

Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning



Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning

Katherine Cronin
Zheng Bing Wang

1204654-000

Titel
Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat

Opdrachtgever	Project	Pagina's
NAM	1204654-000	26

Trefwoorden
Lidar data, Waddenzee, Bodemdaling, Intergetijdegebied

Samenvatting

De bodemliggingsgegevens van het Friesche Zeegat (Pinkegat en Zoutkamperlaag) welke door Fugro verzameld zijn met behulp van lidar metingen in voor- en najaar 2011 zijn geanalyseerd en vergeleken met de gegevens van maart 2010. De volgende conclusies zijn getrokken uit de analyse:

- Het lijkt erop dat de theoretische nauwkeurigheid niet wordt gehaald.
- De weeromstandigheden tijdens de metingen hebben invloed op de nauwkeurigheden van de meetresultaten.
- De verschillen tussen de meetresultaten uit de drie 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.
- Een interval van voldoende lengte tussen waarnemingen is vereist voor het identificeren van een mogelijke trend en/of verandering in de trend van ontwikkelingen.
- Frequenter meten helpt vooral om een eventuele trend nauwkeuriger te bepalen, maar leidt niet tot het eerder vaststellen van een trend.

Referenties

Opdracht Nam aan Deltares met PO nummer 4510931081

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
	April. 2012	Katherine Cronin	<i>RC</i>	Ad van der Spek	<i>AB</i>	Johan Boon	<i>[Signature]</i>

Status
definitief

Inhoud

1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Doelstelling van de analyse	1
1.3 Aanpak van de analyse	1
2 Verwerking van de data	2
2.1 Ingewonnen data	2
2.2 Verwerking van de lidar data	7
2.3 Morfologische veranderingen	9
3 Analyse intergetijdengebieden	15
3.1 Methode van analyse	15
3.2 Resultaten	17
3.3 Beschouwing over de nauwkeurigheid	23
4 Conclusies en aanbevelingen	25
4.1 Samenvatting van de conclusies	25
5 Referenties	26

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 maart 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 e.a., 2010). In 2011 zijn twee lidar opnames uitgevoerd, één in het voorjaar en één in het najaar. Dit rapport beschrijft de analyse van de data van deze lidar opnames.

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

Voor de verwerking van de lidar data is dezelfde methode gehanteerd zoals gebruikt bij het analyseren van de pilot lidar opname in 2010. 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. De waargenomen veranderingen worden vergeleken met de bekende historische ontwikkelingen. De onzekerheden in de gemeten veranderingen worden ook beschouwd.

2 Verwerking van de data

2.1 Ingewonnen data

Behalve de lidar data zijn ook waterstandsgegevens van de getijstations Nes (Ameland) en Schiermonnikoog en reeds beschikbare bodemliggingsgegevens verzameld en gebruikt bij de analyse.

Lidar data

Lidar (LIght Detection And Ranging) is een technologie die de afstand tot een object of oppervlak bepaald 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 drie opnames gemaakt: in het voorjaar van 2010 en in het voorjaar en najaar van 2011.

De metingen in het voorjaar van 2010 zijn uitgevoerd tijdens laagwater op 25, 26 en 28 maart 2010, in het voorjaar van 2011 op 14, 15 en 16 april 2011 en in het najaar van 2011 op 24 tot en met 27 september 2011.

Figuur 2.1-2.3 geeft aan op welke dag welke gebieden gemeten zijn. Een gedetailleerde beschrijving van de uitvoering van de metingen en de verwerking van de data voor elke opname zijn gegeven door Fugro (2010, 2011a, 2011b).

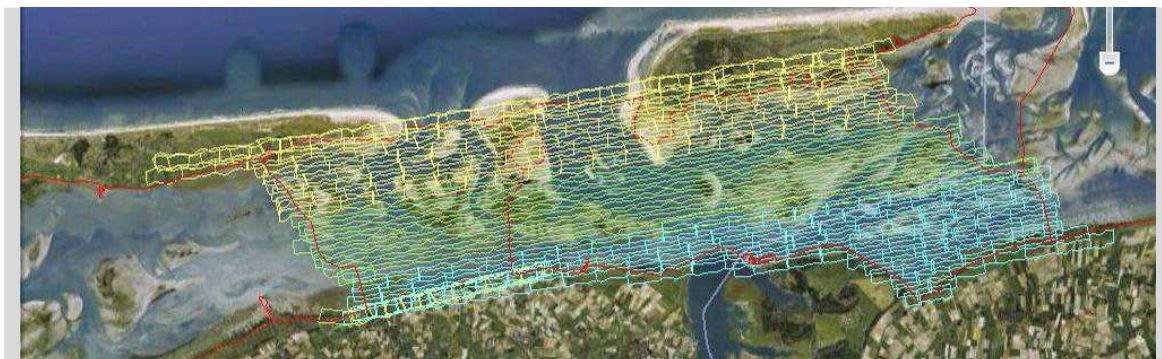


Fig.2.1 Lidar data inwinning, gebieddekking en vluchtschema: Geel: 25-03-2010, 09:05-13:08; Groen: 26-03-2010, 10:41-14:08; Blauw: 28-03-2010, 14:27-16:50. Bron: Fugro (2010).

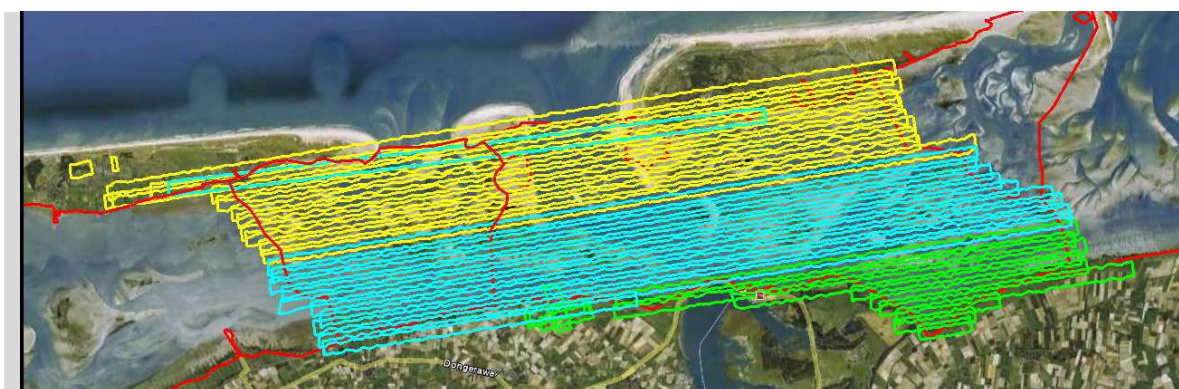


Fig.2.2 Lidar data inwinning, gebieddekking en vluchtschema: Geel: 14-04-2011; Blauw: 15-04-2011; Groen: 16-04-2011. Bron: Fugro (2011a).

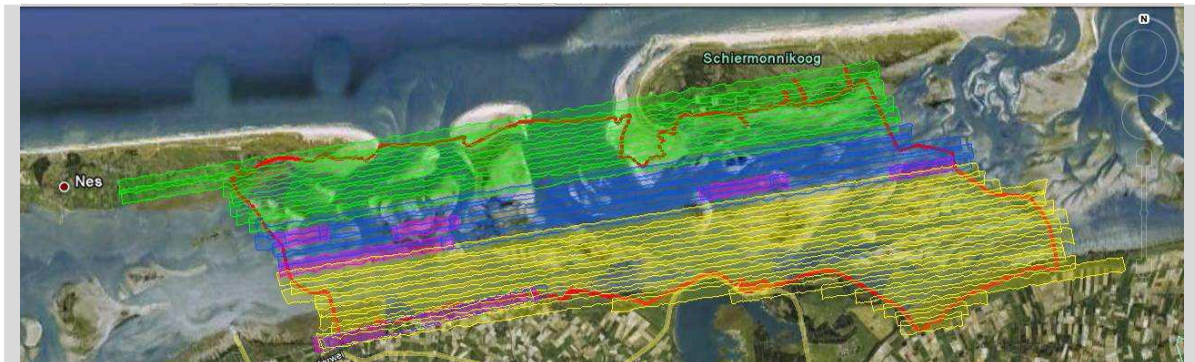


Fig.2.3 Lidar data inwinning, gebieddekking en vluchtschema: Geel: 25-09-2011, Groen: 24-09-2011; Blauw: 26-09-2011, Paars: 27-09-2011 Fugro (2011b).

De weeromstandigheden tijdens de metingen in voorjaar 2011 waren beter dan die tijdens de metingen in voorjaar 2010. Er was veel minder wind tijdens de metingen in voorjaar 2011. Daardoor waren er veel minder golven met als gevolg dat het wateroppervlak minder reflectie gaf maar ook boven de zandbanken, als gevolg van achterblijvend water. Gedurende de eerste twee dagen (24 en 25 september) van de metingen in najaar 2011 was het perfect meetweer. 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 Fig.2.3).

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 heeft 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, 2011b).

De data van de twee metingen in 2011 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. De fout in de bodemhoogtes gemeten in 2011 wordt geschat op ongeveer 6.2 cm (Fugro, 2011b).

Waterstanden

De waterstanden bij getijstations Nes en Schiermonnikoog op de meetdagen in maart 2010 en april en september 2011 zijn weergegeven in Fig. 2.4 t/m Fig. 2.6. Het is belangrijk om te weten 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.

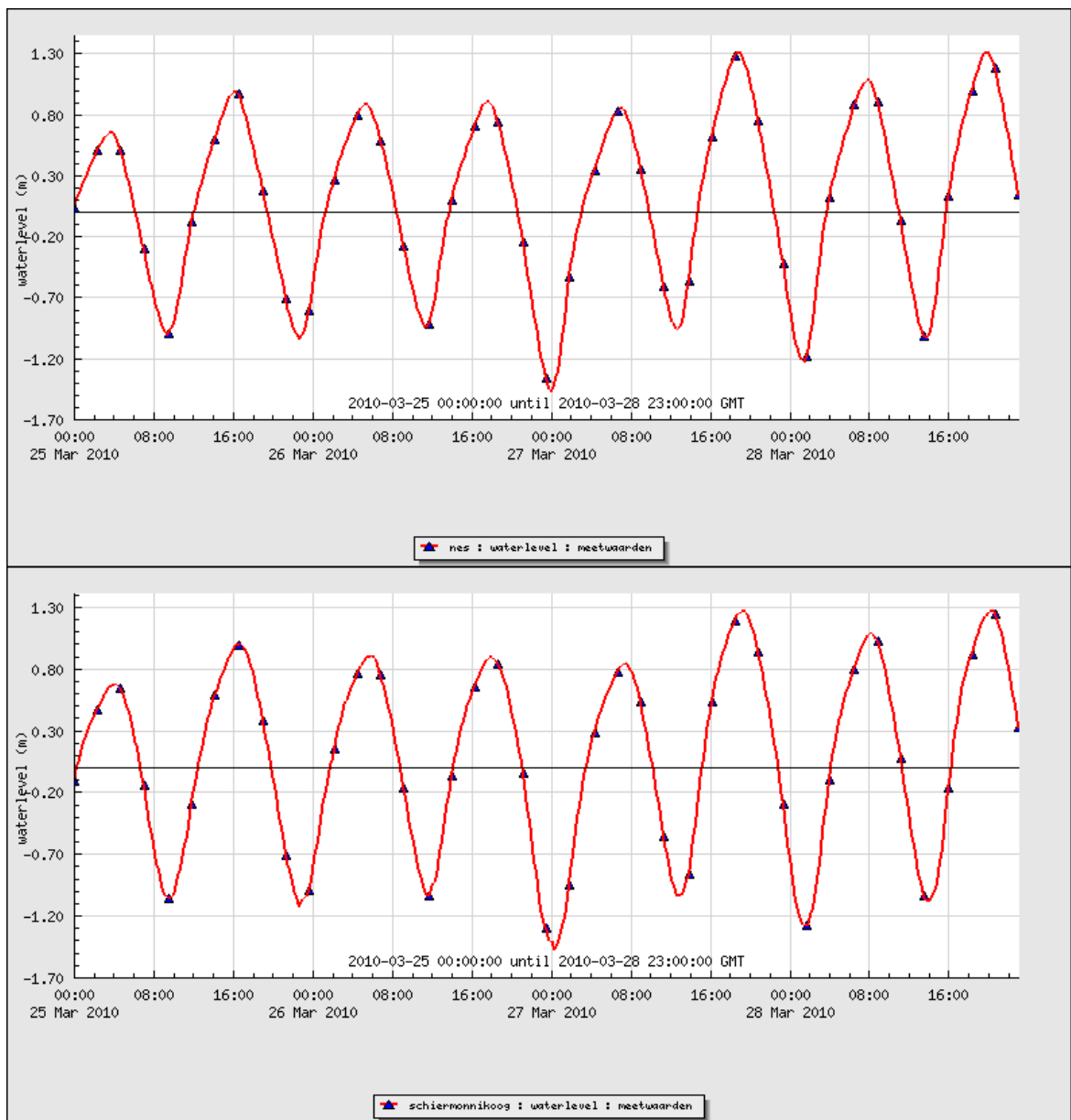


Fig.2.4 Waterstanden bij Nes (boven) en Schiermonnikoog (onder), op 26 - 28 maart, 2010.

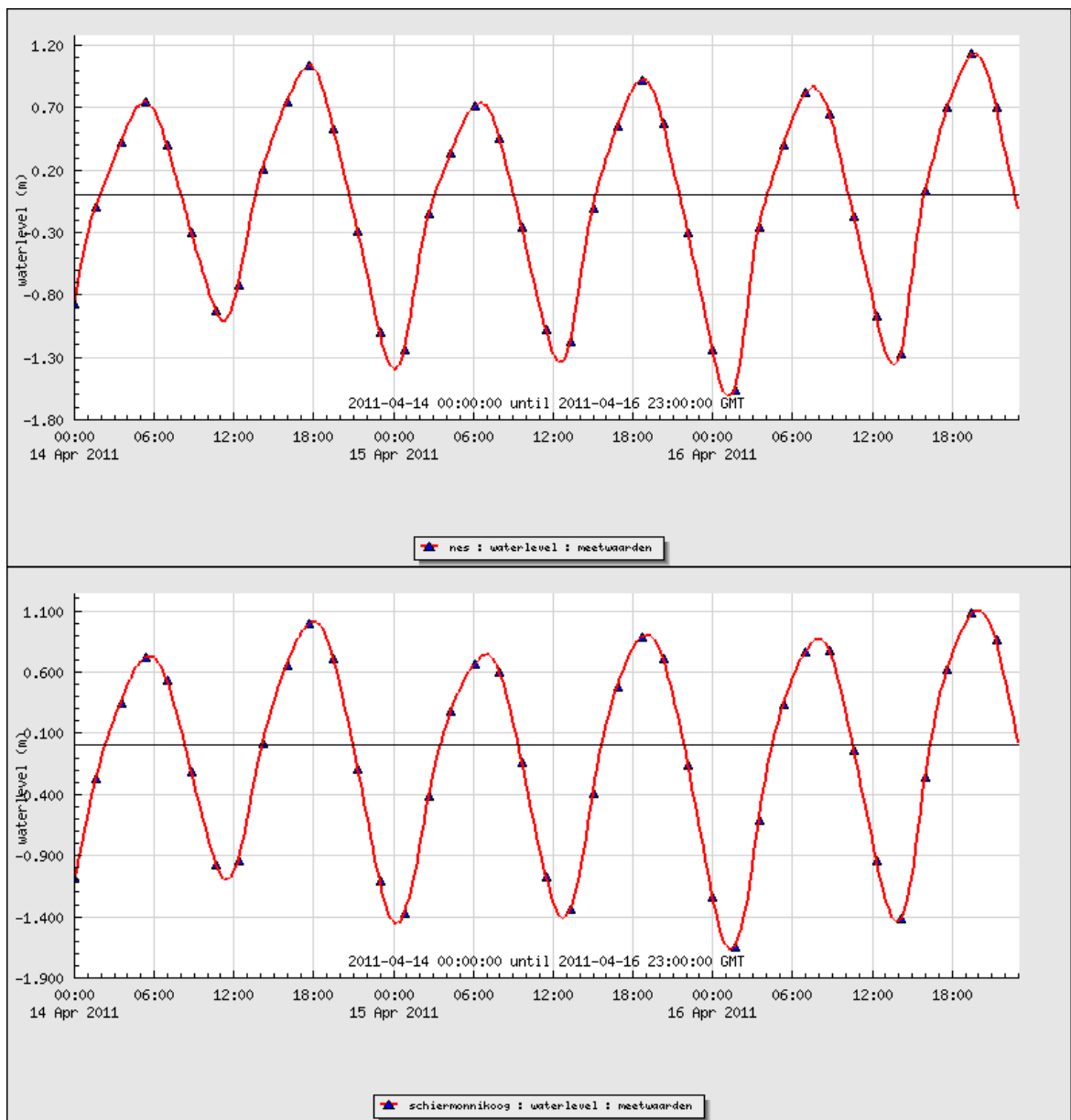


Fig.2.5 Waterstanden bij Nes (boven) en Schiermonnikoog (onder), op 14 - 17 april, 2011.

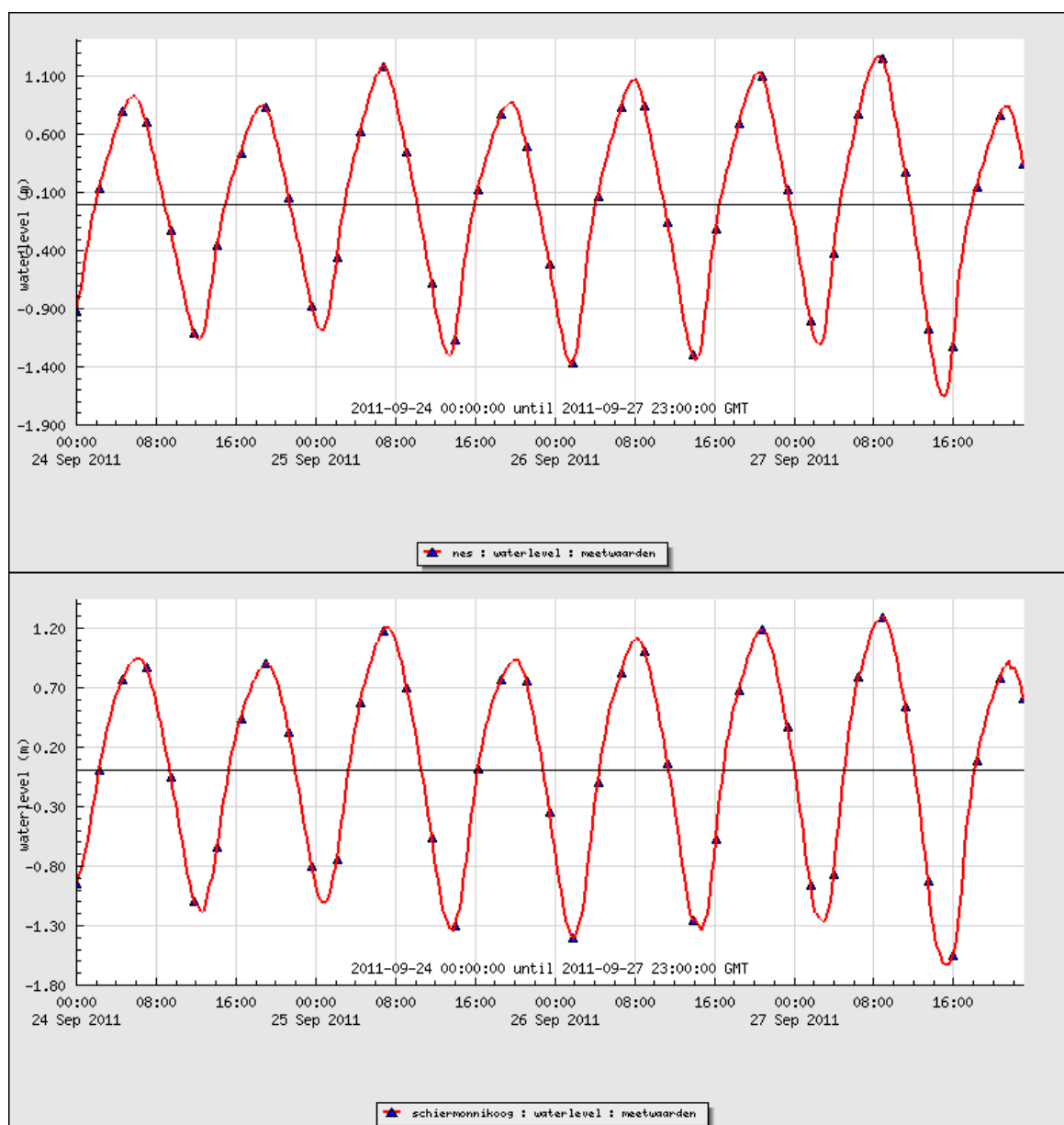


Fig.2.6 Waterstanden bij Nes (boven) en Schiermonnikoog (onder), op 24 - 27 september, 2011.

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 uit 2006. Deze vaklodingen dekken niet het hele gebied, zie Fig. 2.7, daarom zijn er verschillen tussen de 2010 gebiedsberekening in dit rapport en Wang, (2010). Bovendien waren de polygonen van de vloedkommen anders gedefinieerd. Loding metingen van 2006, aangevuld met lidar data is beschikbaar (Fig.2.8), maar hier is te zien dat het aangevulde gedeelte niet helemaal goed (Fig. 2.19) op de vaklodingen aansluit (sprongen bij de grenzen). Derhalve kunnen deze gegevens niet worden gebruikt in verdere analyses.

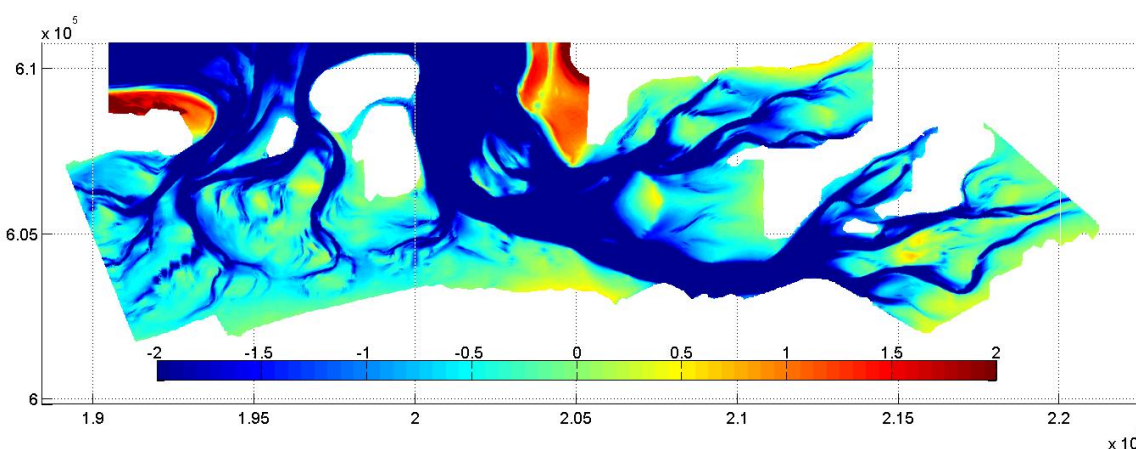


Fig.2.7 Visualiseren van de 2006 vakkloedingen op 20 m grid.

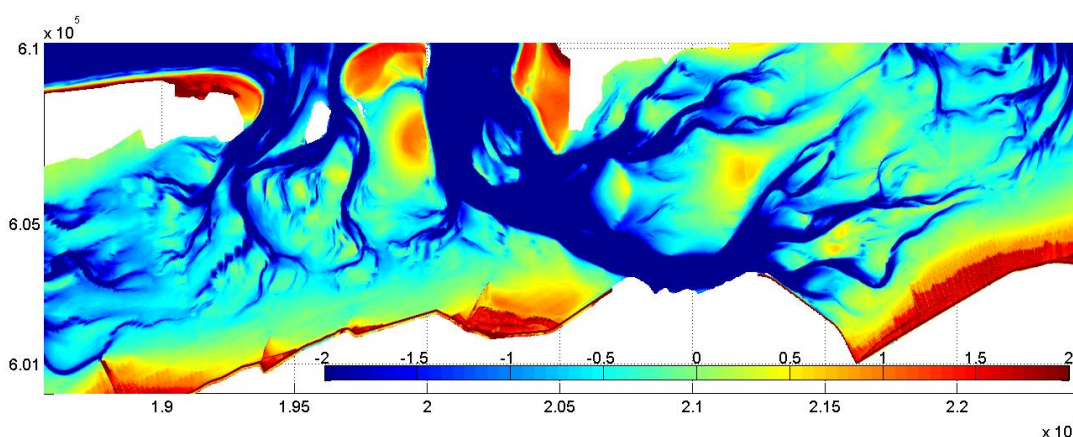


Fig.2.8 Samengestelde bodem voor het Friesche Zeegat in 2006.

2.2 Verwerking van de lidar data

Om de aangeleverde lidar data te kunnen visualiseren en analyseren zijn de volgende stappen gevolgd:

- 1 De ruwe data, de xyz-bestanden, zijn eerst omgezet naar een kaartblad grid van 20 m bij 20 m, 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 grid-cel wordt berekend en gebruikt. Er wordt dus niet geïnterpoleerd. Als er geen gegevens binnen een grid-cel beschikbaar zijn, dan wordt voor de betreffend grid geen waarde berekend. Als er binnen een grid-cel meerdere punten beschikbaar zijn, wordt de gemiddelde waarde berekend. Alle punten tellen even zwaar, onafhankelijk van de ligging van de punten binnen het grid-cel. 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 resultaten wijzigen.
- 2 Visualiseren van de gegevens. Na stap 1 kunnen de gemeten bodemhoogtes worden gevisualiseerd in bijvoorbeeld contourplots, zie de Figuren 2.9, 2.10 en 2.11. Een aantal zaken valt dan meteen op:

- De gegevens dekken niet het hele gebied. De witte vlekken geven gridcellen weer waarin geen datapunten vallen. Bij verkleining van de gridcelgrootte van 20m x 20m naar 10m x 10m neemt het aantal lege en dus witte cellen toe (vergelijk Fig. 2.9 met Fig. 2.10 en 2.11). 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 streepatronen van de witte vlekken parallel aan de vluchtroutes suggereren dat deze plekken aan de rand van de vluchtstroken liggen.
 - De geulen in het gebied zijn duidelijk herkenbaar als gebieden met lage hoogtewaarden die bovendien nauwelijks variëren over grote oppervlakten (de (donker-) blauwe delen van Fig. 2.9). Blijkbaar wordt de hoogte van het wateroppervlak in de geulen gemeten. De kleurverschillen in de bovengenoemde blauwe geulpatronen, parallel aan de vliegrichting, laten zien dat de metingen bij verschillende waterstanden hebben plaatsgevonden (vergelijk kleurgrenzen met Fig. 2.1).
- 3 Verdere verwerking en analyse van de data. De resultaten van stap 1 worden als basis gebruikt voor de verdere verwerking en analyse, zoals het bepalen van relevante morfologische parameters en vergelijking met de bestaande gegevens.

Opmerking: De data zijn dit keer eerst gecontroleerd op onrealistische waarden. Waarden groter dan +2 m NAP binnen de vloedkommen zijn verwijderd.

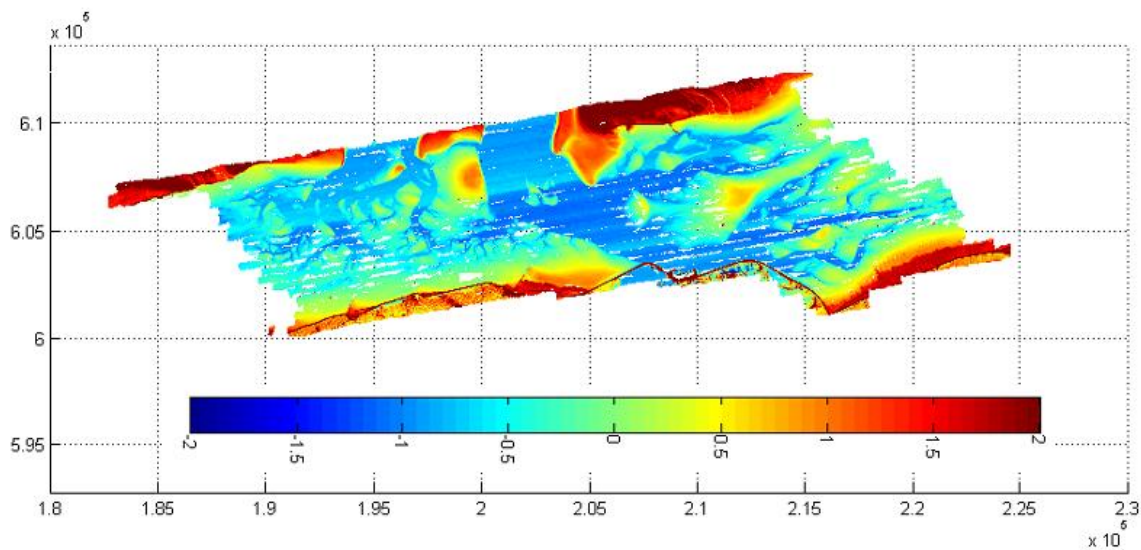


Fig.2.9 Visualisatie van de bodemhoogte gegevens uit maart 2010 op een 10m x 10m grid.

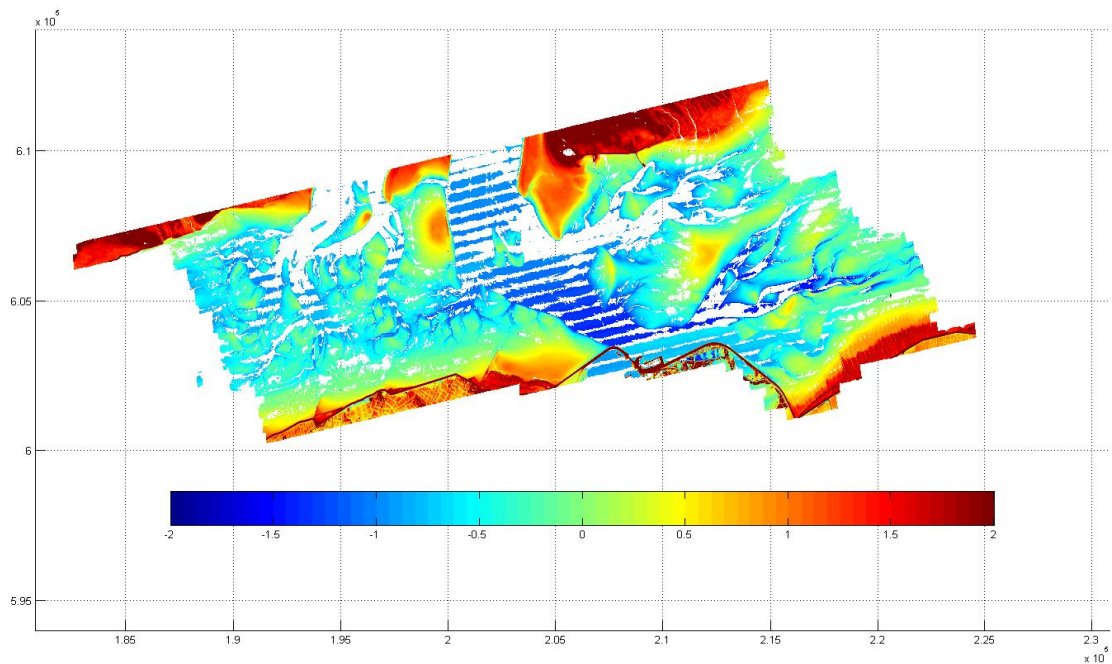


Fig.2.10 Visualisatie van de bodemhoogte gegevens van april 2011 op een 10m x 10m grid.

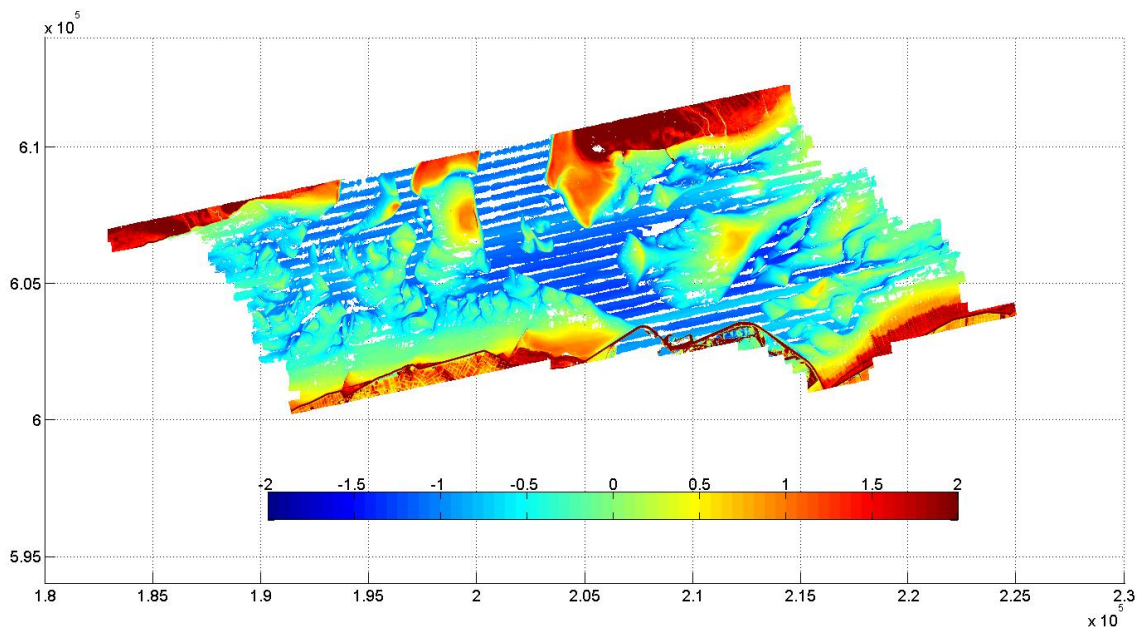


Fig.2.11 Visualisatie van de bodemhoogte gegevens van september 2011 op een 10m x 10m grid.

2.3 Morfologische veranderingen

De in bodemligging van maart 2010 is in een eerdere analyse vergeleken met de bodem van 2006 (Wang e.a., 2010). Het sedimentatie - erosiepatroon over de periode 2006 - 2010 wordt weergegeven in Fig. 2.12.

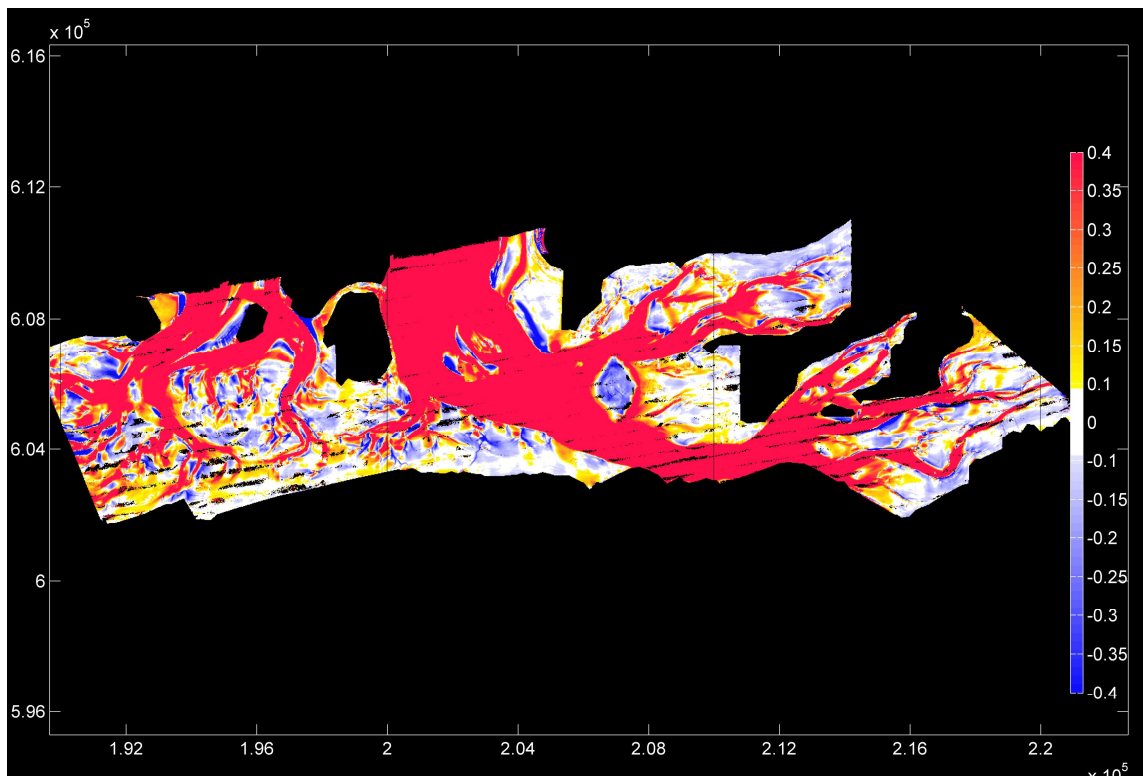


Fig.2.12 Sedimentatie (positief) – erosie (negatief) (m) patronen afgeleid uit de lidar opnamen van maart 2010 en de vaklodingen uit 2006.

De geulen in het gebied zijn duidelijk herkenbaar als gebieden met extreem grote 'sedimentatie'. Dit wordt veroorzaakt doordat de lidar metingen in de geulen het waterniveau weergeven, terwijl de vaklodingen het bodemniveau weergeven. Verder zien de patronen van veranderingen er logisch uit: de grootste veranderingen treden op rondom de overgangen van platen naar geulen als gevolg van geulmigratie. In Fig. 2.12 is de geulmigratie echter alleen nog herkenbaar in gebieden van significante erosie (waar plaat geul is geworden). De gebieden van grote sedimentatie (waar geul plaat is geworden) zijn niet meer te onderscheiden van de geulen zelf, waar ten onrechte (grote) sedimentatie wordt berekend op deze manier (zie Fig.2.13). Dit is een bijkomende beperking van morfodynamische analyses op basis van lidar gegevens.

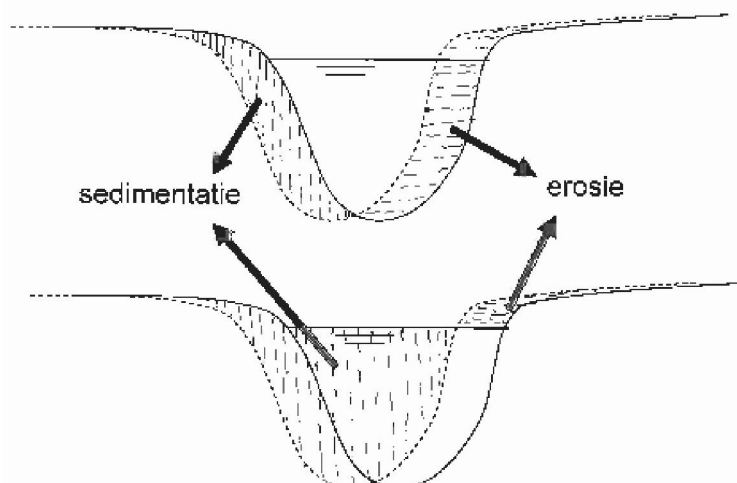


Fig.2.13 Schematische weergave van sedimentatie en erosie bij geulmigratie. Boven: werkelijke veranderingen, Onder: veranderingen volgens lidar data

Met de twee metingen uit 2011 zijn er in totaal vier datasets die met elkaar kunnen worden vergeleken om de sedimentatie - erosie patronen in de periode 2006-2011 te bepalen (met 20m grid) (Fig.2.14 - Fig.2.17).

De verschillen tussen de lidar opnames (Fig.2.14, Fig.2.15 en Fig.2.15a) zijn klein behalve wanneer er sprake is van migratie van geulen. De verschillen tussen de lidar opnames laten streeppatronen langs de vluchtpaden zien. In gebieden van water (geulen) is dit logisch, omdat dit de verandering in waterstanden tussen de vluchten laat zien. De streeppatronen zijn hier en daar ook zichtbaar op de platen, hoewel de verschillen relatief klein zijn. Dit kan een gevolg van meetfouten zijn, maar kan ook het gevolg van veranderde omstandigheden (bijvoorbeeld verandering van hoeveelheid water / vocht) op de platen zijn. Deze patronen zijn veel minder zichtbaar wanneer de twee metingen met de bodem van 2006 worden vergeleken (Fig.2.16 en Fig.2.17).

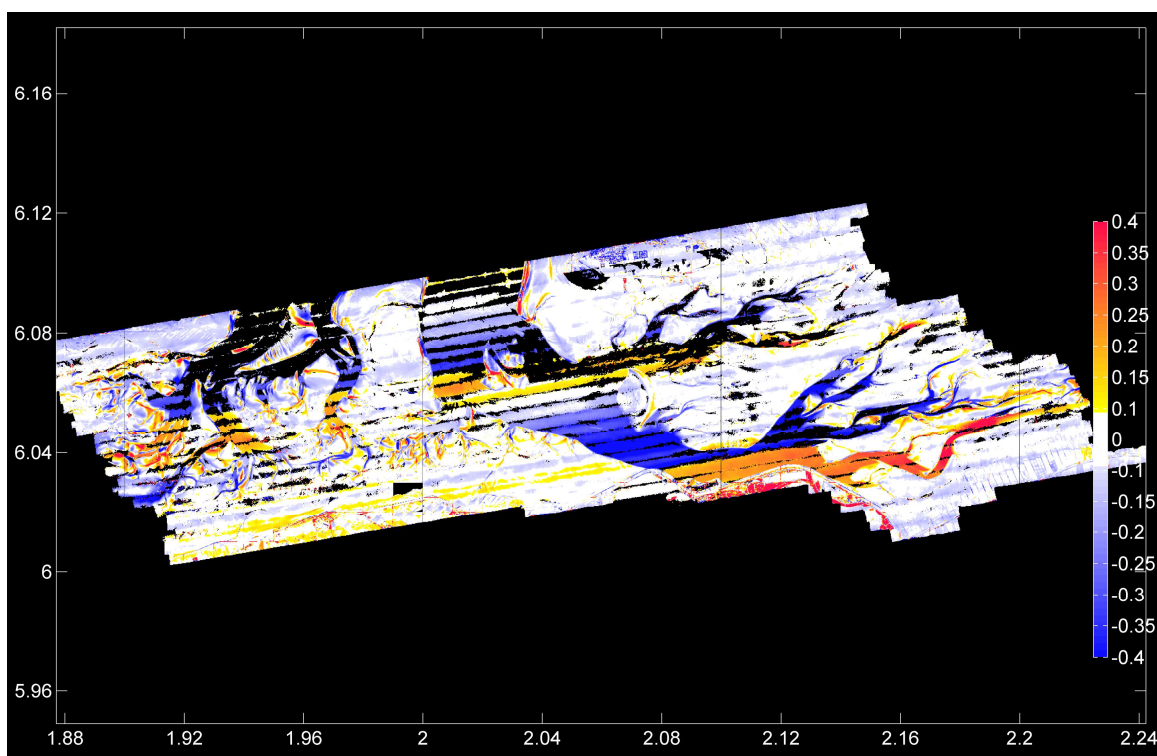


Fig.2.14 Sedimentatie (positief) – erosie (negatief) (m) patronen afgeleid uit de lidar metingen van voorjaar 2010 en voorjaar 2011

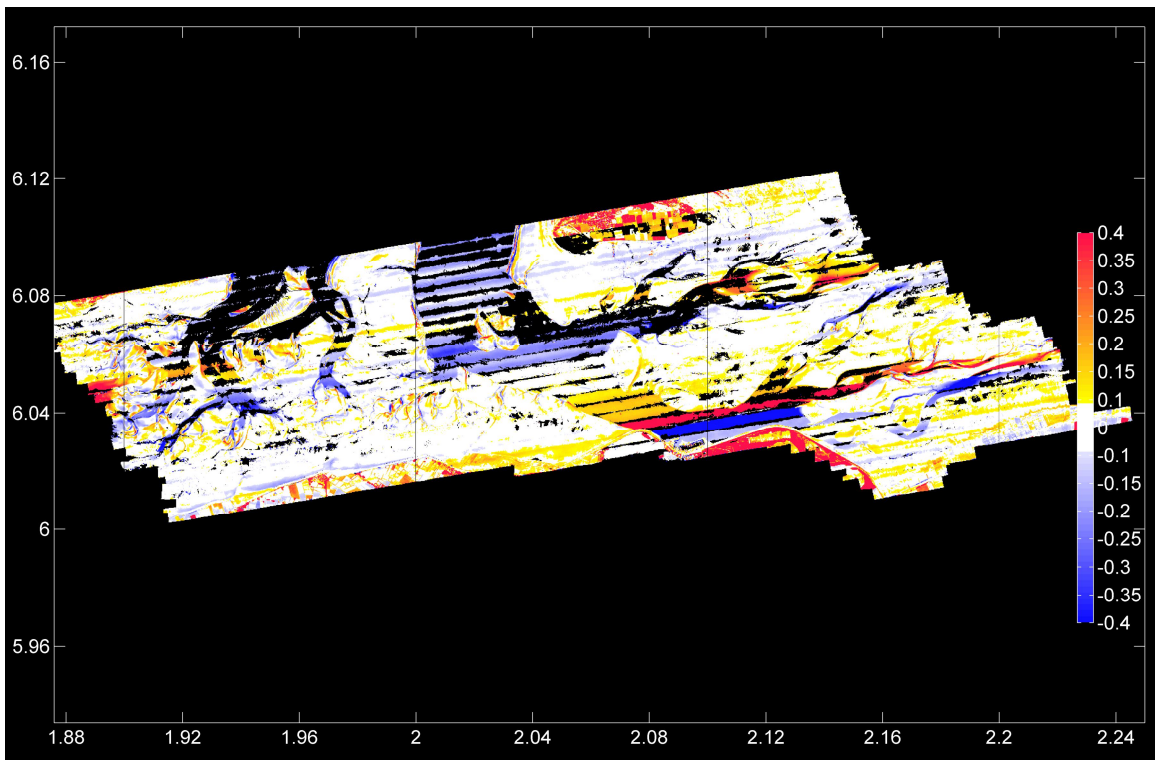


Fig.2.15 Sedimentatie (positief) – erosie (negatief) (m) patronen afgeleid uit de lidar metingen van voorjaar 2011 en najaar 2011

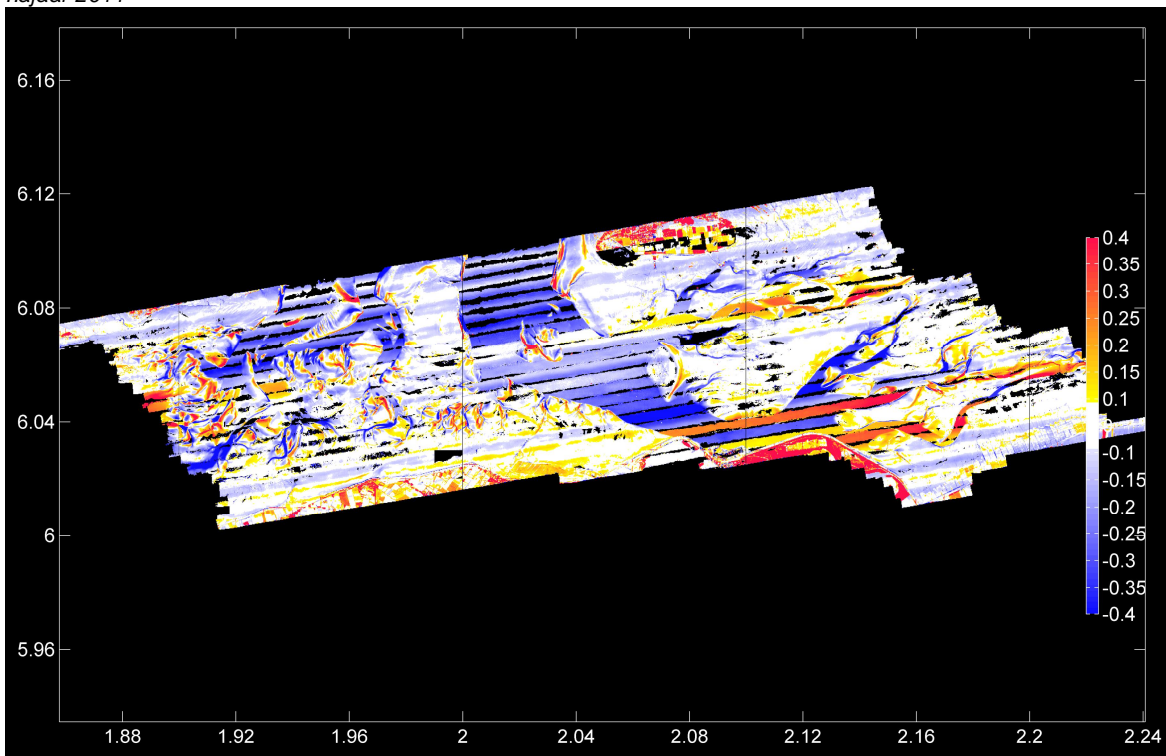


Fig.2.15a Sedimentatie (positief) – erosie (negatief) (m) patronen afgeleid uit de lidar metingen van najaar 2011 en voorjaar 2010

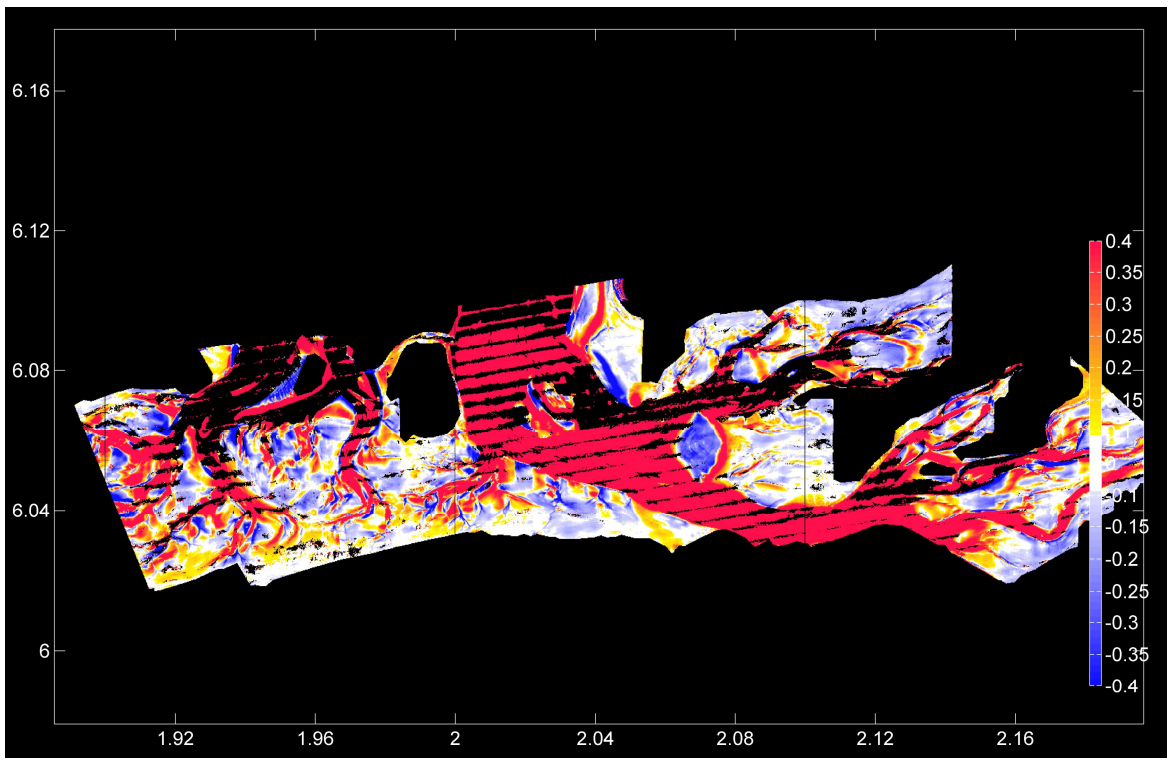


Fig.2.16 Sedimentatie (positief) – erosie (negatief) (m) patronen afgeleid uit de lidar metingen van voorjaar 2011 en vaklodingen uit 2006

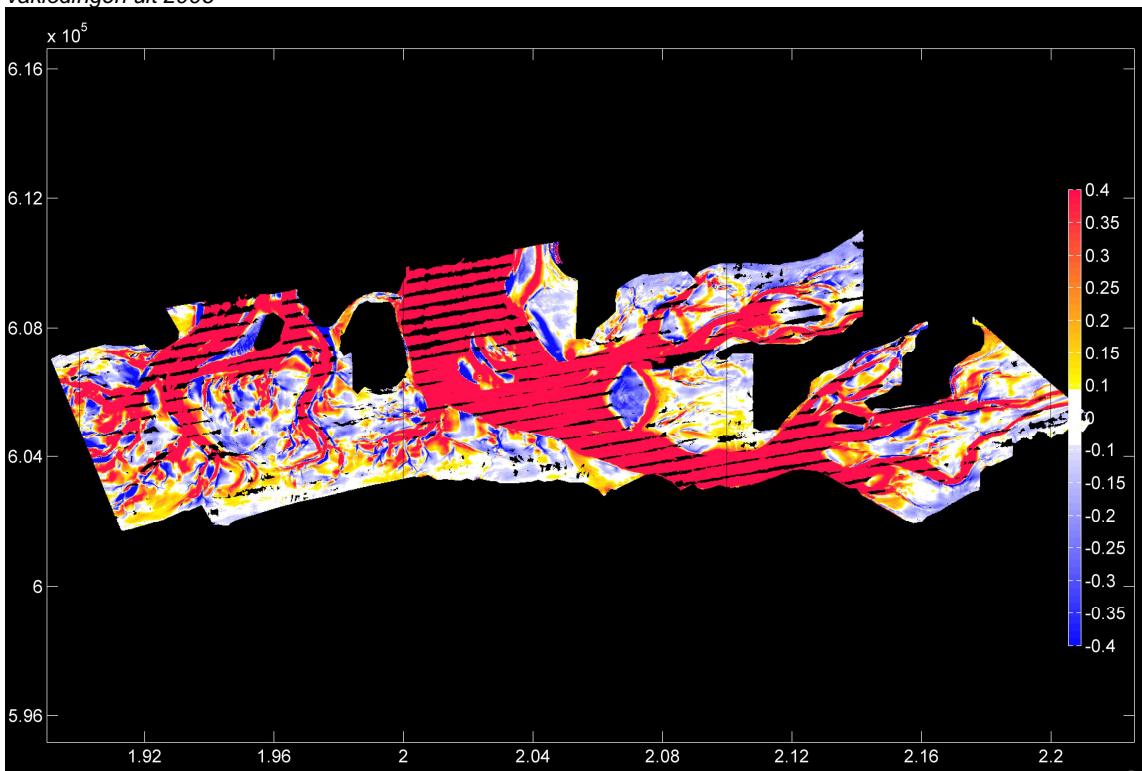


Fig.2.17 Sedimentatie (positief) – erosie (negatief) (m) patronen afgeleid uit de lidar metingen van najaar 2011 en vaklodingen uit 2006.

Ook uit de vergelijking van twee lidar metingen kan in het geval van geulmigratie een onjuist beeld van sedimentatie of erosie ontstaan, veroorzaakt door het verschil in waterstand tijdens de twee metingen (Fig.2.18).



Fig.2.18 Schematische weergave van sedimentatie en erosie bij geulmigratie. Boven: werkelijke veranderingen, Onder: veranderingen volgens lidar data Links: de waterstand tijdens de tweede meting is lager dan tijdens de eerste meting. Rechts: de waterstand tijdens de tweede meting is hoger dan tijdens de eerste meting.

Verder is ook de gebiedsdekkende bodem van 2006 (Fig.2.8) gebruikt om het sedimentatie-erosiepatroon over de periode van 2006 tot en met 2011 te bepalen, zie Fig. 2.19. In Fig. 2.19 zijn de grenzen van de gebieden die later aangevuld zijn duidelijk te zien. Wegens dit gebrek wordt deze gebiedsdekkende dataset verder niet gebruikt in de analyse.

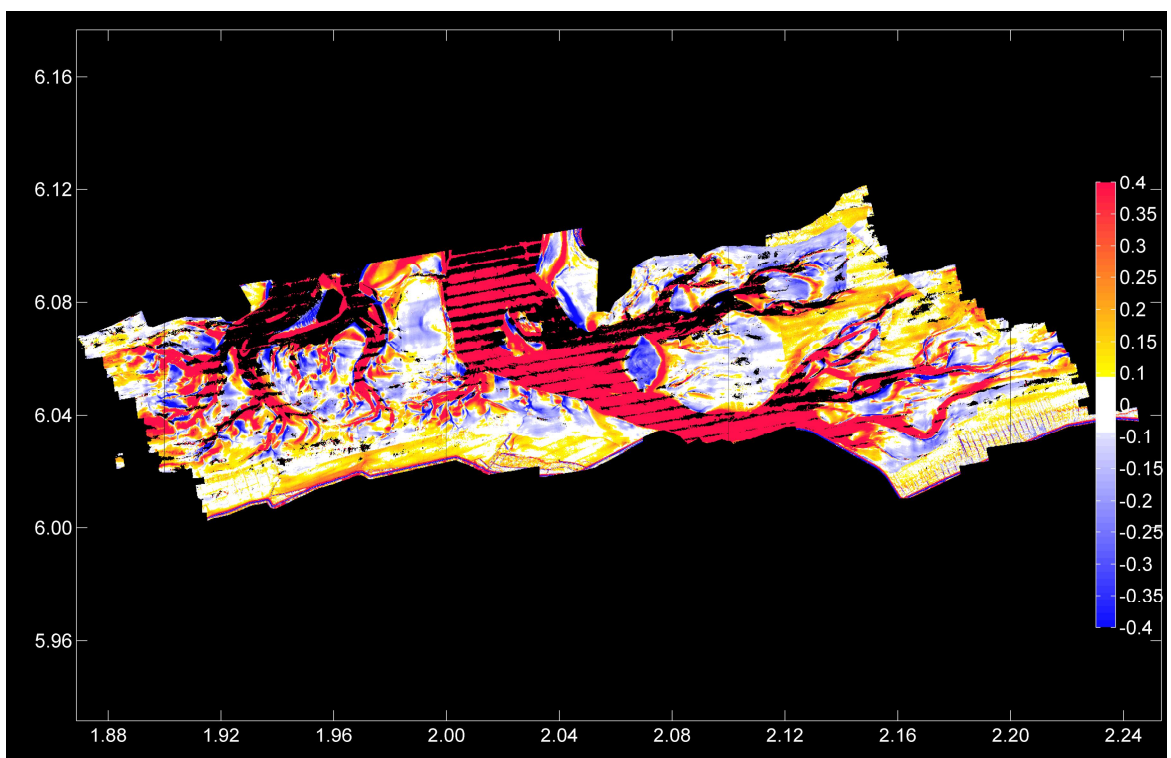


Fig. 2.19 2011 – 2006 sedimentatie (positief) en erosie (negatief) (m) over de periode 2006-2011 (2006 dataset geleverd door Shell).

3 Analyse intergetijdengebieden

3.1 Methode van analyse

Bij de analyse van de 2010 metingen (Wang e.a., 2010) is al geconcludeerd dat het oppervlak van de platen boven LW niet kan worden bepaald omdat de metingen niet precies tijdens LW uitgevoerd kunnen worden. Daarom wordt de hypsometrische curve gebruikt voor vergelijkingen tussen de verschillende datasets (zie verder hoofdstuk 3 in Wang e.a., 2010, voor de achtergrond van deze methode). Een beperking hierbij is dat men alleen het verschil in plaatoppervlak boven de hoogste waterstand gedurende de metingen kan bepalen.

Een kwestie die aandacht vraagt is de gebiedsdekking, die verschilt tussen de verschillende datasets. De verschillen kunnen een gevolg zijn van zowel morfologische veranderingen (bij voorbeeld geulmigratie), als van fouten in de metingen. Bij het vergelijken van de hypsometrische curven op verschillende tijdstippen door Wang e.a. (2010) werden alleen die gebieden meegenomen die door alle gebruikte datasets werden gedekt. Dit heeft wel als gevolg dat het gezamenlijke gebied steeds kleiner wordt als meerdere datasets tegelijk met elkaar worden vergeleken. Evenals vorig rapport wordt het oppervlak van het gebied onder een bepaald niveau bepaald. Echter in plaats van het oppervlak van het gebied onder een niveau direct te bepalen, wordt eerst het oppervlak van het gebied boven dat niveau bepaald en daarna van het totale oppervlak van het gebied afgetrokken. Deze nieuwe methode heeft het voordeel dat het oppervlak bij het hoogste niveau gelijk is aan het totale oppervlak zoals in werkelijkheid. Met de veronderstelling dat de lidar-metingen alle gebieden hoger dan de hoogste tijdens de metingen opgetreden waterstand dekken, kunnen hiermee verschillende lidar-metingen goed met elkaar worden vergeleken. De ondergrens kan worden bepaald door de hypsometrische curve gebaseerd op de lidar-metingen te vergelijken met de hypsometrische curve gebaseerd op de meeste recente vaklodingen op de manier zoals door Wang e.a. (2010) is beschreven (Fig.3.1). Onder een bepaald niveau (ongeveer -0.5 m NAP in Fig. 3.1) beginnen de curven sterk uiteen te lopen. Dit niveau kan men dan nemen als de kritische grens.

Opmerking:

De hypsometrische curven in Fig.3.1 onderschatten de totale oppervlakken van de vloedkommen. Dit komt doordat de 2006 data niet de hele vloedkommen bedekken. Om tot een realistische vergelijking te komen, hebben wij de 2006 data niet aangevuld met gegevens uit eerdere jaren.

Op basis van de hypsometrische curven kunnen ook de oppervlakken van gebieden binnen verschillende hoogteklassen worden bepaald. Het oppervlak van gebieden tussen twee hoogtes z_1 en z_2 is per definitie:

$$\Delta A = A(z_2) - A(z_1) \quad (3.1)$$

Hierin is A het oppervlak zoals in de hypsometrische curve is geplot.

Door de oppervlakken van de verschillende hoogteklassen uit te zetten tegen de hoogteklasse, ontstaat een histogram dat de samenstelling van het hoger gelegen deel van

een vloedkom verdeeld naar hoogtes weergeeft (zie Fig. 3.4). Aan de hand van deze histogrammen kunnen de verschillende lidar-metingen met elkaar worden vergeleken.

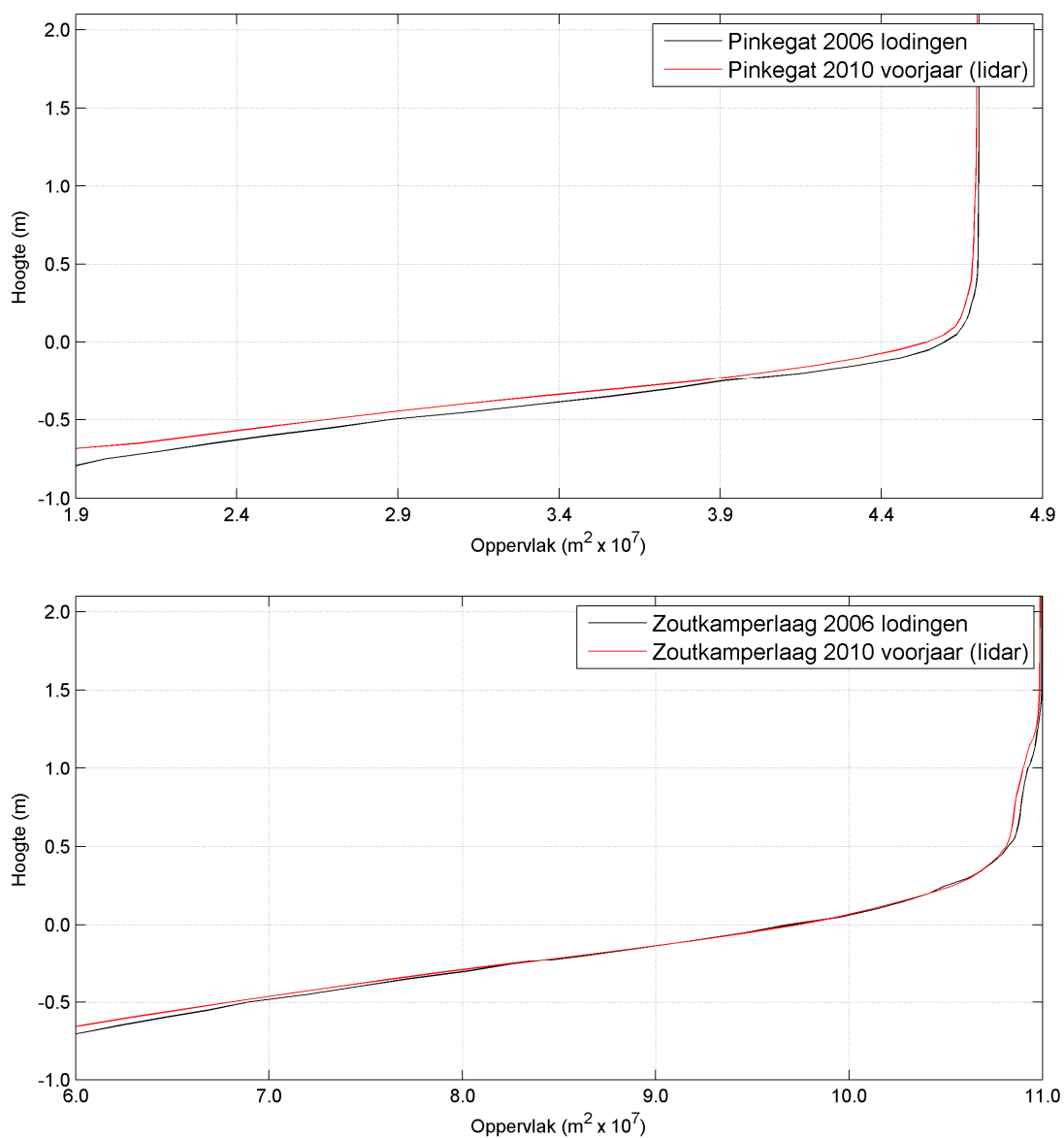


Fig.3.1 . Hypsometrische curven van 2006 bathymetrie en voorjaar 2010 lidar metingen. Alleen gebieden gedekt door beide dataset worden meegenomen in deze berekening

3.2 Resultaten

De figuren 3.2 t/m 3.5 laten de hypsometrische curven berekend op basis van de drie lidar opnames zien, inclusief de indicatie van de foutmarges. Vergelijking tussen de metingen van voorjaar 2011 met die van voorjaar 2010 (Fig.3.2) laat een verlaging van de wadplaten zien in beide vloedkommen maar de veranderingen zijn binnen de foutmarges. Figuren 3.3 en 3.4 laten zien dat de veranderingen in beide vloedkommen in de periode tussen resp. voorjaar 2010 en najaar 2011 en voor- en najaar 2011 erg klein zijn. Er valt aan de hand van de huidige metingen niet te concluderen of de verschillen zoals de Figuren 3.2, 3.3 en 3.4 laten zien, werkelijke morfologische veranderingen dan wel meetruis zijn. Zie ook Fig.3.5 waarin alle drie lidar opnames zijn afgebeeld samen met indicatie van de foutmarges.

Tabel 3.1 geeft de oppervlakken en volumes van de gebieden met een bodemhoogte boven -0.5 m NAP in de twee vloedkommen, afgeleid uit de drie lidar opnames. Deze waarde zijn op dezelfde manier berekend als in Wang, (2010). Ook hier geldt dat de verschillen tussen de metingen in dezelfde orde van grootte als de fouten zijn. Men kan dus nog niet vaststellen of de gemeten fluctuatie in de tijd door echte morfologische veranderingen of door meetfouten zijn veroorzaakt.

Tabel 3.1 Oppervlak wadplaten (A), volumes (V) en hoogte (h) per zeegat, per survey, tussen -0.5 en 5 m NAP.

	Pinkegat			Zoutkamperlaag		
voorjaar 2010	waarde	fout	Rel. fout	waarde	fout	Rel. fout
A (m ²)	31604800	1560720	5%	75998000	2133880	3%
V (m ³)	12221220	1106168	9%	47707490	2659930	6%
h (m)	0.38	0.035	9%	0.63	0.035	6%
%boven -0.5 m	51.57%			51.38%		
voorjaar 2011	waarde	fout	Rel. fout	waarde	fout	Rel. fout
A (m ²)	30842000	1621340	5%	76250400	2290260	3%
V (m ³)	11643410	1079470	9%	46313600	2668764	6%
h (m)	0.38	0.035	9%	0.61	0.035	6%
%boven -0.5 m	50.36%			51.50%		
najaar 2011	waarde	fout	Rel. fout	waarde	fout	Rel. fout
A (m ²)	31421600	1595720	5%	75687200	2193380	3%
V (m ³)	11492900	1099756	10%	46748220	2649052	6%
h (m)	0.37	0.035	10%	0.62	0.035	6%
%boven -0.5 m	51.17%			51.09%		

Opmerking: De waarden zijn niet dezelfde als in het vorige rapport (Wang e.a., 2010) omdat wij nu de 2010 metingen gebruiken als referentie in plaats van de 2006 bathymetrie. Daarom kunnen wij nu alle waarden van de lidar metingen gebruiken in plaats van alleen de cellen die met de niet-gebiedsdekkende 2006 bodem (Fig. 2.7) overlappen.

Meer in detail laten de histogrammen in Fig. 3.6 zien hoe de oppervlakken van gebieden in de verschillende hoogteklassen zijn veranderd van voorjaar 2010 tot najaar 2011. De bijbehorende foutmarges worden in paragraaf 3.3 behandeld (Tabel 3.3).

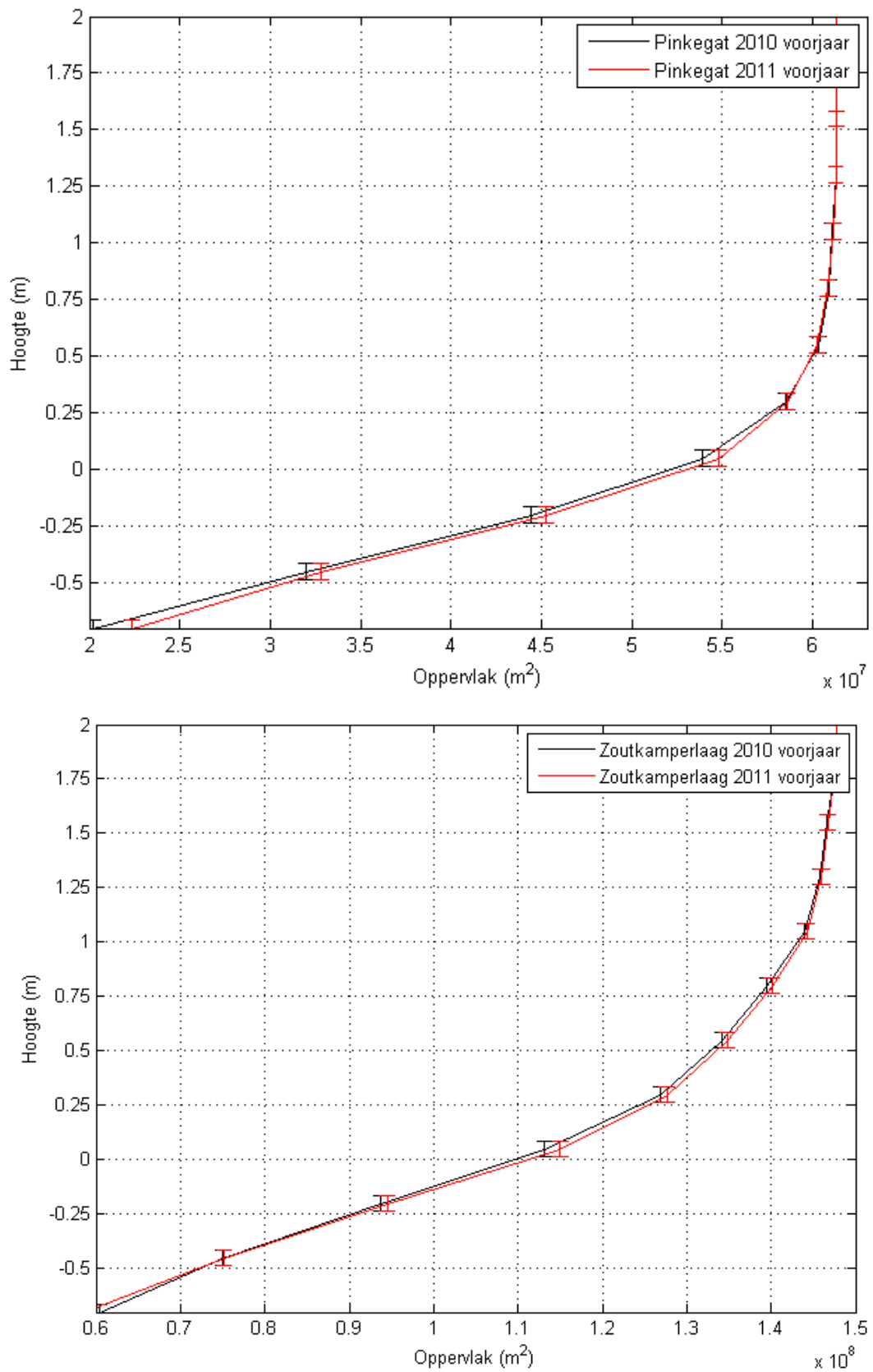


Fig. 3.2. Hypsometrisch curven voor voorjaar 2010 en voorjaar 2011

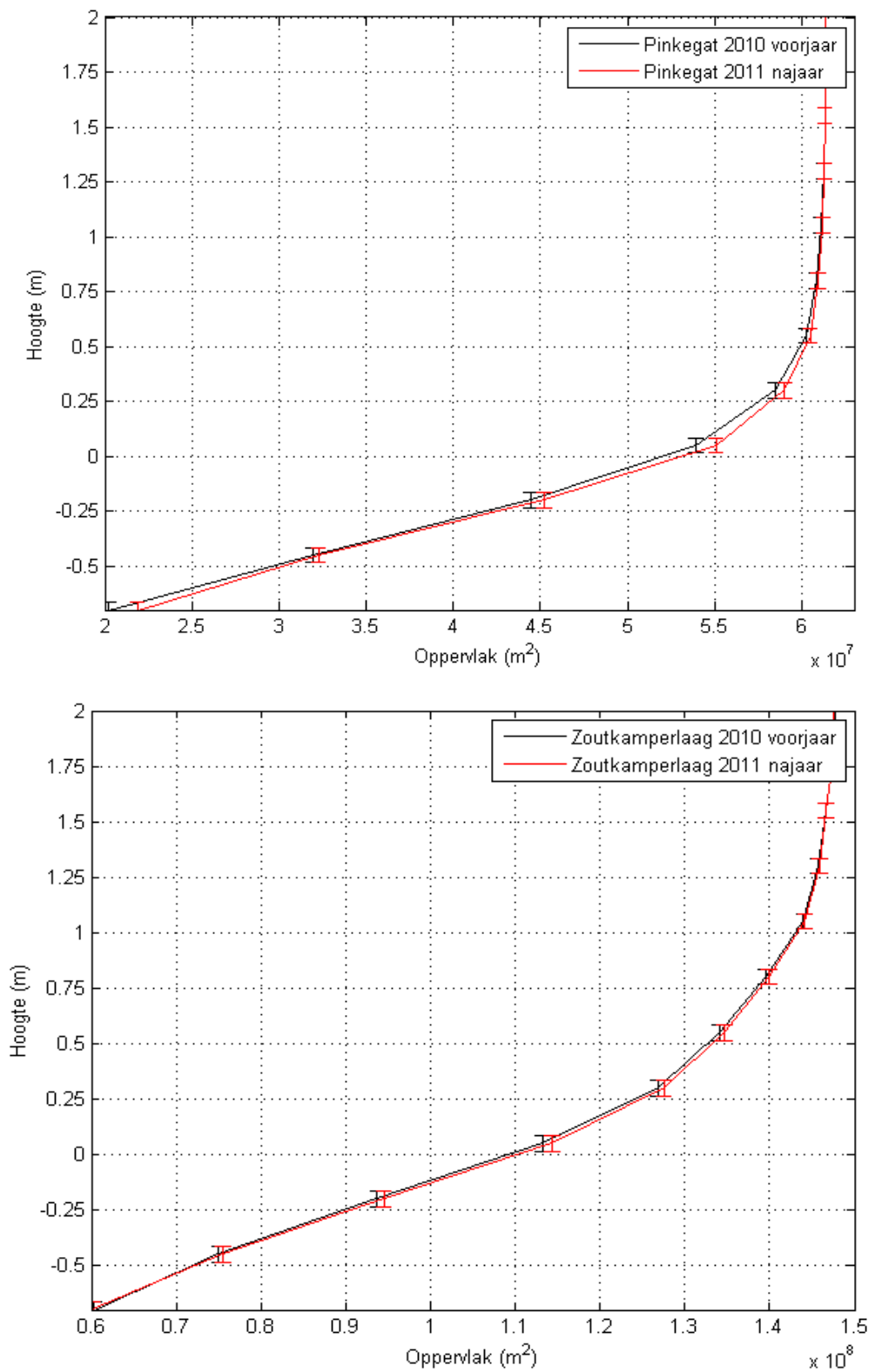


Fig.3.3 Hypsometrisch curven voor voorjaar 2010 en najaar 2011

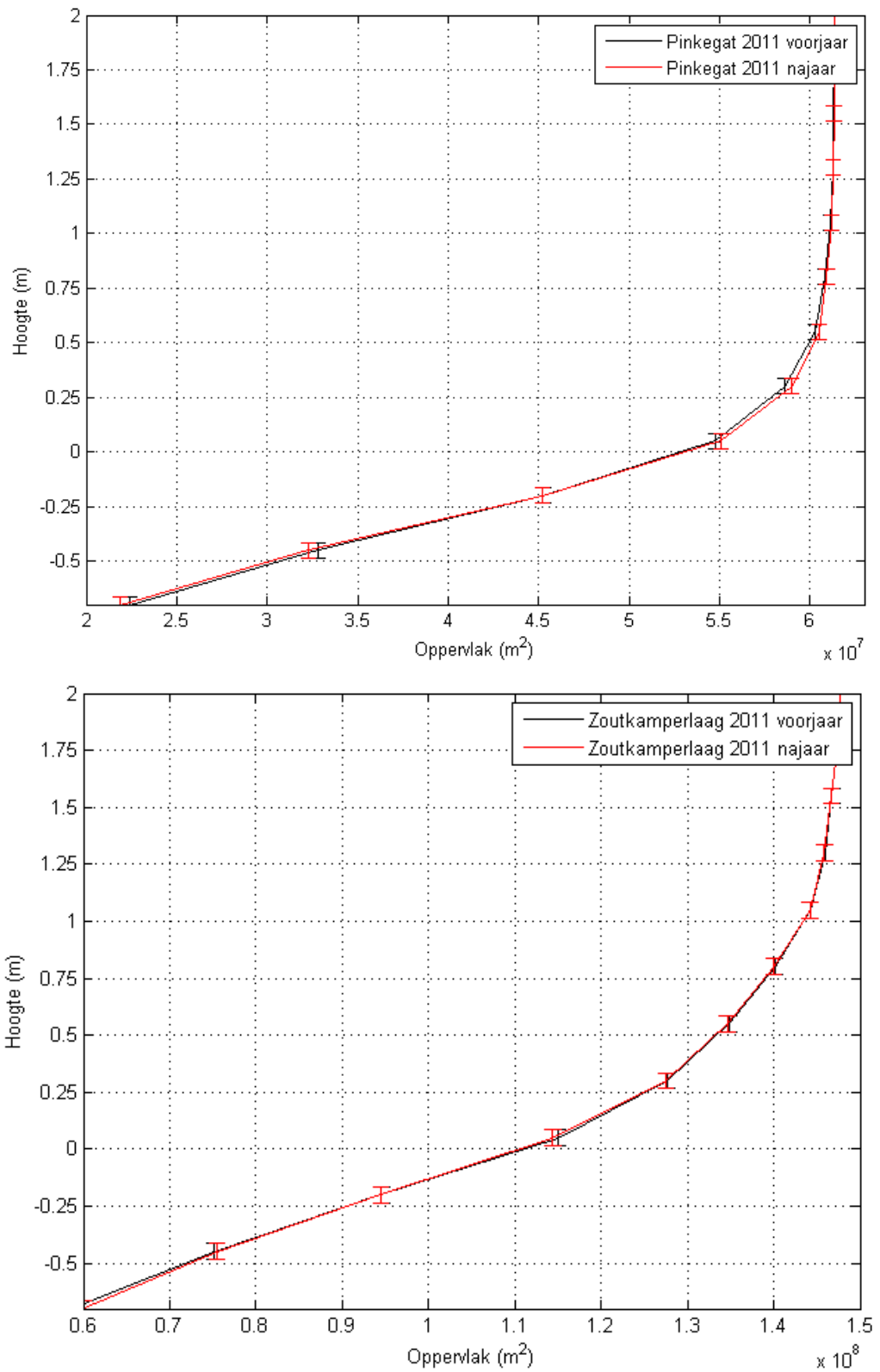


Fig 3.4 Hypsometrisch curven voor voorjaar 2011 en najaar 2011

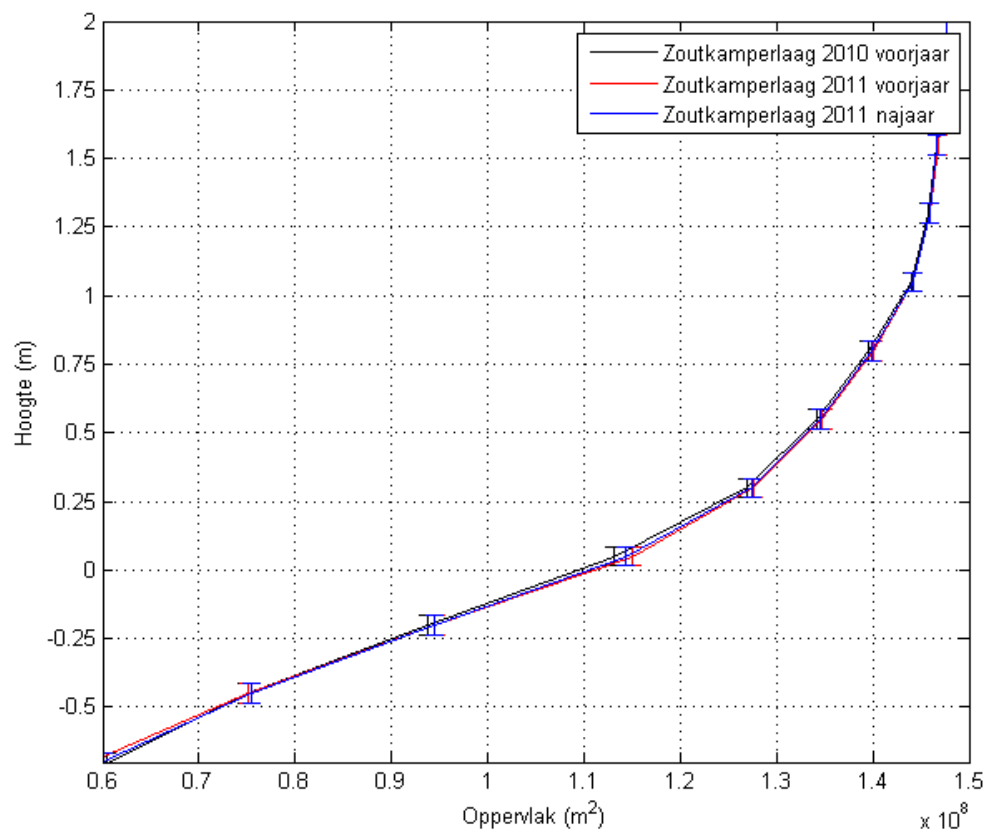
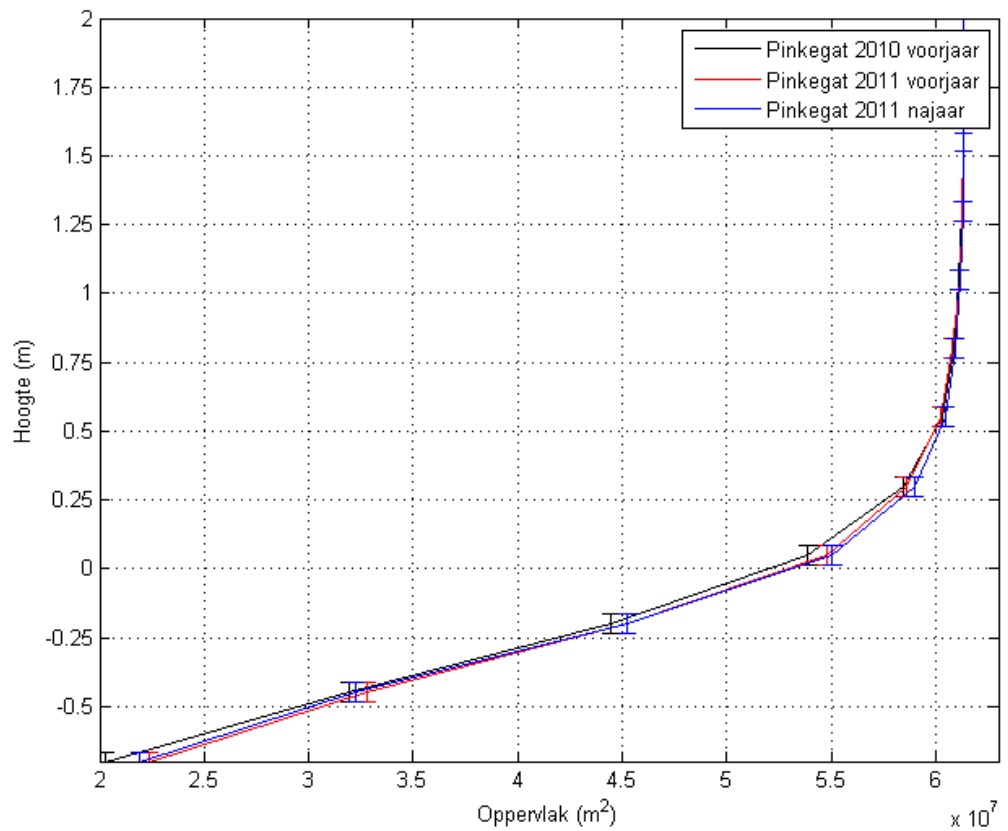


Fig 3.5 Hypsometrisch curven voor voorjaar 2010, voorjaar 2011 en najaar 2011

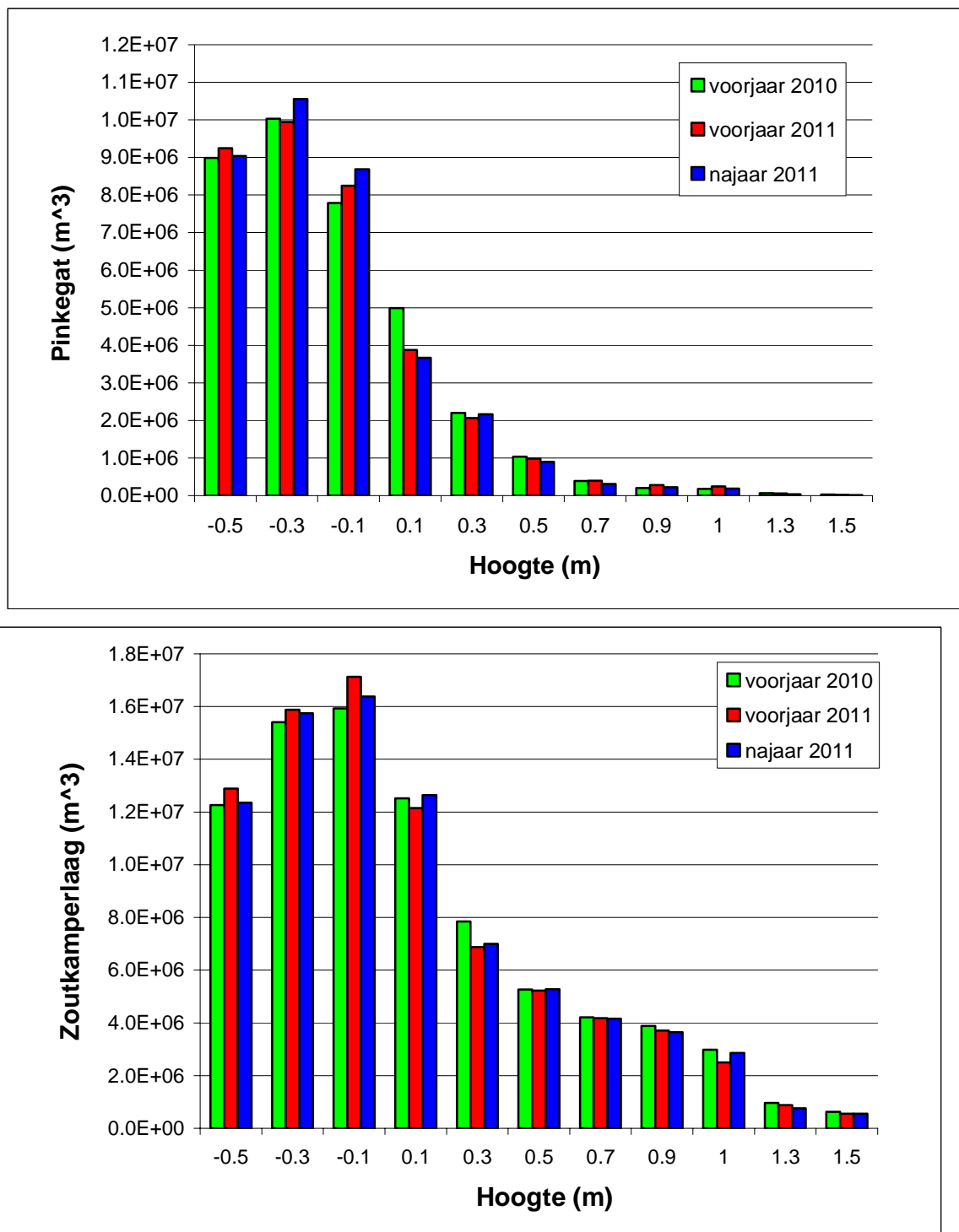


Fig.3.6 Histogrammen van het oppervlak van de verschillende hoogteklassen. Boven: Pinkegat; onder: Zoutkamperlaag. Het hoogteinterval is 0,2 m; de aanduiding 0,1 op de horizontale as staat voor het interval van 0 tot 0,2 m NAP.

3.3 Beschouwing over de nauwkeurigheid

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 6,2 cm.
- De fout in het bodemhoogteverschil bepaald aan de hand van lidar-metingen en de vaklodingen van 2006, is 9 cm.
- De relatieve fout in het oppervlak van gebieden boven -0.5 m NAP in het Pinkegat, is ongeveer 7%.
- De relatieve fout in de gemiddelde hoogte van gebieden boven -0.5 m NAP in het Pinkegat is ongeveer 13%.
- De relatieve fout in het oppervlak van gebieden boven -0.5 m NAP in de Zoutkamperlaag is ongeveer 4%.
- De relatieve fout in de gemiddelde hoogte van gebieden boven -0.5 m NAP in de Zoutkamperlaag is ongeveer 8%.

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

Tabel 3.2 z 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

Voor de geplote waarden in de histogrammen (Fig.3.6) kan de fout als volgt worden bepaald:

$$\sigma_{\Delta A} = \left| \frac{\partial^2 A}{\partial z^2} \right| (z_2 - z_1) \sigma_h \quad (3.2)$$

Hierin is σ_h de systematische fout zoals gegeven in Tabel 3.2 en z is de hoogte.

De hiermee berekende fouten zijn gegeven in Tabel 3.3. De berekende relatieve fout van de waarden in de histogrammen van Fig. 3.6 is de orde van 10%. Een uitschieter is de hoogteklaas rondom -0.3 m NAP in het Pinkegat, waarvoor de fout ca. 20% is.

Tabel 3.3 Fout in de histogrammen

Hoogteklasse (m NAP)	Fout Zoutkamperlaag (m ²)	Fout Pinkegat (m ²)
-0.5 (-0.6 -- -0.4)	1.78 x 10 ⁶	2.0 x 10 ⁴
-0.3 (-0.4 -- -0.2)	5.2 x 10 ⁵	1.1 x 10 ⁶
-0.1 (-0.2 – 0)	6.7 x 10 ⁵	1.3 x 10 ⁶
0.1 (0 – 0.2)	8.7 x 10 ⁵	9.2 x 10 ⁵
0.3 (0.2 – 0.4)	6.9 x 10 ⁵	3.3 x 10 ⁵
0.5 (0.4 – 0.6)	5.4 x 10 ⁵	3.1 x 10 ⁵
0.7 (0.6 – 0.8)	6.1 x 10 ⁵	3.5 x 10 ⁴
0.9 (0.8 – 1.0)	1.4 x 10 ⁵	4.8 x 10 ⁴
1.1 (1.0 – 1.2)	2.8 x 10 ⁵	3.4 x 10 ⁴
1.3 (1.2 – 1.4)	4.9 x 10 ⁴	4.2 x 10 ⁴
1.5 (1.4 – 1.6)	7.2 x 10 ⁴	0

De voorgaande beschouwing van de meetfouten is theoretisch en op basis van de door Fugro gegeven specificaties. De berekende fouten gelden als de metingen perfect zouden zijn uitgevoerd. 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 de Figuren 2.14 t/m 2.17. Theoretisch is de fout in het verschil tussen twee metingen kleiner dan 10 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.

Door de verschillen tussen de drie metingen te vergelijken met de fouten zoals hierboven zijn bepaald, moet geconcludeerd worden dat de gemeten verschillen nog binnen de foutenmarge vallen. Daardoor is het niet mogelijk om vast te stellen of de waargenomen patronen ook werkelijk morfologische veranderingen vertegenwoordigen. Dit is een gevolg van het korte interval tussen de metingen. Morfologische veranderingen, door bodemdaling of door sedimentatie en erosie, 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. Frequent meten leidt dus niet tot het eerder vaststellen van eventuele veranderingen, maar zal wel helpen bij het nauwkeuriger vaststellen van de veranderingen.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Samenvatting van de conclusies

De lidar data verzameld door Fugro in het Friesche Zeegat (Pinkegat en Zoutkamperlaag) in het voor- en najaar van 2011 zijn vergeleken met de gegevens van maart 2010. In aanvulling op de conclusies van Wang e.a. (2010) kunnen de volgende conclusies getrokken worden :

- Het lijkt erop dat de theoretische nauwkeurigheid niet wordt gehaald.
- De weeromstandigheden tijdens de metingen hebben invloed op de nauwkeurigheden van de meetresultaten.
- De verschillen tussen de meetresultaten van de drie 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.

Frequent meten leidt niet tot het eerder vaststellen van eventuele veranderingen, maar zal wel helpen bij het nauwkeuriger vaststellen van de veranderingen.

Ten aanzien van historische trends is duidelijk te zien dat de veranderingen zowel een trend als fluctuaties in de tijd vertonen (Wang,2010). Alle bekkens tonen bijvoorbeeld op de lange-termijn een toenemende plaathoogte. Deze trend kan worden beschouwd als de respons van het systeem op de zeespiegelstijging en op menselijke ingrepen in het verleden. Bovenop de lange-termijn trend vertonen de veranderingen ook fluctuaties die een gevolg kunnen zijn van fouten in de data maar ze kunnen ook echte natuurlijke veranderingen zijn. De natuurlijke aandrijvende krachten zijn niet constant maar bevatten allerlei fluctuaties op verschillende tijdschalen (Wang, 2010). Metingen van het bodemniveau op een punt in de buurt van Ameland laten duidelijk zien dat fluctuaties van verschillende frequenties optreden bovenop de lange-termijn trendmatige verandering. De lidar metingen verschaffen wel informatie over de hoger gelegen delen van de wadplaten. De verandering van de gemiddelde hoogteligging van 2010 tot 2011 is echter kleiner dan de systematische fout van de lidar metingen (3.5 cm). Dit wordt nog bemoeilijkt door het feit dat er verschillen zijn in de dekking van de metingen. Daarom kunnen veranderingen als gevolg van bodemdaling ook niet worden vastgesteld.

5 Referenties

- 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.
- Gert Brand, Marc Crombaghs, Sander Oude Elberink, Regine Brüelmann, Erik de Min, 2003, Precisiebeschrijving AHN 2002, Rijkswaterstaat, Adviesdienst Geo-informatie en ICT rapport AGI-GAP-2003-5, juli 2003.
- Kinneging, N., 2010, Nauwkeurigheid vaklodingen RWS, Memo aan de Auditcommissie Bodemdaling Waddenzee t.g.v. gaswinning, Waterdienst, Rijkswaterstaat.
- Marc Crombaghs en Sander Oude Elberink, 2004, Laseraltimetrie voor de hoogtemetingen van de kwelders Waddenzee, Rijkswaterstaat Adviesdienst Geoinformatie en ICT, rapport AGI-GAP-2003-50, februari 2004.
- Wang, Z.B., Cronin, K. en van Ormondt, 2010, Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1202285-000