., 2010), onder: nieuwe bodem gebaseerd op 2005-2006 vaklodningen en RWS lidar data (beschreven in Appendix A).

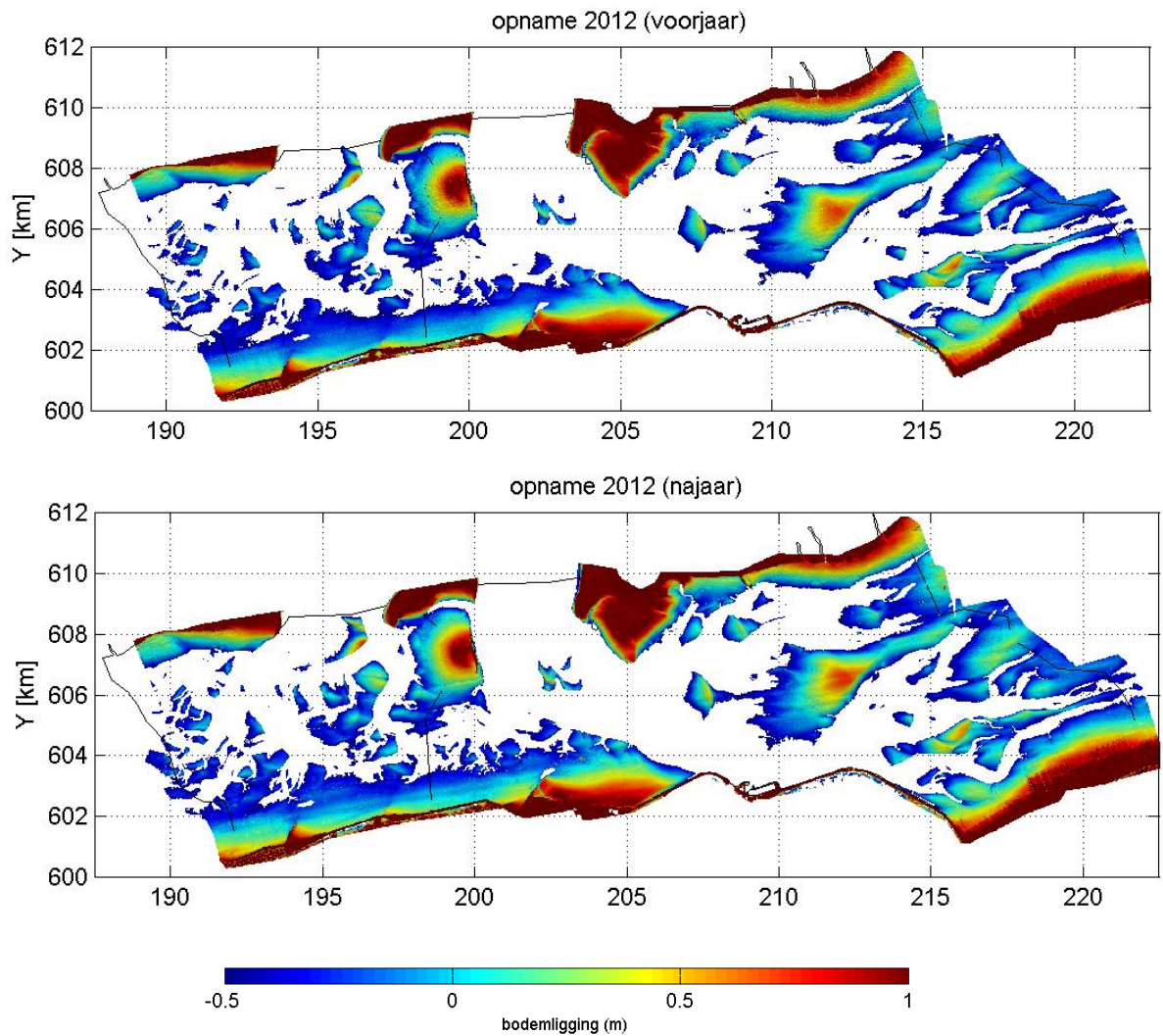


Figuur 2.7 Visualisatie van de 'ruwe' bodemhoogte gegevens NAM lidar data (tov NAP) op een 10x10m grid voor maart 2010, april 2011, september 2011 en oktober 2012 (van boven naar beneden).



Figuur 2.8 Visualisatie van de geïnterpoleerde bodemhoogte gegevens NAM lidar data (tov NAP) voor maart 2010, april 2011, september 2011 en oktober 2012 (van boven naar beneden).





Figuur 2.9 Visualisatie van de geïnterpoleerde bodemhoogte gegevens (t.o.v. NAP) van alle Lidar data op een 10x10m grid voor voorjaar 2010, voorjaar 2011, najaar 2011, voorjaar 2012 (RWS data) en het najaar van 2012. Alle data kleiner dan -0.50m is verwijderd.

2.3 Morfologische veranderingen

Binnen de voorgaande rapportages (Wang et al. 2010, Cronin en Wang, 2012) zijn twee tekortkomingen geconstateerd met betrekking tot het gebruik van de datasets voor morfologische monitoring. Ten eerste is er een probleem bij geulmigratie. Het probleem in de huidige analyse is dat de Lidar bestanden aangeleverd zijn inclusief wateroppervlakte. Als postprocessing stap is het zeer moeilijk deze gemeten wateroppervlakten uit de gegevens te filteren. Voor bekende geulen is dit wel mogelijk maar juist bij de plaat-geul overgang worden de verschillen moeilijk interpreteerbaar.

Het verwijderen van het wateroppervlak uit de metingen is echter niet triviaal en zeer arbeidsintensief. In Appendix B is een voorbeeld van een correctie opgenomen welke is uitgevoerd als nabewerking op de vergride datasets. Het probleem in de gepresenteerde kaart (Appendix B, Figuur B-1) is dat deze moeilijk reproduceerbaar is en de nauwkeurigheid niet gegarandeerd kan worden op de droog-nat overgang. Een automatische herkenning van de nat-droog scheidingslijn op basis van RGB kleurwaarde geeft hier echter ook geen uitsluitel (Fugro, interne communicatie). Nat zand en water zijn niet te onderscheiden. Handmatige detectie van de waterlijn is zeer arbeidsintensief. Aangezien de interesse ligt in het plaatoppervlakte en niet in de plaat-geul overgang (wat slechts een gering aandeel vormt) is deze correctie hier niet uitgevoerd. Plaatarealen berekend in deze studie geven hier dus het oppervlakte weer van de platen boven de -0.5m contour.

Figuur 2.11 tot en met Figuur 2.14 geven een overzicht van de gemeten bodemverandering t.o.v. de 2010 lidar opname. De gepresenteerde figuren gebruiken identieke datasets maar een iets andere instelling van de kleuren zodat sedimentatie-erosie patronen duidelijk zichtbaar worden. De figuur gebaseerd op de ruwe data (Figuur 2.11) is enigszins misleidend aangezien de overheersende verandering een waterstandverschil is in de geulen en niet de bodemverandering. Correctie van de datasets, door alleen de data met een waarde boven de -0.50 m te gebruiken geeft een beter beeld van de gemeten plaathoogte verandering (Figuur 2.13 en Figuur 2.14). In deze figuren is de kleurschaal verandert voor het beter weergeven van de data.

Wat opvalt in de metingen is:

(1) De geobserveerde veranderingen tussen de lidar datasets zijn relatief klein t.o.v. de meetfouten. Dit kan inzichtelijk gemaakt worden door het histogram van de hoogteverandering gepresenteerd in Figuur 2.10. Uit dit histogram volgt dat het merendeel van de metingen tussen de 10 cm hoogteverandering ligt. Met toenemende meetduur wordt dit percentage wel duidelijk lager; dit reduceert van 85% voor de 2010 – 2011 voorjaar meting, 81 % van 2010 – 2011 najaar en 72 % voor de periode 2010 – 2012. Over de periode 2010-2012 zien we een iets kleiner oppervlak aan erosie (45%) dan sedimentatie (55%). In de 2011 (herfst) bodem lijkt erosie dominant te zijn.

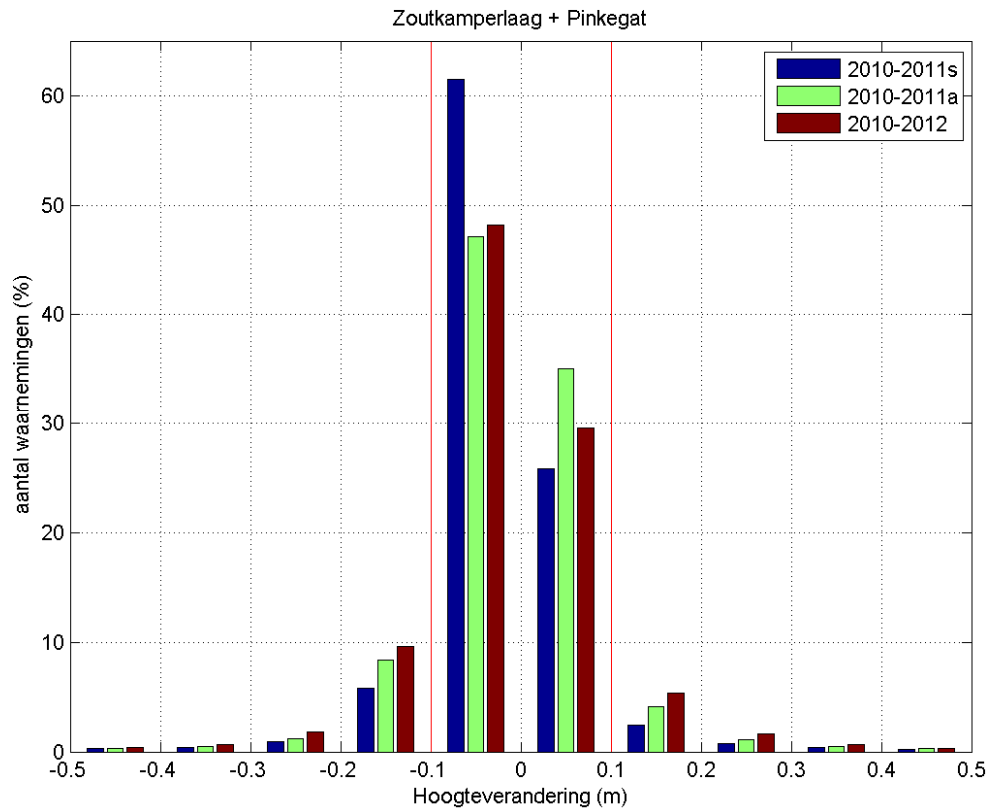
(2) Het vlekkerige patroon van sedimentatie en erosie. De lidar opnamebanen zijn duidelijk waarneembaar als afwisselende banen van sedimentatie en erosie. Lokaal zijn er gebieden en punten aanwezig waarvan de erosie of sedimentatie waarden duidelijk buiten de waarde van de omliggende punten ligt (Figuur 2.16). In de 2012 meting zijn deze 'data uitschieters' minder prominent aanwezig in vergelijking tot de eerdere datasets.

(3) De RWS lidar opname heeft een iets lagere hoogte dan de NAM lidar data. Deze verschillen liggen binnen de gerapporteerde meetfout. Dit verschil geeft echter wel aan dat het moeilijk is datasets van verschillende oorsprong goed met elkaar te vergelijken.

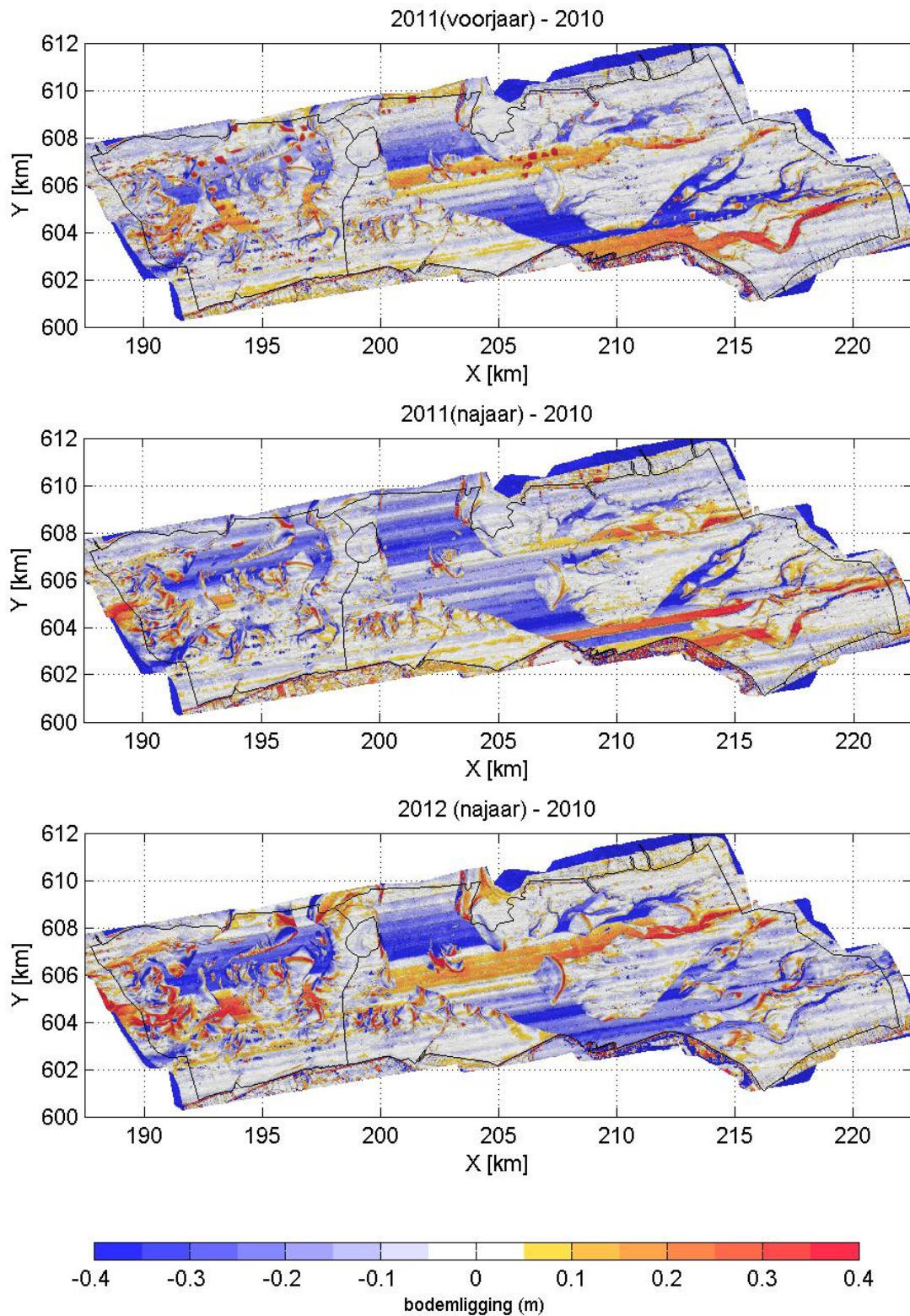
Een aanvullende manier om de nauwkeurigheid van de NAM lidar data te toetsen is te kijken naar de snelheid van bodemverandering. De snelheid van bodemverandering (in m/jaar) is te bepalen vanuit de NAM lidar opnames en uit de lange-termijn meetreeksen van Rijkswaterstaat (zie Figuur 2.16, Figuur 2.17 en Figuur 2.18).

De erosiesnelheden zoals gepresenteerd in Figuur 2.17 (met details in Figuur 2.18) geven aan dat de veranderingen in de kombergingsgebieden gedomineerd worden door geulverplaatsingen. De veranderingen op de platen zijn zeer gering in vergelijking. 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 in vergelijking met het overige gedeelte van het bekken. In Figuur 2.16 vergelijken we de opgetreden erosiesnelheid op basis van de Rijkswaterstaat data (boven) en de NAM-lidar metingen over de periode 2010-2012 (najaar). Beide datasets zijn genormaliseerd naar m/jaar. In beide datasets is de bulk van het oppervlak eroderend. De erosiesnelheden zijn over het algemeen kleiner dan 3 cm/jaar. In de Nam lidar data zijn gebieden met een hogere erosiesnelheid waarneembaar (tot 6 cm/jaar). Gezien de ligging, overeenkomstig met de vluchtbanen binnen de lidar opname is het waarschijnlijk dat deze gerelateerd zijn aan de nauwkeurigheid van de meting. Hoewel het merendeel van het plaatoppervlak een kleine erosie vertoont, laat met name de RWS data zien dat de sedimentatie een kleiner gebied bestrijkt maar wel met grotere waarde.

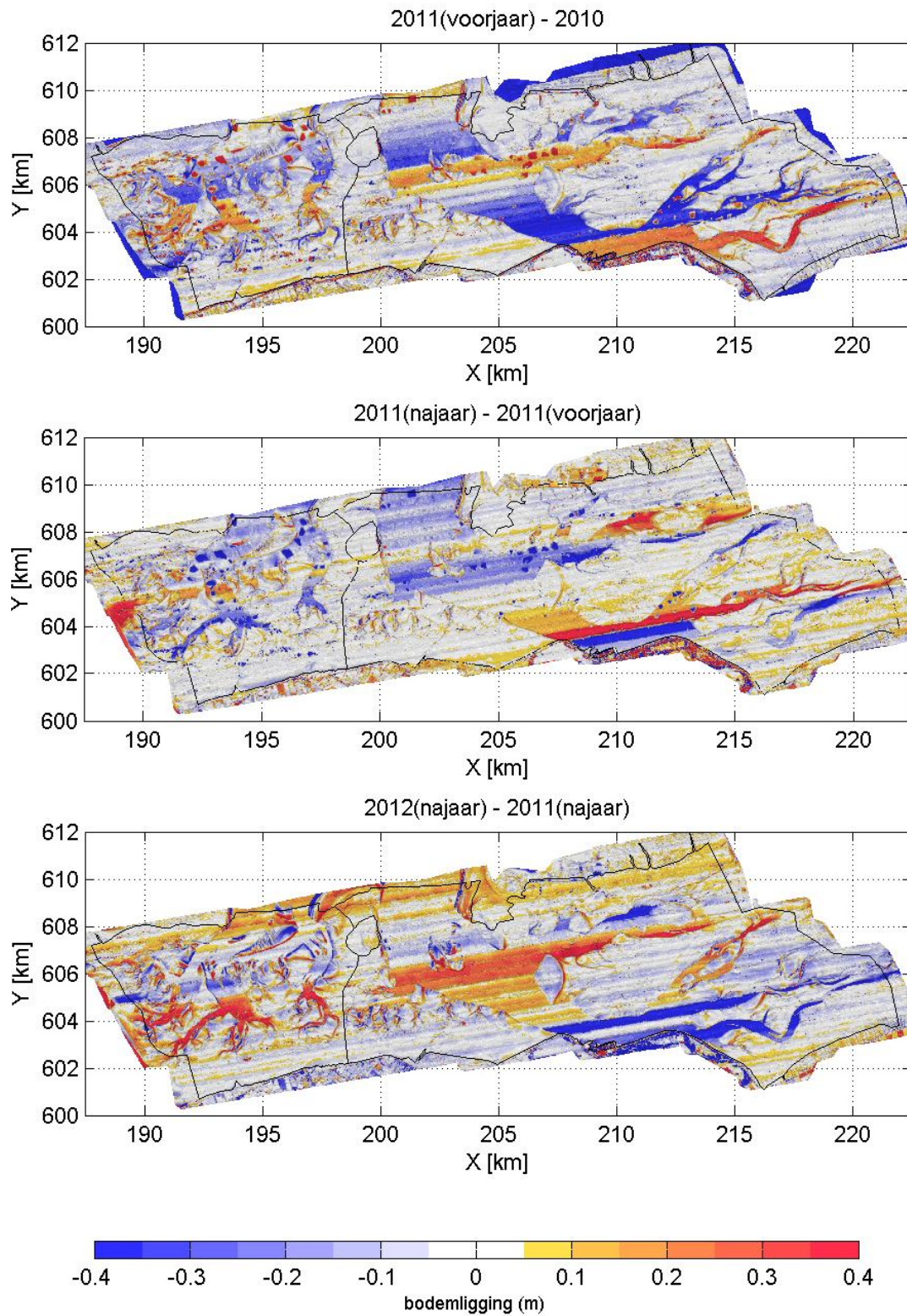
In Figuur 2.17 en Figuur 2.18 zijn de lange-termijn trends (1987-2012) van de bodemverandering in het Friesche Zeegat weergegeven op basis van de RWS data. Op de schaal van het zeegat (Figuur 2.16) domineren geulmigraties het beeld. De veranderingen op de platen tussen de opeenvolgende jaren liggen binnen de nauwkeurighedsband van de metingen. Er zijn geen duidelijke trendbreuken of veranderingen te zien tussen de laatste metingen (2005-2012) en de voorgaande metingen. Dit geeft aan dat het huidige geobserveerde gedrag representatief is voor de langere termijn ontwikkelingen. Kijken we in meer detail naar de plaatontwikkeling (Figuur 2.18), 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.



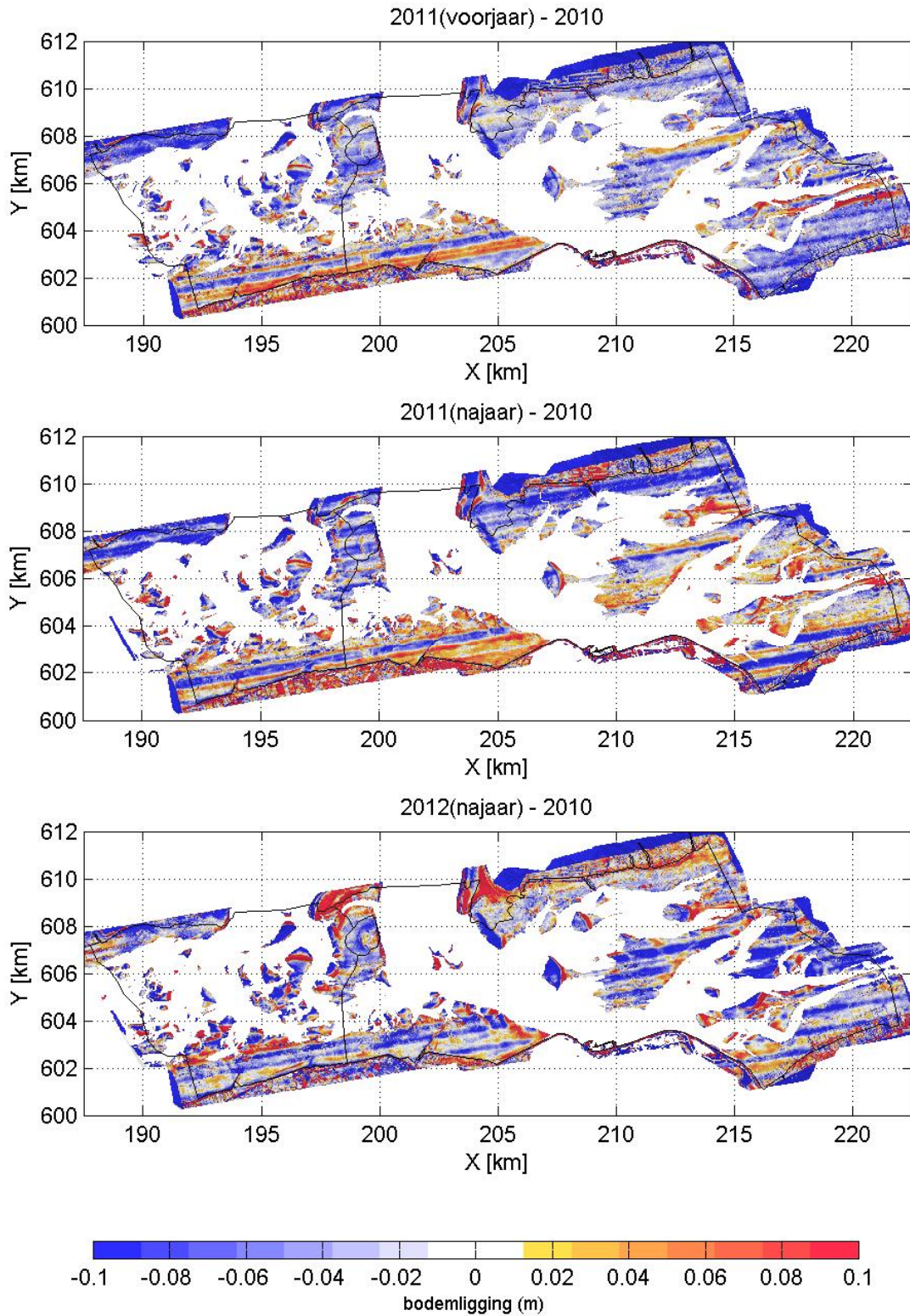
Figuur 2.10 Histogram van de hoogteverandering t.o.v. de 2010 meting.



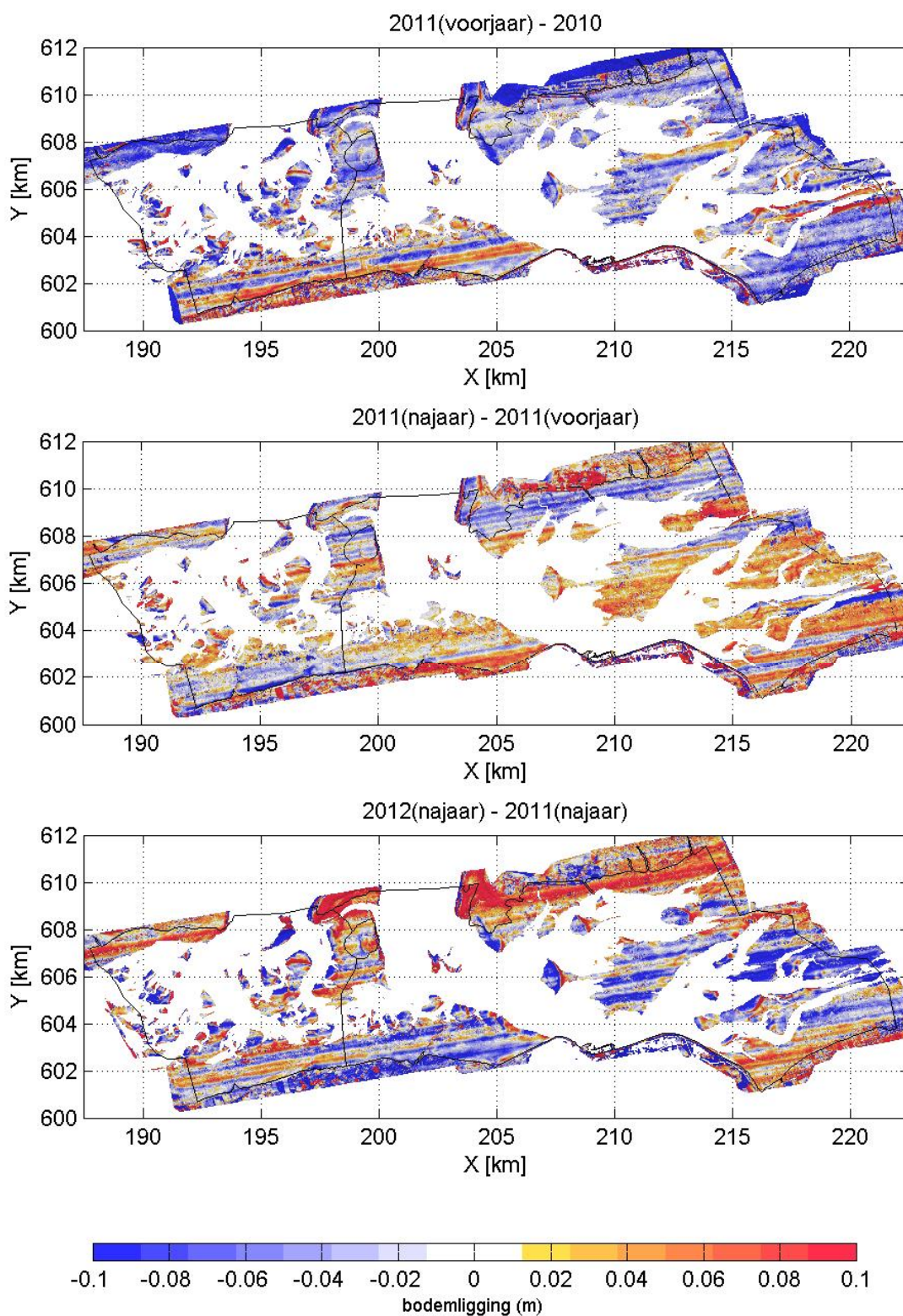
Figuur 2.11 Sedimentatie (positief) en erosie (negatief) in m t.o.v. de 2010 Lidar opname (alleen NAM data).



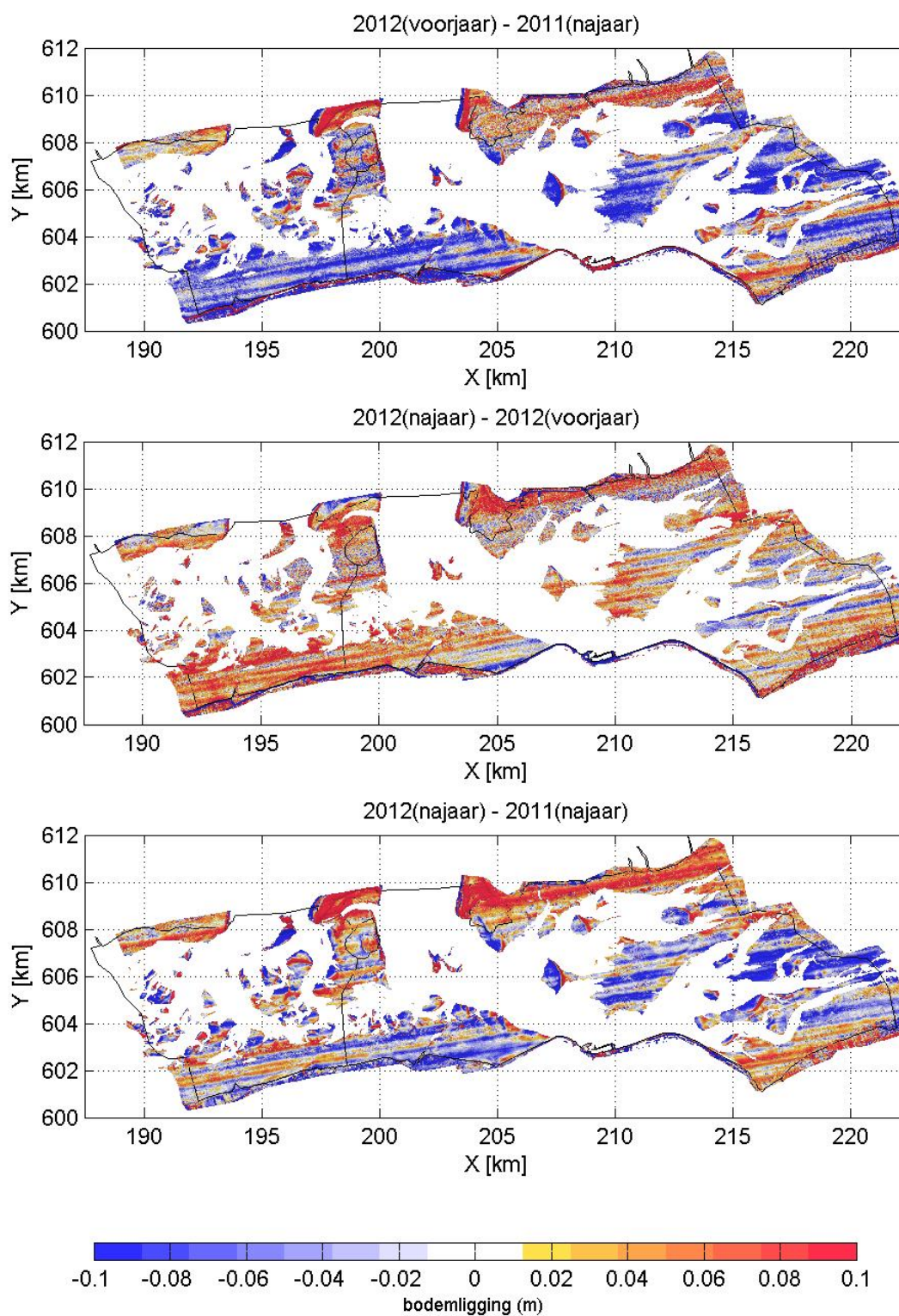
Figuur 2.12 Sedimentatie (positief) en erosie (negatief) in m tussen de opeenvolgende NAM lidar opnames over de periode 2010 – 2012.



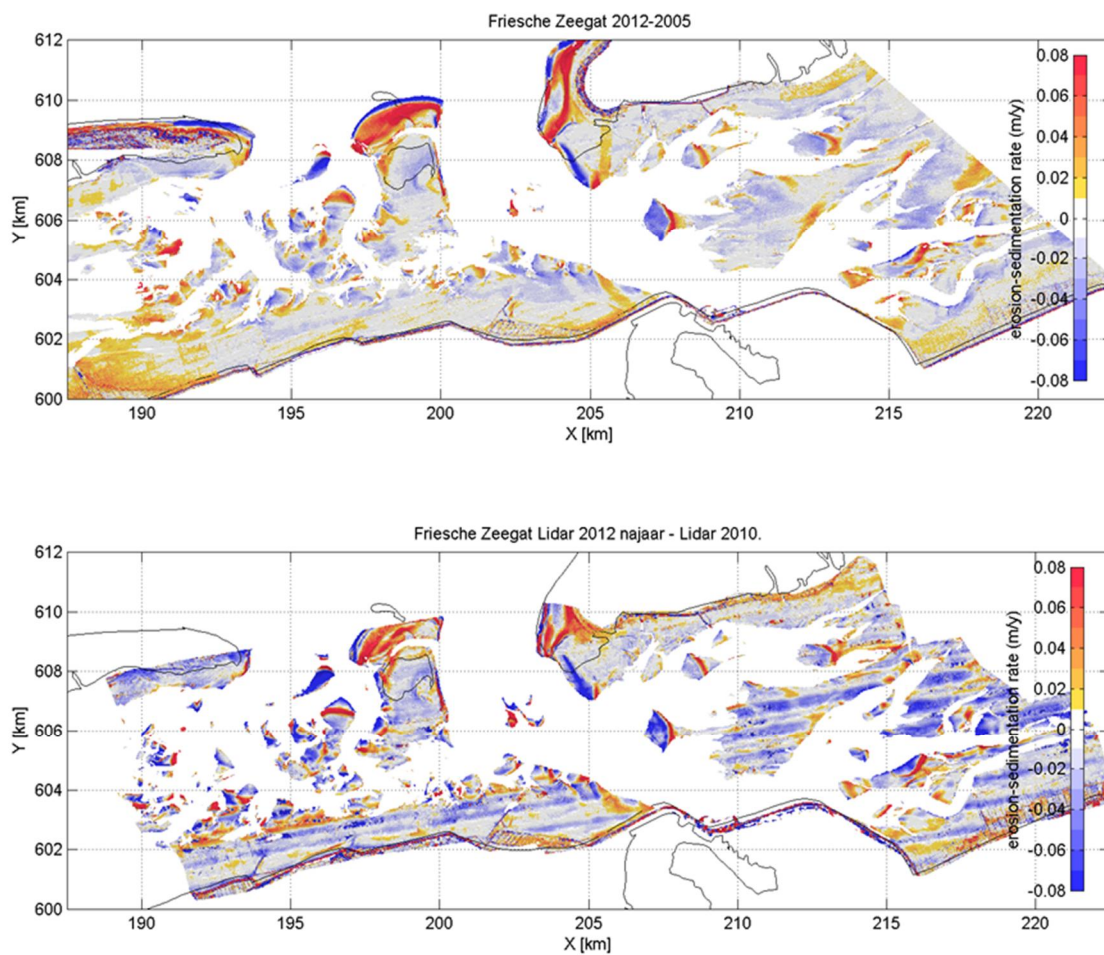
Figuur 2.13 Sedimentatie (positief) en erosie (negatief) in m t.o.v. de 2010 opname voor bodempunten met een hoogte boven -0.50 m NAP (kleurenschema begrenst op +0.10m en -0.10m).



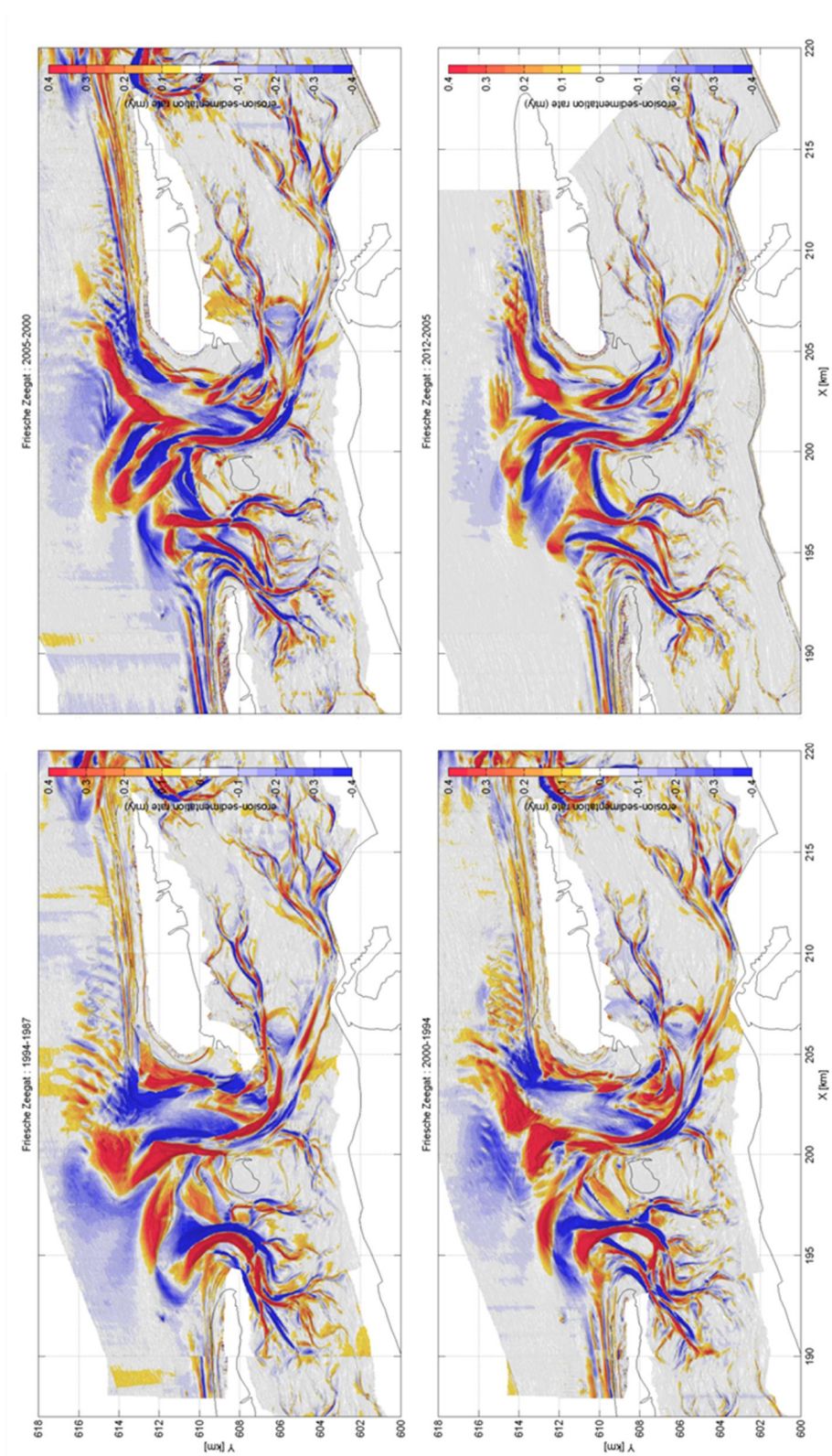
Figuur 2.14 Sedimentatie (positief) en erosie (negatief) in m tussen opeenvolgende NAM lidar opnames voor bodempunten met een hoogte boven -0.50 m NAP (kleurenschema begrenst op +0.10 en -0.10m).



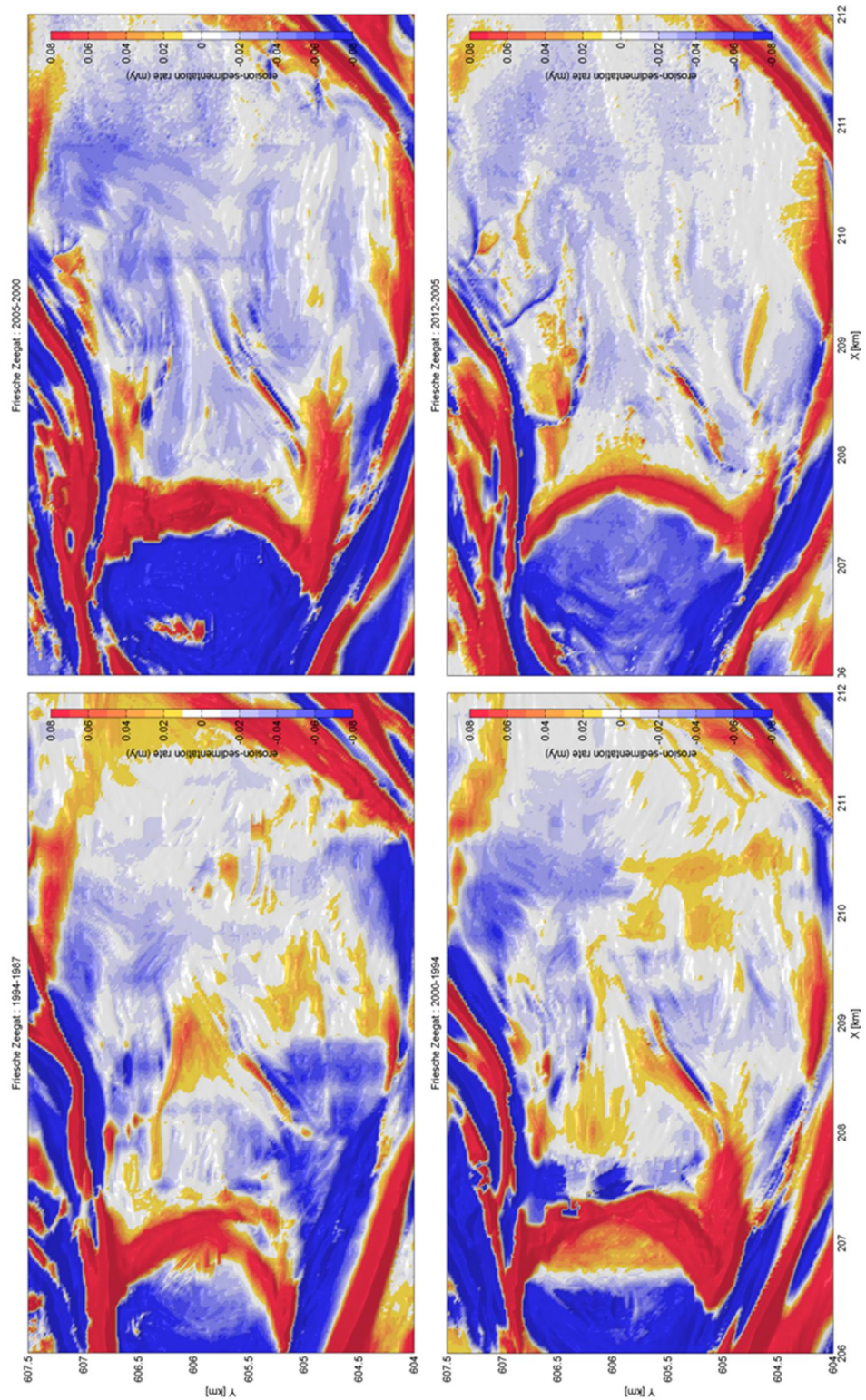
Figuur 2.15 Sedimentatie (positief) en erosie (negatief) in m tussen opeenvolgende lidar opnames (NAM en RWS) voor bodempunten met een hoogte boven -0.50 m NAP (kleurenschema begrenst op $+0.10$ en -0.10 m).



Figuur 2.16 Snelheid van sedimentatie (positief) en erosie (negatief) in m/jaar voor het gehele bekken op basis van de vaklodingen (boven) voor de periode 2005-2012 en voor de lidar opnames (onder) over de periode 2010-2012.



Figuur 2.17 Gemeten sedimentatie-erosiesnelheden (m/jaar) gebaseerd op de vaklodingen over de periode 1987-2012.



Figuur 2.18 Detailopname van de gemeten sedimentatie-erosiesnelheden (m/jaar) gebaseerd op de vaklodingen over de periode 1987-2012.

3 Analyse intergetijdengebieden

3.1 Methode van analyse

De analyse van de intergetijdengebieden is gebaseerd op de hypsometrische curven (Figuur 3.2 en Figuur 3.3) en het histogram gepresenteerd in Figuur 3.4. Het histogram geeft de opbouw van het hoger gelegen deel van een vloedkom verdeeld naar hoogte (zie Cronin en Wang (2012) voor details). Aan de hand van deze histogrammen kunnen de verschillende lidar-metingen met elkaar worden vergeleken.

Een kwestie die aandacht vraagt is verschillen in de gebiedsdekking van de 'ruwe data' (zie ook opmerkingen in paragraaf 2.2). Het gehele bekken wordt iedere keer gemeten maar de exacte locatie van de meetpunten kan iets afwijken van elkaar, dit veroorzaakt een (klein) verschil in dekking. Dit hoeft geen probleem te zijn maar kan mogelijk wel afwijkingen in de hypsometrische curven of histogrammen veroorzaken als datasets met elkaar vergeleken worden. In de verwerking volgens Cronin en Wang (2012) wordt alleen gebruik gemaakt van de werkelijk aanwezige datapunten. Het nadeel hiervan is dat de dekking tussen de metingen kan verschillen. Significante verschillen in dekking zouden (in theorie) de uitkomsten kunnen beïnvloeden, maar voor deze datasets is dit niet het geval. In deze studie hebben we gebruik gemaakt van de ruimtelijk geïnterpoleerde data zoals weergegeven in Figuur 2.8. Deze geïnterpoleerde data bevat in alle datasets een identieke dekking in de Pinkegat en Zoutkamperlaag deelgebieden. Het voordeel van deze methode is dat altijd een optimale dekking van de meetdata wordt verkregen. Wel wordt er hierbij impliciet vanuit gegaan dat interpolatie van de omliggende punten een voldoende nauwkeurige beschrijving van de missende data geeft.

Een vergelijking van de hypsometrische curven gebaseerd op de twee verwerkingsmethoden (zie Cronin en Wang, (2012 en Figuur 3.2 tot en met Figuur 3.3) geven een identiek beeld. Dit betekent dat (1) beide methoden gerechtvaardigd zijn voor de analyse en (2) zowel interpolatie als het ontbreken van datapunten lijken de resultaten niet significant te beïnvloeden. Een verklaring hiervoor is dat in de Waddenzee de hoogteverschillen over het algemeen geleidelijk variëren. De aanwezige datapunten geven een voldoende dekking om de tussenliggende waarden te interpoleren. Dit geldt waarschijnlijk niet voor de plaat-geul rand, maar deze wordt niet in de analyse meegenomen door de afbreekwaarde van -0,50 m.

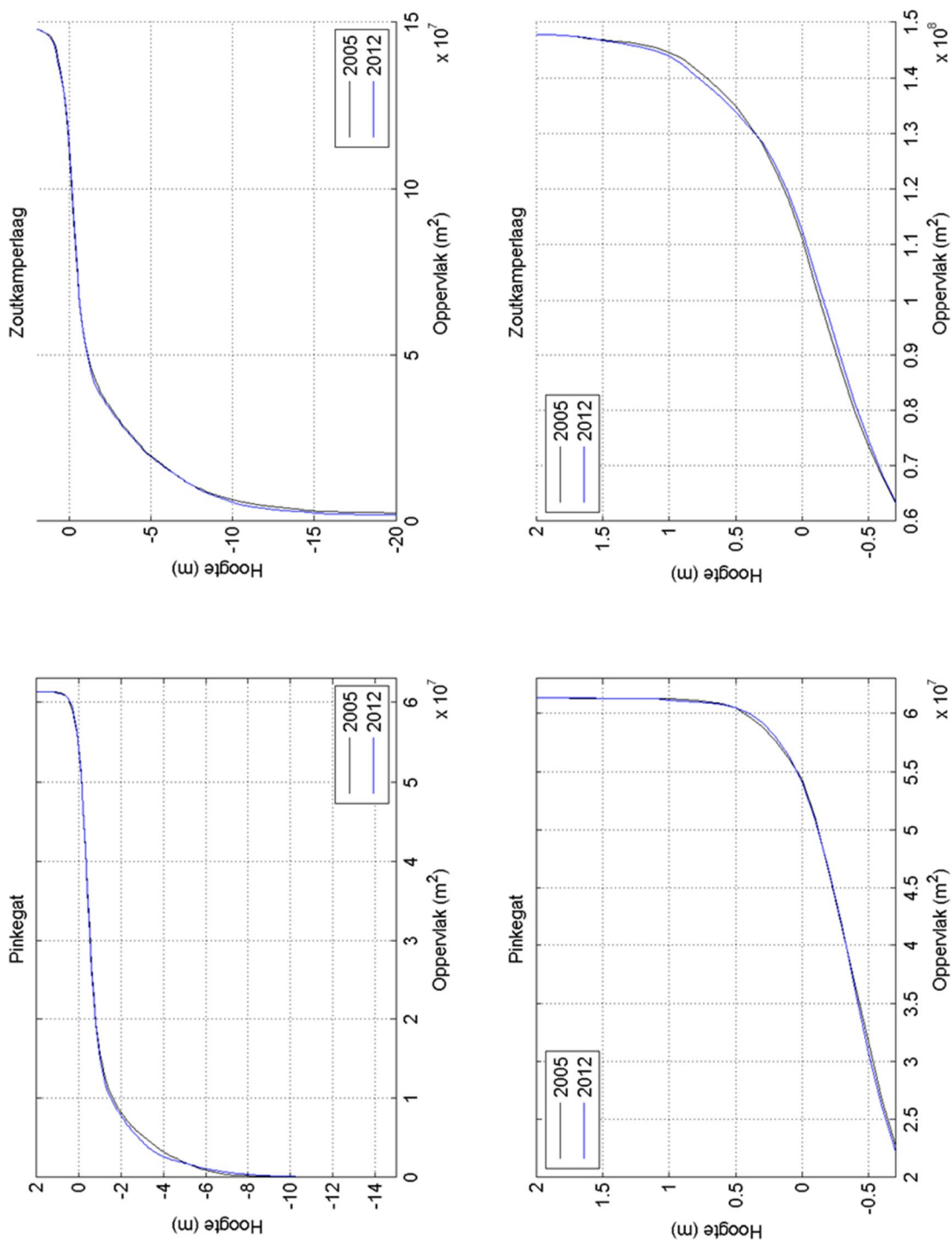
3.2 Resultaten

Figuur 3.2 en Figuur 3.3 geven een beeld van de hypsometrische curven berekend op basis van de vier gebiedsdekkende lidaropnames. De 'errorbars' geven een indicatie van de foutmarges (systematische fout zoals gegeven door Fugro). Wat direct opvalt in de hypsometrische curven is de ligging van de 2012 voorjaarsmeting. Deze ligt duidelijk onder de andere waarden. Zoals eerder vermeld is deze meting aangeleverd door Rijkswaterstaat, waarbij de methode van opname en verwerking afwijkt van de NAM lidar data. Alhoewel, deze afwijking binnen de foutenmarge ligt, geeft dit voor het cumulatieve oppervlakte wel een duidelijke afwijking. Het is daarom aan te bevelen alleen data met zelfde inwinning en verwerkingstechniek met elkaar te vergelijken.

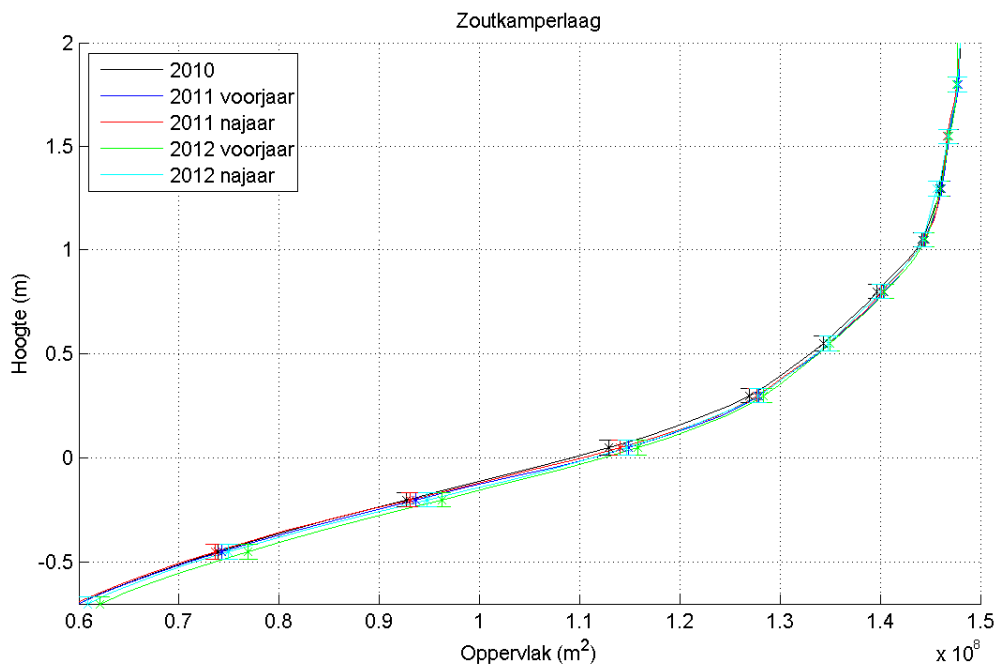
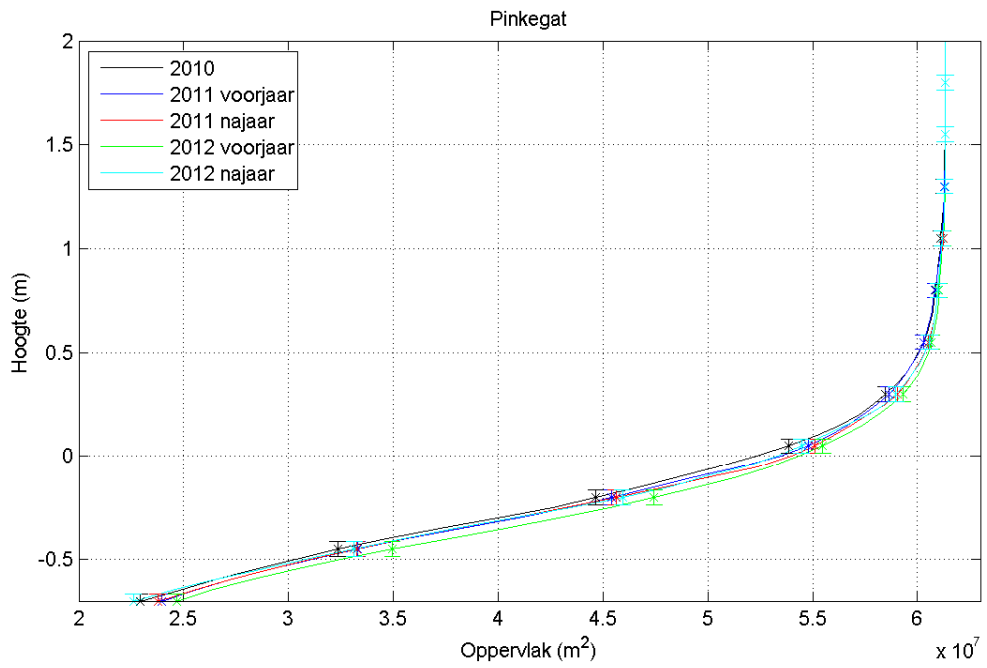
Vergelijking van de NAM metingen, laat een trend van verlaging zien van de wadplaten t.o.v. het jaar 2010. Alle data liggen onder de 2010 curve. De 2012 najaarsmeting heeft wel een tegenovergestelde trend t.o.v. de 2011 metingen. In 2012 is er hoofdzakelijk een toename van plaatoppervlak, maar deze meting ligt vrijwel overal binnen de twee curven van de 2011 metingen. Alleen in Zoutkamperlaag zien we een doorgaande daling van de waarden beneden de 0m NAP. Deze observaties bevestigen de conclusies van Cronin en Wang (2012). Deze auteurs concluderen dat de veranderingen in beide vloedkommen in de periode tussen resp. voorjaar 2010 en najaar 2011 en voor- en najaar 2011 erg klein zijn. Dit betekent dat hierdoor niet te concluderen valt of deze verschillen werkelijke morfologische veranderingen dan wel meetruis zijn. De aanvullende 2012 meting, welke vrijwel op de 2011 metingen ligt, bevestigt deze stelling.

Doordat de lijnen dicht op elkaar liggen zijn de verschillen in de hypsometrische curven moeilijk te onderscheiden. Het histogram gepresenteerd in Figuur 3.4 geeft een duidelijkere weergave van de verschillen. Voor iedere hoogteklaas is het oppervlak weergegeven. Zowel Pinkegat als Zoutkamperlaag hebben een identieke respons in oppervlakte: er is een verschil in trend in het areaal boven en onder de 0m NAP. In het diepere profiel (klasse: -0,5 en -0,3) zien we een toename van plaatoppervlakte door de tijd. Rond -0.1 m NAP zien we een kentering. Na een initiële toename in de periode 2010-2011, is er afname over de periode 2011-2012. Alle klassen boven de 0m NAP vertonen een afname in oppervlakte t.o.v. de 2010 bodem. In Zoutkamperlaag vertonen de hoogste klassen (1,3m en 1,5m) een toename in de 2012 oppervlakte.

Ter referentie zijn ook voor de Rijkswaterstaat lidar data van 2005 en 2012 de hypsometrische curven bepaald (Figuur 3.1). 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 0m NAP en een afname hieronder.

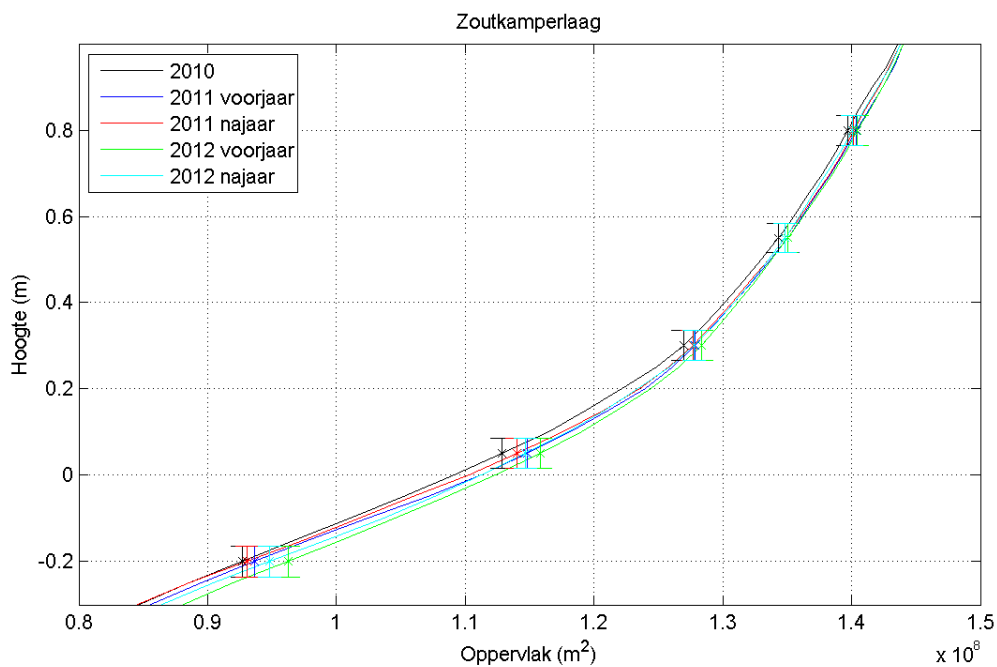
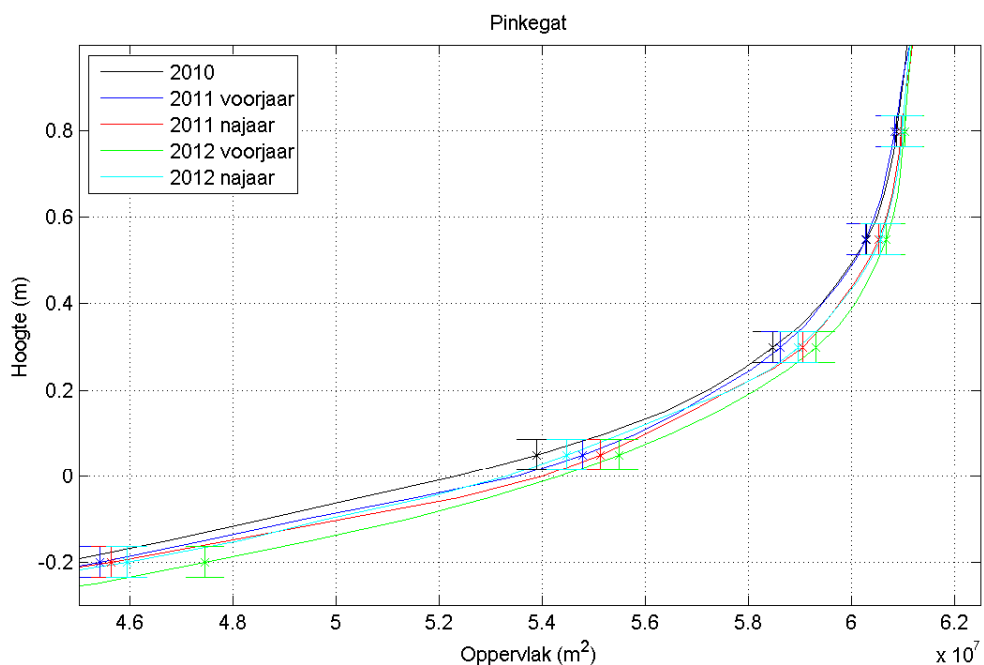


Figuur 3.1 Hypsometrische curven gebaseerd op de Rijkswaterstaat Vaklodgingen voor de jaren 2005/2006 en 2012.



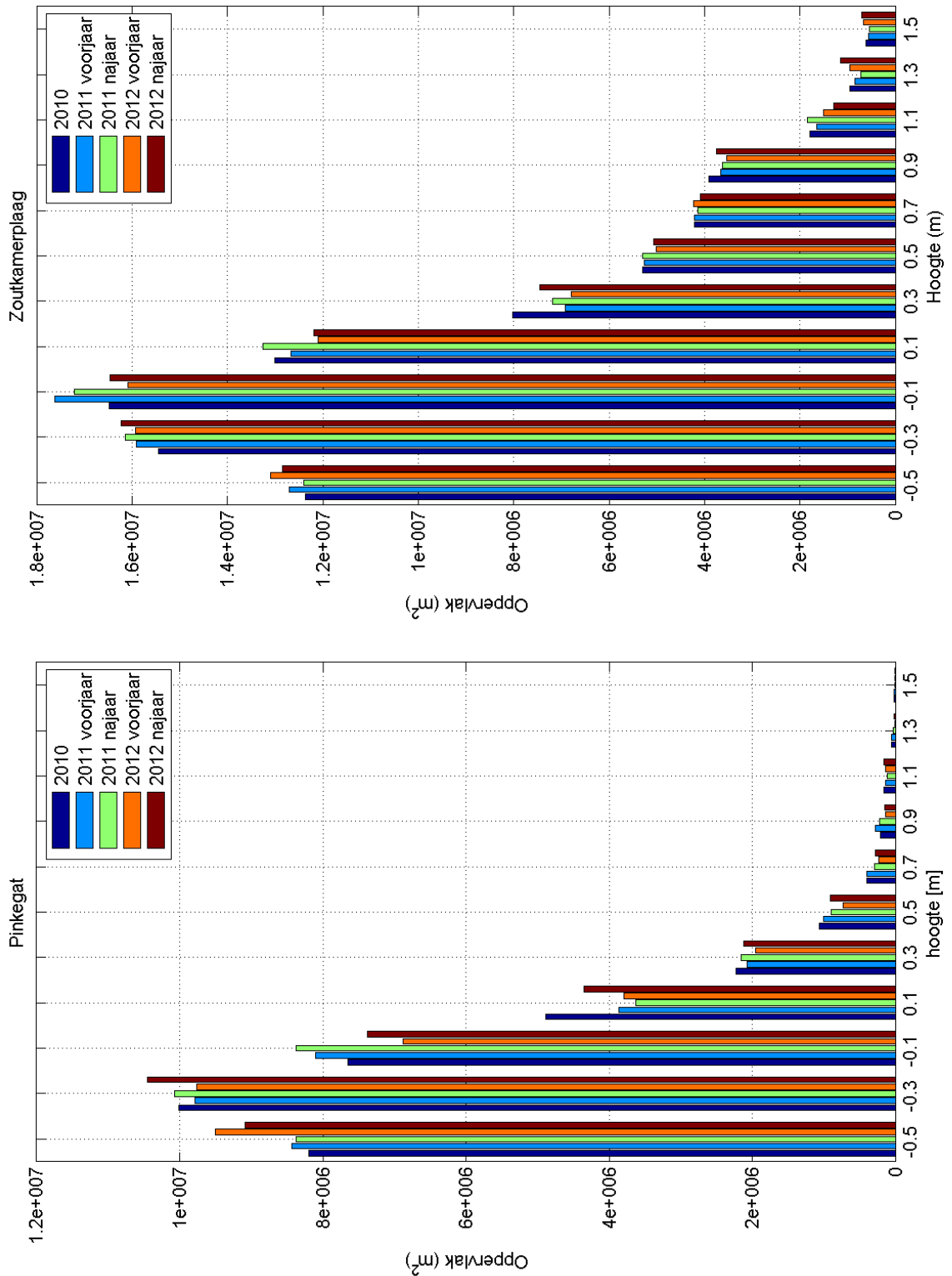
Deltares (11:21:42 on Sun 7th Apr 2013)

Figuur 3.2 Hypsometrische curven voor voorjaar 2010, voorjaar 2011, najaar 2011, voorjaar 2012 en najaar 2012.



Deltares (11:21:44 on Sun 7th Apr 2013)

Figuur 3.3 Detail weergave van de hypsometrische curven voor voorjaar 2010, voorjaar 2011, najaar 2011, voorjaar 2012 en najaar 2012.



Figuur 3.4 Histogrammen van het oppervlak van de verschillende hoogteklassen voor Pinkegat en Zoutkamerplaaig. De oppervlakte is per hoogteinterval van 0,2 m bepaald. De aanduiding -0,5 op de horizontale as geeft het interval -0,60 tot -0,40 m NAP weer.

3.3 Beschouwing over de nauwkeurigheid en toepasbaarheid van de data

Een beschouwing over de nauwkeurigheid van de lidar-metingen is al gedaan door Wang e.a. (2010) op basis van de specificaties door Fugro (2010). Samengevat zijn de volgende conclusies getrokken uit die beschouwing:

- De fout in de bodemhoogte op een 20 m x 20 m grid, bepaald op basis van de specificaties van Fugro (2010), is 3,5 cm.
- De fout in het bodemhoogteverschil bepaald aan de hand van lidar-metingen en de vaklodingen van 2006, is 5 cm ($=\sqrt{2 \times 3.5}$).

Na een nadere analyse heeft Fugro (2010; 2011a; 2011b; 2012) de specificaties van de theoretische nauwkeurigheden van de drie lidar-opnames gegeven als volgt:

Tabel 3.1 Theoretische foutspecificaties volgens FUGRO

Lidar opname	Fout in hoogte van puntmeting (cm)		
	Systematisch	Stochastisch	Totaal
Voorjaar 2010	3,5	2,7	6,2
Voorjaar 2011	3,5	2,7	6,2
Najaar 2011	3,5	2,7	6,2
Najaar 2012	3,5	2,7	6,2

Zoals samengevat in bovenstaande tabel is ook in 2012 de theoretische nauwkeurigheid 6,2 cm. Deze is identiek aan de vermelde nauwkeurigheid van de eerdere opnames. De vraag is of deze theoretische fout representatief is voor de metingen in het interessegebied. Ook het opnamerapport (Fugro, 2012) geeft hierover geen duidelijkheid. Wel worden ter verificatie van de theoretische fout 2 aanvullende analyses beschreven. Ten eerste wordt de Lidar vergeleken met een aantal vaste punten. Op basis van dit vergelijk concludeert Fugro dat de data voldoet aan het criteria dat 68,3% van de data een kleinere fout heeft dan 6,2 cm. Hierbij moet wel opgemerkt worden dat deze punten niet binnen het interesse gebied liggen, maar aan de randen. De vraag blijft of verificatie aan de hand van harde punten (bebouwing, wegen enz.) representatief is voor de plaatoppervlakte. Een tweede verificatie is gebaseerd op 2 controle lijnen gevlogen loodrecht op de dominante vluchtrichting. Als nauwkeurigheid wordt hier gegeven dat 68,3% van de fout < 10,8 cm. Appendix C laat zien dat de dwars- en langsvaarten een overeenkomstige hoogte geven op de droge platen (de afwijking is kleiner dan de gerapporteerde meetfout).

De werkelijke fouten in de metingen zijn waarschijnlijk groter om de volgende redenen:

- De fout in de gemeten bodemhoogtes lijkt groter dan de specificatie. Een aanwijzing hiervan vormen de streeppatronen in bijvoorbeeld Figuur 2.11. Theoretisch is de fout in het verschil tussen twee metingen kleiner dan 5 cm. Als dat zo zou zijn, dan zouden er geen streeppatronen te zien zijn in deze figuren.
- Ook op de wadplaat (intergetijdegebied) kan water blijven staan bij laag water. Of, en zo ja op welk deel van een plaat een laagje water blijft staan, verschilt van meting tot meting. Bovendien is het zo dat een deel hiervan wel wordt gemeten (met de hoogte van het wateroppervlak) afhankelijk van de weeromstandigheden tijdens de metingen. Met meer wind wordt een groter deel van het gebied gemeten.

4 Conclusies en aanbevelingen

De lidar data verzameld door Fugro in het Friesche Zeegat (Pinkegat en Zoutkamperlaag) in het najaar van 2012 is vergeleken met de data van het voor- en najaar van 2011 en de gegevens van maart 2010.

De belangrijkste conclusies getrokken in Cronin en Wang (2012) worden hieronder herhaald en aangevuld met nieuwe inzichten uit deze analyse:

- Het lijkt niet mogelijk de Rijkswaterstaat en NAM lidar data te combineren. Kleine afwijkingen in hoogte (door andere meetmethode en/of verwerking) welke binnen de meetnauwkeurigheid liggen, leiden tot verschillen in de hypsometrische curven en histogrammen.
- De verschillen tussen de meetresultaten van de vier geanalyseerde lidar-opnames zijn klein t.o.v. de bijbehorende fouten. Daardoor is het (nog) niet te zeggen welk deel van de verschillen door morfologische veranderingen is veroorzaakt.
- Morfologische veranderingen zijn pas vast te stellen als de gemeten veranderingen relatief groot zijn ten opzichte van de meetfouten. Hiervoor is een langere periode van monitoring vereist gegeven het feit dat vele herhalende metingen binnen een korte periode praktisch niet haalbaar zijn.
- In vergelijking tot de recentere opnames, lijkt de 2010 dataset meer 'data uitschieters' te bevatten.
- Voor het in kaart brengen van geulverplaatsing zou een verbeterslag in de Lidar data kunnen worden gemaakt. Door gebruik te maken van foto opnamen gemaakt tijdens de Lidar meting (zie opmerking Fugro, 2012 pagina 30) zou de nat-droog grens kunnen worden vastgesteld. Dit zou de huidige afkapgrens van -0,50 m verfijnen. Voor het bepalen van de morfologische verandering in droog plaatareaal heeft deze bewerking slechts een geringe invloed.

Met betrekking tot de morfologische veranderingen kan het volgende worden geconcludeerd: Zowel uit de afzonderlijke analyse van de NAM lidar als de RWS datasets komen overeenkomstige uitkomsten: De veranderingen over de gemeten periode zijn kleiner dan de meetnauwkeurigheid. De verticale verandering van de platen is 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. De RWS datasets laten duidelijk zien dat de bodemveranderingen sterk gedomineerd worden door geulverplaatsingen.

5 Referenties

- Cronin, K. en Wang, Z.B., 2012, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1204654-000.
- Fugro, 2010, Areal Mapping Survey 2010, Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog, Projectrapportage 501.11624.
- Fugro, 2011a, Areal Mapping Survey 2011, Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog, Projectrapportage 501.11871.
- Fugro, 2011b, FLI-MAP survey for Nederlandse Aardolie Maatschappij, Waddengebied Ameland Autumn 2011, Projectrapportage 501.11871.002.
- Fugro, 2012, FLI-MAP survey for Nederlandse Aardolie Maatschappij, Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog Autumn 2012, Projectrapportage 501.11871.003.
- Wang, Z.B., Cronin, K. en van Ormondt, 2010, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1202285-000.

Appendix A: Hoogtekaarten Rijkswaterstaat 2005 - 2012

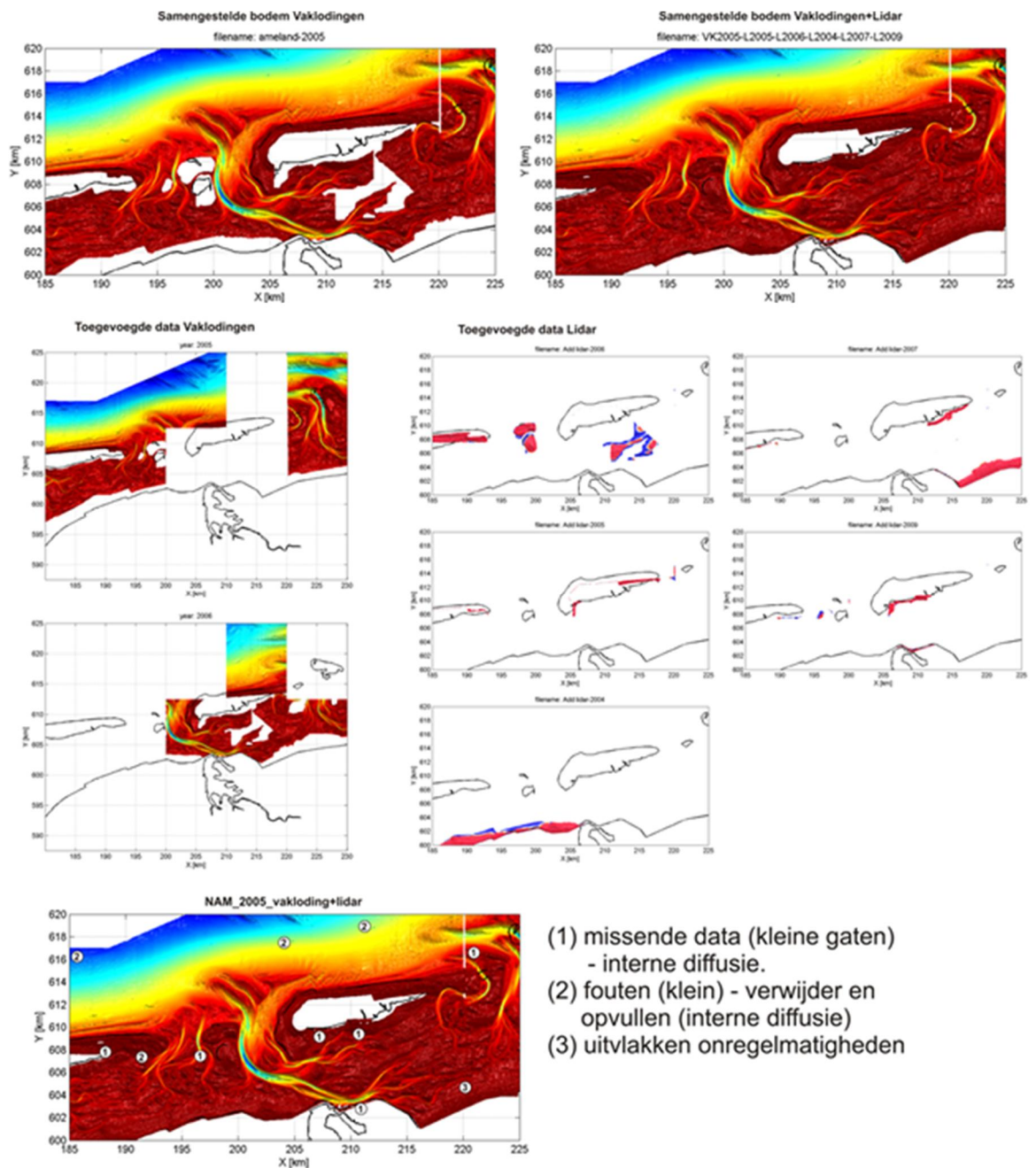
De basis voor de kaarten welke in dit rapport worden gepresenteerd zijn de Vaklodingen datasets van Rijkswaterstaat. Bij Rijkswaterstaat zijn deze beschikbaar via DONAR. Deltares heeft deze data beschikbaar op een OPENDAP server in een NETCDF formaat voor vaklodingen:

<http://dtvirt5.deltares.nl:8080/thredds/dodsC/opendap/rijkswaterstaat/vaklodingen/>

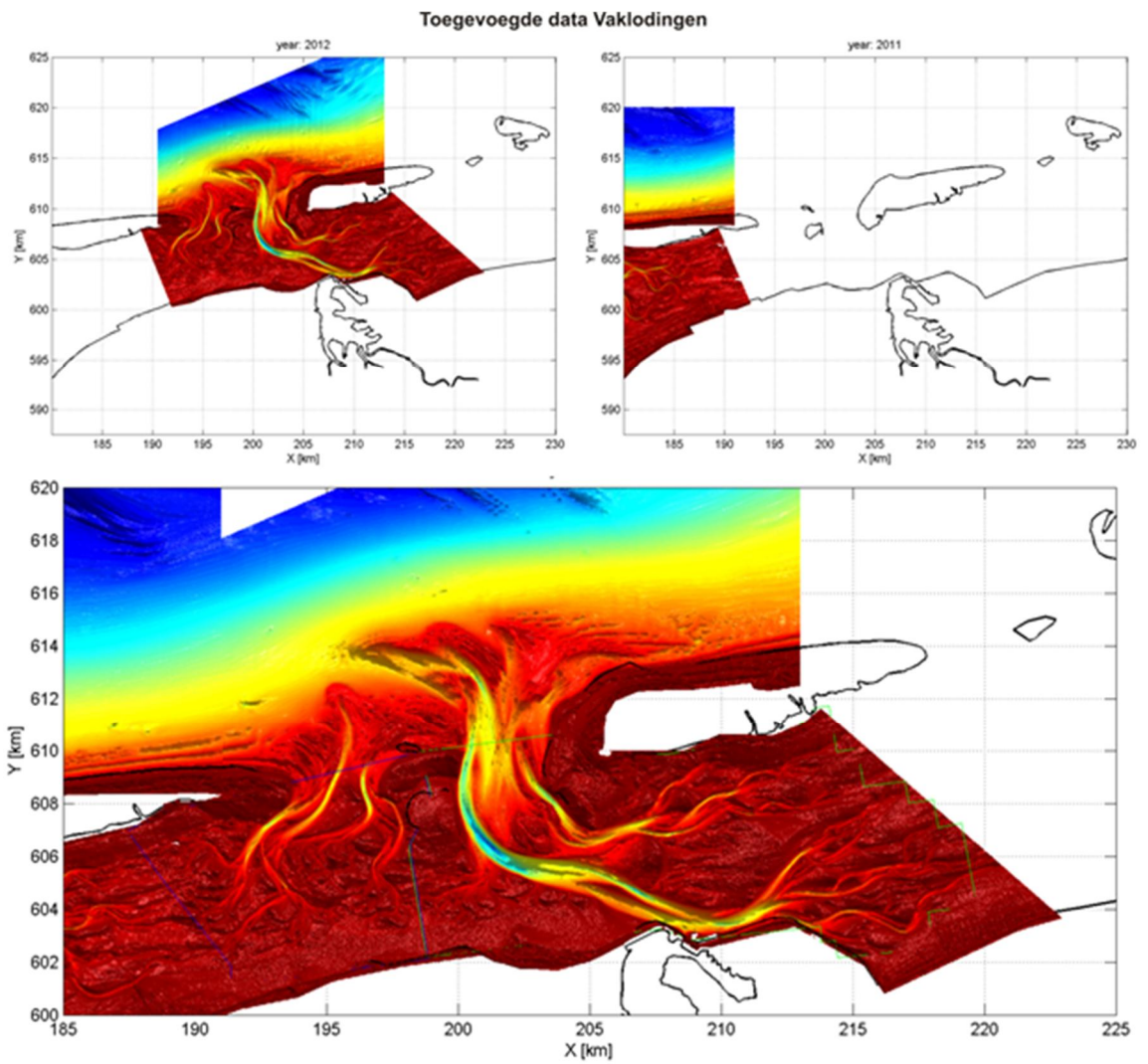
en kusthoogte (lidar) bestanden:

<http://dtvirt5.deltares.nl:8080/thredds/dodsC/opendap/rijkswaterstaat/kusthoogte/>

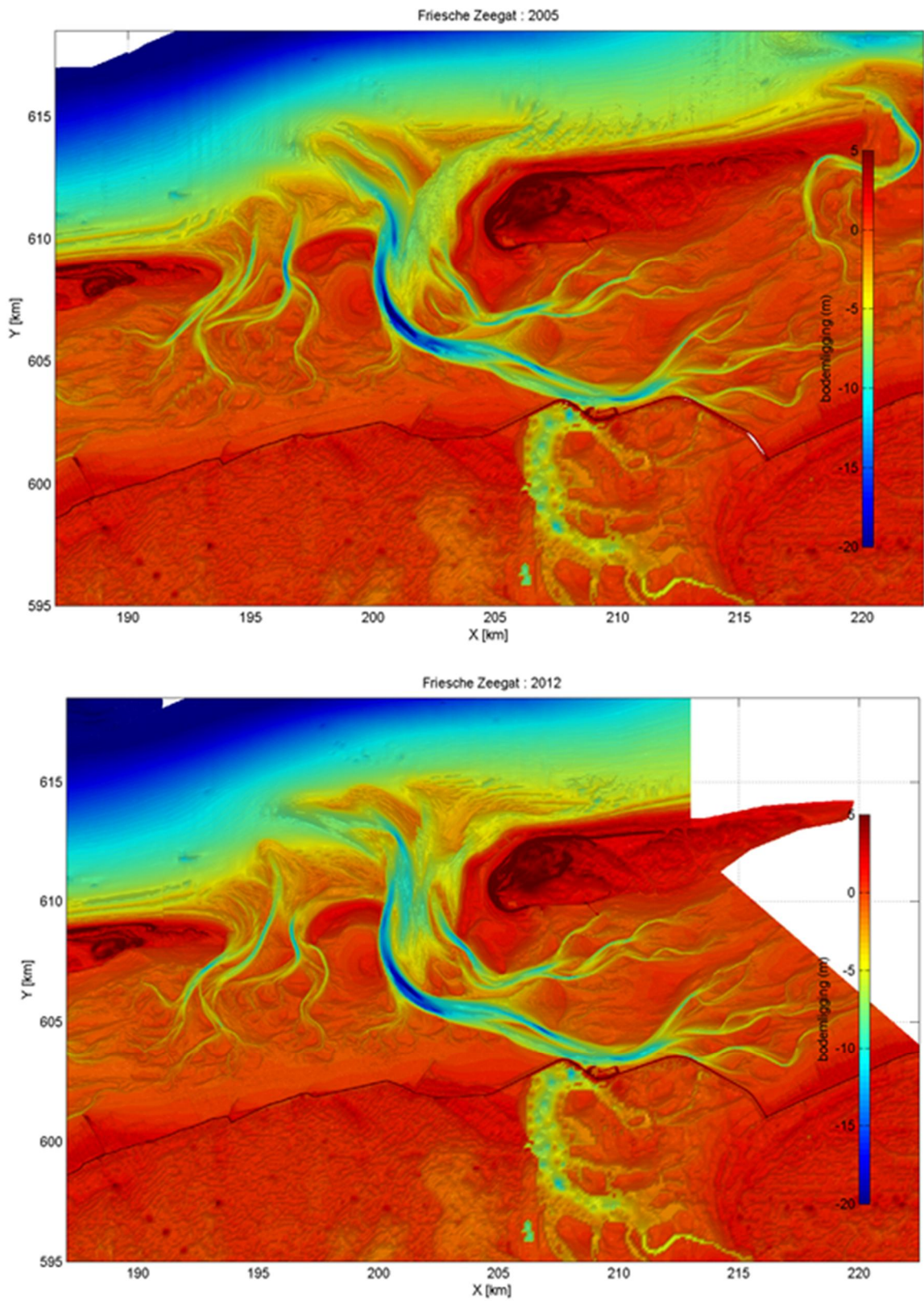
Met behulp van deze data is het mogelijk dekkende kaarten te maken voor de jaren 2005 en 2012. Figuur A-1 en A-2 tonen de gebruikte data en uitgevoerde correcties. Hierbij moet worden opgemerkt dat in de 2005, de kusthoogte bestanden slechts gedeeltelijk in de Vaklodingen verwerkt zijn. Deze bodem is compleet gemaakt door de kusthoogte bestanden toe te voegen. In 2012 zijn de vaklodingen al aangevuld met de kusthoogtebestanden en daardoor bijna gebiedsdekkend.



Figuur A-1: Overzicht gebruikte data voor de representatieve kaart van het jaar 2005.



Figuur A-2: Overzicht gebruikte data voor de representatieve kaart van 2012.

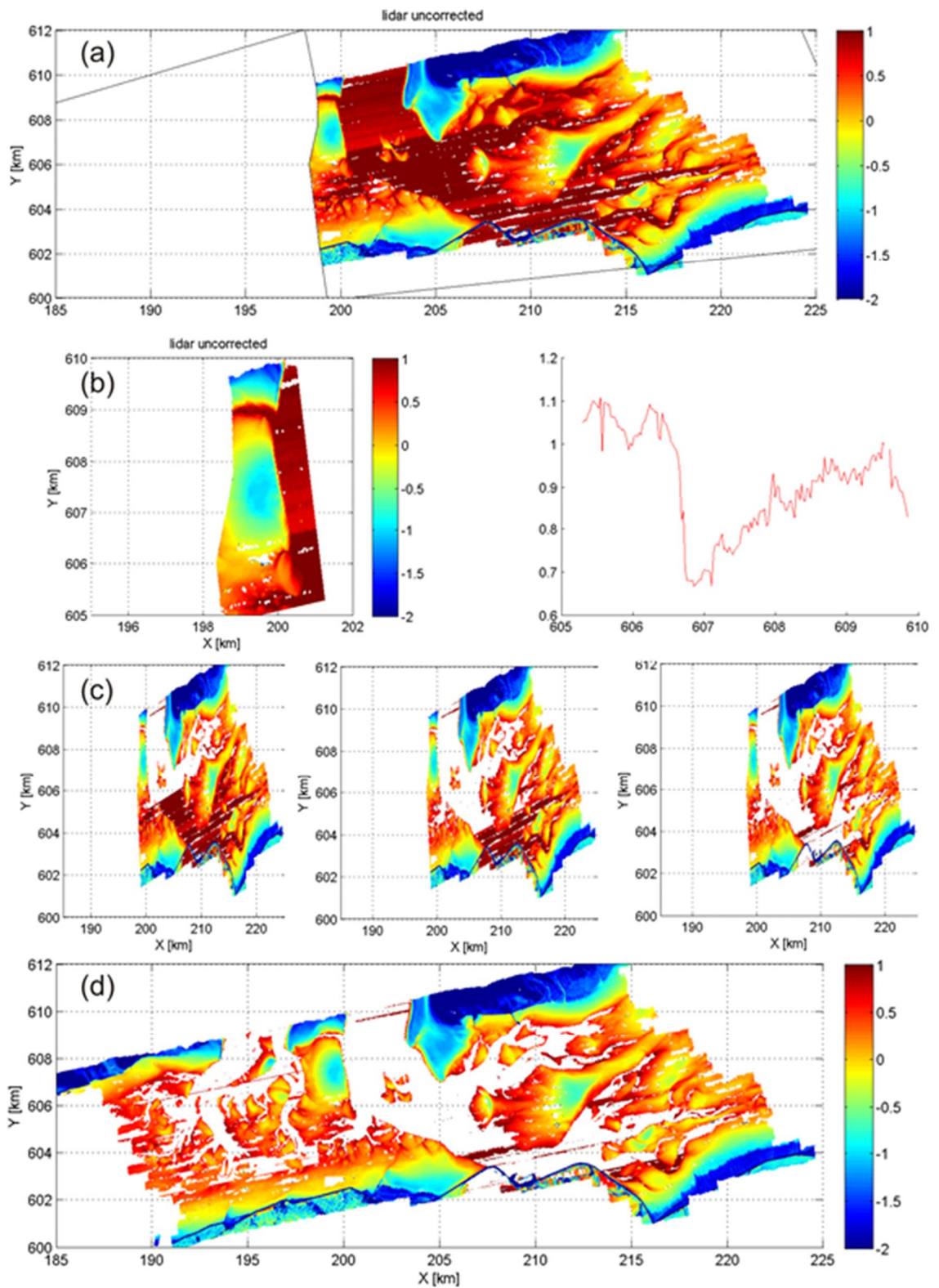


Figuur A-2: Definitieve bodemhoogten voor Friesche Zeegat op basis van 2005 en 2012 bodemdata. Kust en eilanden zijn ingevuld met AHN hoogte bestand.

Appendix B: Voorbeeld handmatige correctie Lidar

In deze Appendix wordt een voorbeeld gegeven van een nabewerking ter correctie van wateroppervlakte in de Lidar data. Figuur 2 geeft een overzicht van de methode (toegepast op de Lidar 2010 opname) welke bestaat uit 5 stappen:

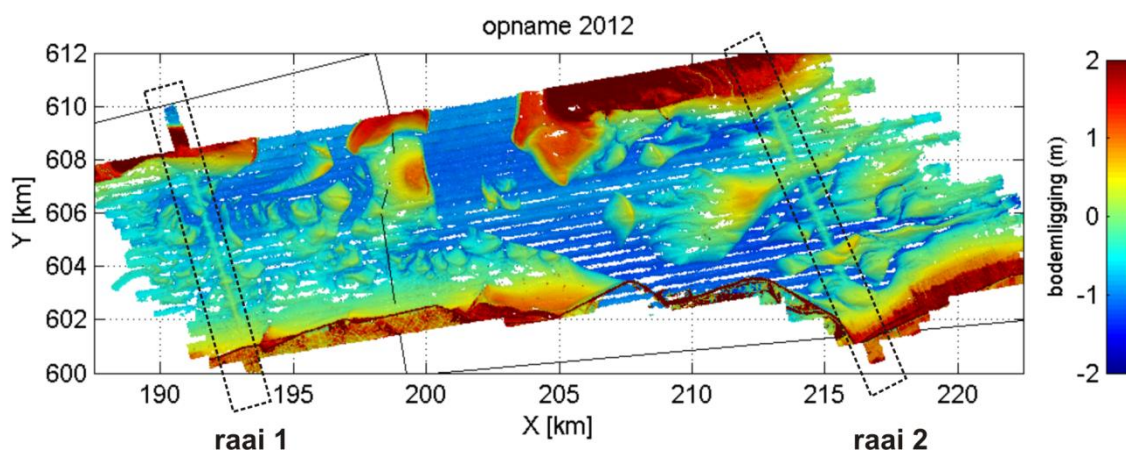
- Deelgebieden zoutkamperlaag en Pinkegat zijn gescheiden (a).
- Door de as van de hoofdgeul wordt een profiel getrokken. Dit profiel staat loodrecht op de lidar banen. (b) geeft een overzicht van zo'n selectie. Parallel aan de lidarbanen wordt nu alle bodemdata per punt gecorrigeerd met de waarde bepaald in het profiel. Hierbij wordt een 0.05m toegevoegd om kleine afwijkingen ook te corrigeren.
- Deze procedure wordt een aantal maal herhaald tot een volledige dekking is verkregen (c).
- Een identiek proces vindt plaats voor Pinkegat. De twee bodems worden vervolgens samengevoegd.
- In stap 5 worden handmatig de overgebleven waarden verwijderd. Dit resulteert in de bodems zoals gepresenteerd in Figuur B-1d.



Figuur B-1: voorbeeld van opschonen van de ruwe (vergridde) lidar data.

Appendix C: Verificatie van de nauwkeurigheid van de 2012 lidar opname

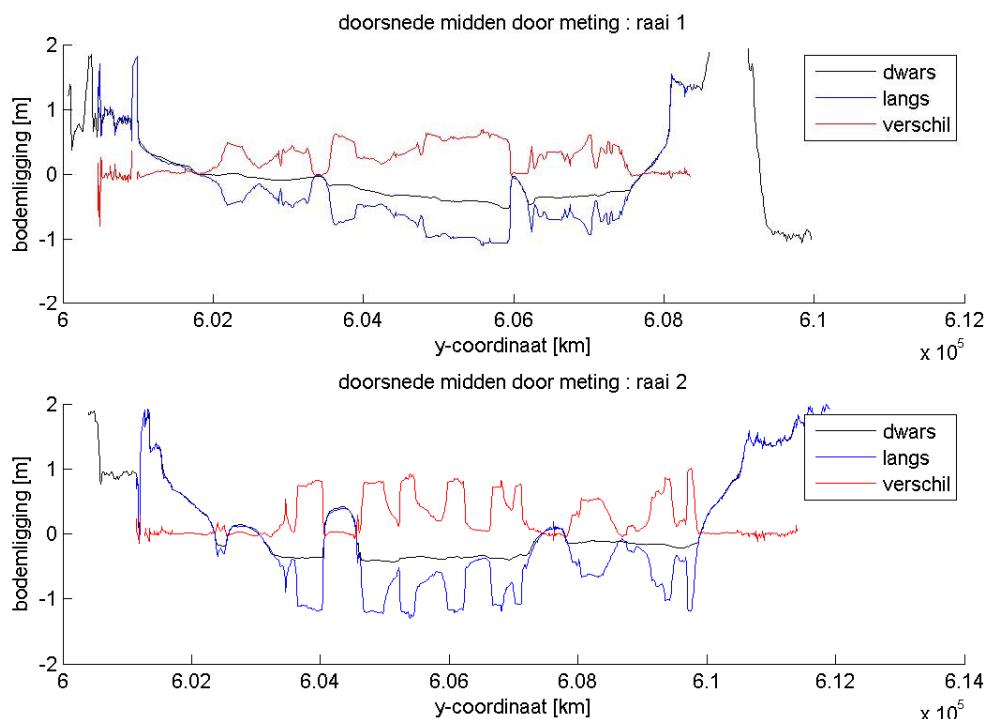
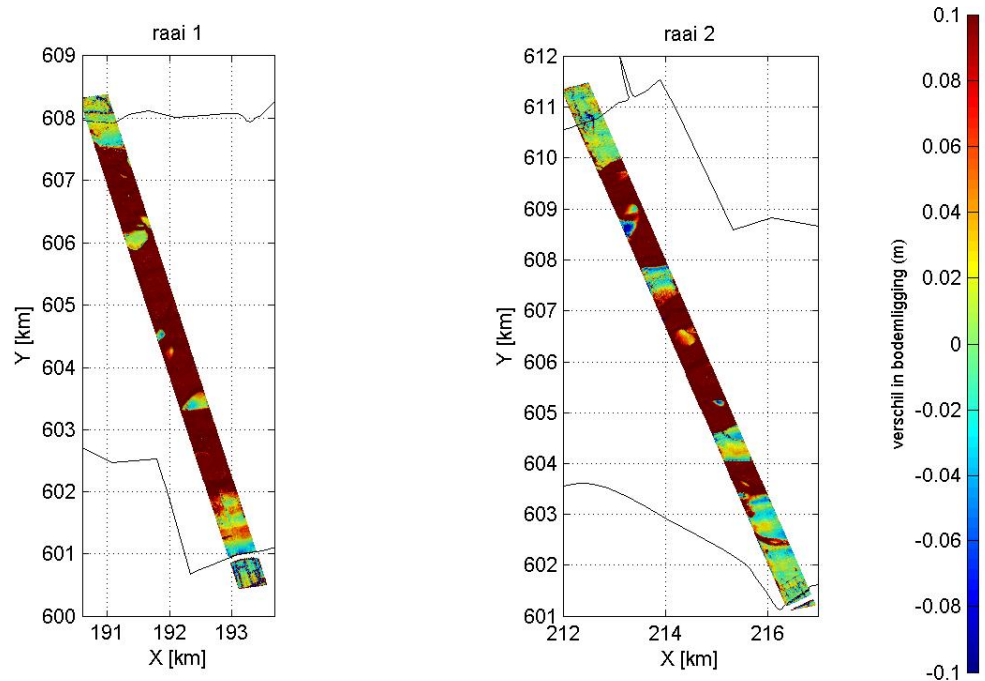
In de 2012 Lidar opname zijn 2 extra controle lijnen gevlogen haaks op de vluchtbanen (zie raai 1 en raai 2 in Figuur C-1).



Figuur C-1: Overzicht van alle meetdata van de 2012 lidar opname. Raai 1 en raai 2 geven de locatie van de controle lijnen.

Binnen de 2012 dataset zijn de afzonderlijke datasets beschikbaar gemaakt voor de oost-west vluchtbanen (langsrichting) en de noord-zuid controle lijnen (zie raai1 en raai2). Ter plaatse van raai1 en raai2 is een lokaal grid geconstrueerd en is voor beide datasets de bodemligging op identieke wijze vergrid. Figuur C-2 (boven) geeft het berekende verschil in bodemligging op basis van deze grids. De onderste 2 figuren geven een doorsnede door het midden van dit grid. De data uit de langsvluchten is weergegeven door de blauwe lijn, de dwarsvluchten door de zwarte lijn en het verschil is de rode lijn. Uit dit figuur kan het volgende worden geconcludeerd:

- De controle vluchten zijn tijdens een hoge waterstand opgenomen. Vooral in de profielen (Figuur C-2 onder) is duidelijk te zien dat de dwarsraai een hoge ligging heeft. Dit representeert het water oppervlak.
- Binnen het bekken zijn er slechts een gering aantal punten waar in beide metingen droog plaatoppervlak gemeten is. Het verschil in hoogteligging ter plaatse van deze punten is kleiner dan de gespecificeerde foutenmarge van 3.5 cm.



Deltares (11:51:38 on Fri 5th Apr 2013)

Deltares (11:51:38 on Fri 5th Apr 2013)

Figuur C-2: Vergelijking van de gemeten bodemhoogte verschillen tussen de dwars- en langsdata in de 2 controleraaien (boven) en een dwarsdoorsnede door het midden van controleraai 1 (midden) en controleraai 2 (onder).