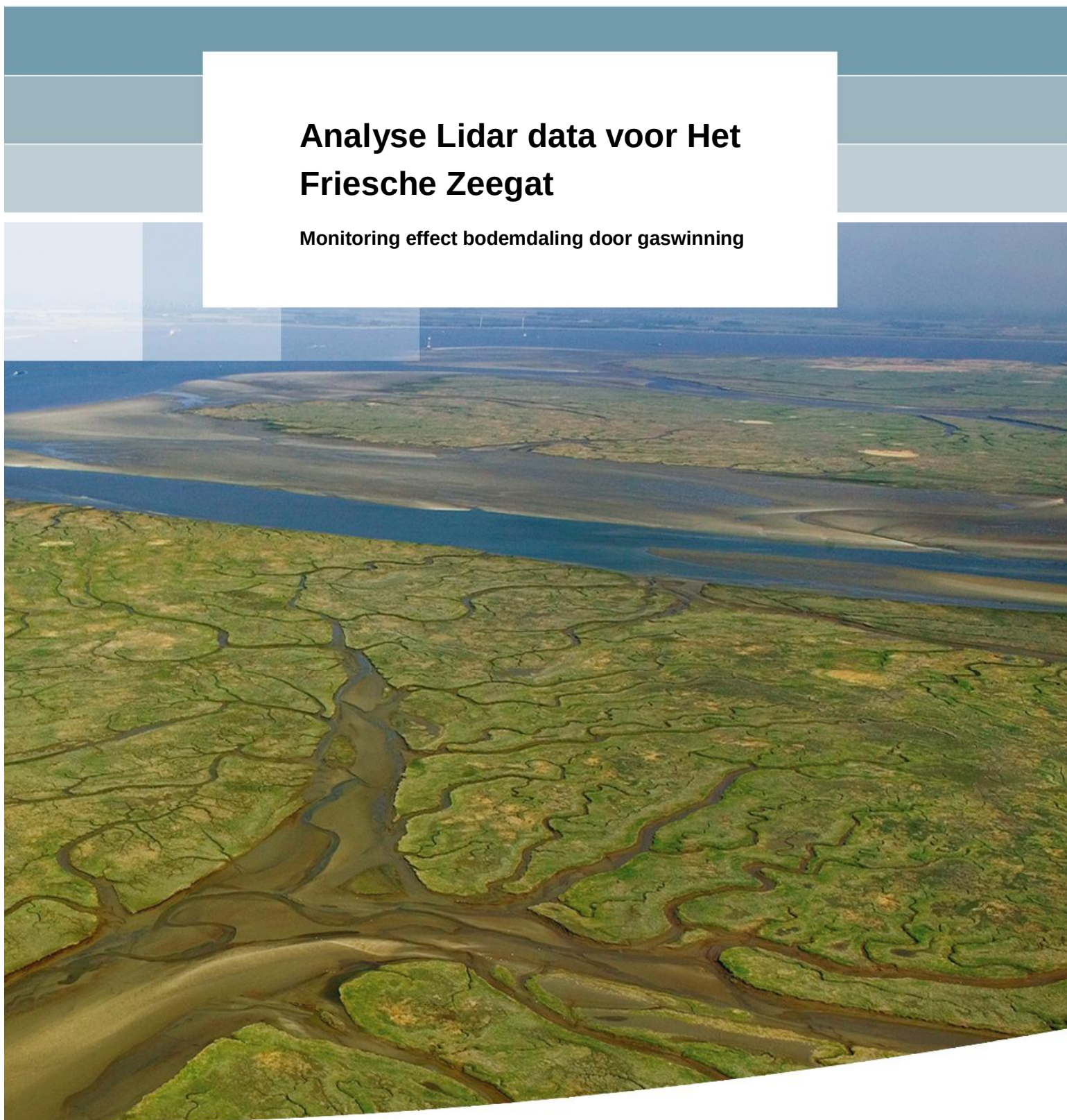


## **Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat**

**Monitoring effect bodemdaling door gaswinning**



# **Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat**

**Monitoring effect bodemdaling door gaswinning**

Zheng Bing Wang  
Katherine Cronin  
Maarten van Ormondt

1202285-000

## Titel

Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat

## Opdrachtgever

NAM

## Project

1202285-000

## Pagina's

21

## Trefwoorden

Lidar data, Waddenzee, Bodemdaling, Intergetijdegebied

## Samenvatting

De data verzameld door Fugro tijdens de lidar metingen in het Friesche Zeegat eind maart 2010 zijn verwerkt en geanalyseerd in samenhang met de morfologische veranderingen van de wadplaten en de te verwachten bodemdalingen door gaswinning. Op basis van de analyse wordt geadviseerd extra lidar metingen niet in te zetten voor het monitoren van effecten van bodemdalingen door gaswinning. Dit advies is gebaseerd op de volgende bevindingen uit de analyse:

- Lidar metingen alleen leveren niet voldoende informatie op om de morfologische parameters van het intergetijdegebied te bepalen. Combinatie met lodingen is noodzakelijk om de omvang van het intergetijdegebied te meten.
- voor het bepalen van morfologische veranderingen heeft het weinige zin veel vaker te meten dan de huidige meetpraktijk van Rijkswaterstaat van eens in 6 jaar. Om eventuele trendbreuk in de veranderingen te kunnen meten zijn 3 tot 4 meetperioden nodig.
- De te verwachten bodemdalingen door gaswinning op Ameland en in de Waddenzee zijn in dezelfde orde van de meetfout van bodemveranderingen tussen twee meetperioden (~5 cm). Aanvullende lidar metingen, zoals in deze pilot zijn uitgevoerd, dragen bovenop de al beschikbare metingen van Rijkswaterstaat, niet effectief bij aan de monitoring van effecten van bodemdalingen door gaswinning.

## Referenties

Opdracht Nam aan Deltares met PO nummer 4510931081

| Versie | Datum    | Auteur          | Paraaf | Review          | Paraaf | Goedkeuring | Paraaf |
|--------|----------|-----------------|--------|-----------------|--------|-------------|--------|
|        | Mei 2010 | Zheng Bing Wang |        | Ad van der Spek |        | Johan Boon  |        |
|        |          |                 |        |                 |        |             |        |
|        |          |                 |        |                 |        |             |        |

## Status

definitief

## Inhoud

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Inleiding</b>                                         | <b>1</b>  |
| 1.1 Achtergrond                                            | 1         |
| 1.2 Doelstelling van de analyse                            | 1         |
| 1.3 Aanpak van de analyse                                  | 1         |
| <b>2 Verwerking van de data</b>                            | <b>3</b>  |
| 2.1 Ingewonnen data                                        | 3         |
| 2.2 Verwerking van de Lidar data                           | 6         |
| 2.3 Morfologische parameters                               | 8         |
| 2.4 Morfologische veranderingen                            | 8         |
| <b>3 Analyse intergetijdengebieden</b>                     | <b>10</b> |
| 3.1 Intergetijdengebied en methode van analyse             | 10        |
| 3.2 Resultaten en nauwkeurigheid                           | 11        |
| 3.3 Morfologische veranderingen                            | 13        |
| 3.4 Evaluatie toepassing Lidar voor monitoring bodemdaling | 16        |
| <b>4 Conclusies en aanbevelingen</b>                       | <b>19</b> |
| 4.1 Samenvatting conclusies                                | 19        |
| 4.2 Aanbevelingen                                          | 20        |
| <b>5 Referenties</b>                                       | <b>21</b> |

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

Binnen het kader van monitoring effecten bodemdaling door gaswinning in de Waddenzee worden de ontwikkelingen van de Wadplaten gemonitord. Tot nu toe gebeurt dit door het opnemen van luchtfoto's. Het is echter gebleken dat de opnames gedaan kunnen worden. Bovendien zijn de foto's moeilijk te interpreteren waardoor ze niet voldoende informatie leveren over de ontwikkelingen van de Wadplaten. Daarom is er gekeken naar alternatieve methoden voor de monitoring van de ontwikkelingen van de Wadplaten. Een veel belovende methode is het meten met lidar. Om deze methode te kunnen evalueren is eind maart 2010 een pilot lidar opname gedaan voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag. De huidige studie betreft het analyseren van de data van deze lidar opname en een vergelijking te maken met bestaande beschikbare gegevens van RWS.

## 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.
- Tot advies te komen m.b.t. toekomstige lidar data inwinning met als doel het monitoren van effecten van bodemdaling door gaswinning op de ontwikkelingen van de Wadplaten. Te beantwoorden vragen zijn:
  - Hoe nauwkeurig zijn de berekeningen van de morfologische parameters op basis van de lidar data?
  - Hoe verhoudt de meetnauwkeurigheid zich t.o.v. natuurlijke veranderingen en bodemdaling?
  - Hoe vaak moeten de lidar metingen worden uitgevoerd om nut te hebben voor monitoring effecten bodemdaling?
  - Hoe lang zal het duren voordat de eventuele effecten van de bodemdaling door gaswinning te bepalen zijn?

## 1.3 Aanpak van de analyse

Naast de aangeleverde lidar data worden ook gegevens van waterstanden tijdens de lidar opname en bestaande gegevens van bodemhoogtes verzameld voor de analyse. Een beschrijving van alle gebruikte data is gegeven in hoofdstuk 2.

De lidar data zijn eerst verwerkt tot de kaartbladen door ze te middelen op een regelmatig grid van 20 m per 20 m. Na deze stap kunnen de data worden gevisualiseerd om eventueel gebrek van de data te constateren. De data worden vervolgens vergeleken met de bestaande gegevens van bodemhoogtes om morfologische veranderingen te bepalen. Er wordt ook gekeken of de morfologische parameters van de intergtijdegebieden af te leiden zijn. De verwerking van de data is beschreven in hoofdstuk 2.

De nadere analyse gaat specifiek over de intergtijdegebieden en is beschreven in hoofdstuk 3. Naast de beschrijving van de methode van de analyse en de resultaten is ook ingegaan op

de nauwkeurigheden van de metingen en van de afgeleiden parameters. Verder worden ook de morfologische veranderingen van de intergetijdegebieden in de Waddenzee beschouwd op basis van historische gegevens, veldmetingen en modelresultaten. De nauwkeurigheden van de data, de morfologische veranderingen en de orde van grootte van de verwachte bodemdaling door gaswinning zijn samen beschouwd om tot een advies te komen over het inzetten van aanvullende lidar metingen voor de monitoring van effecten van bodemdaling.

Het advies en de belangrijkste bevindingen uit de analyse zijn samengevat in hoofdstuk 4.



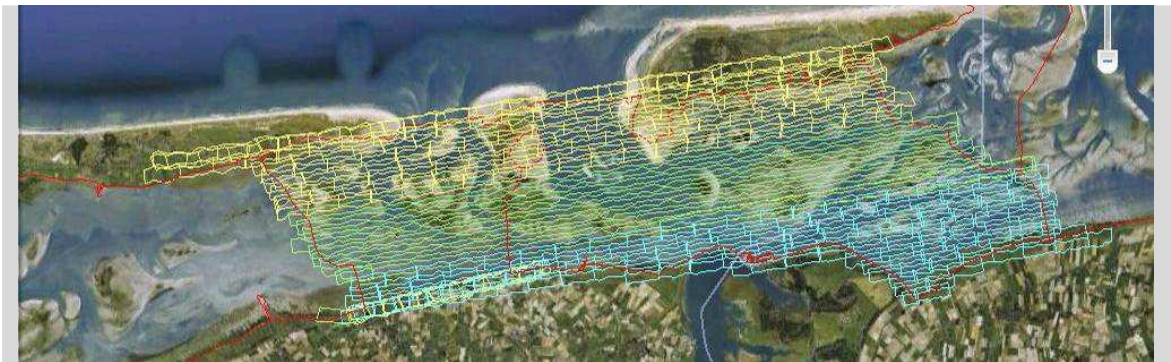
## 2 Verwerking van de data

### 2.1 Ingewonnen data

Behalve de lidar data worden ook de waterstandengegevens en de bestaande gegevens van bodemhoogtes verzameld en gebruikt bij de analyse.

#### **Lidar data**

De lidar data, ingewonnen met behulp van het FLI-MAP 1000 systeem, zijn aangeleverd door Fugro. De metingen zelf zijn uitgevoerd tijdens laagwater perioden op 25, 26 en 28 maart 2010. Figuur 2.1 geeft aan op welke dag welke gebieden gemeten zijn. Een gedetailleerde beschrijving van de uitvoering van de metingen en de eerste verwerking van de data.



*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).*

Fugro heeft de data geleverd aan Deltares in zowel ASCII als LAS bestanden. De ASCII bestanden bevatten de x-, y- en z-waarden, x en y geven horizontale positie aan in RD 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 laser data zijn aangeleverd in 335 bestanden. Elke bestand bevat de data van een blok van 1 x 1 km. De benamingen van de bestanden zijn afgeleid van het coördinaat die de linker onderhoek van de blok vertegenwoordigt.

#### **Waterstanden**

De waterstanden bij getijstations Nes en Schiermonnikoog, zijn ook ingewonnen op de dagen van de lidar metingen. (zie Fig.2.2). Het is belangrijk is om te weten dat de lidar metingen uitgevoerd zijn bij waterstanden lager dan -0.7 m NAP.

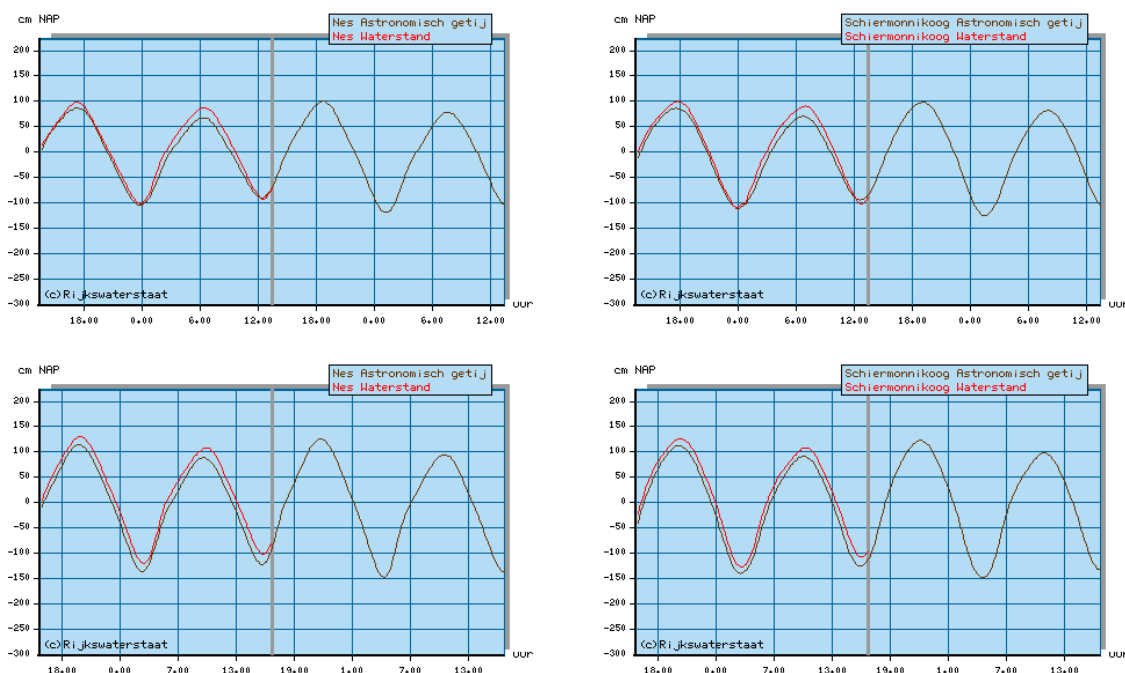


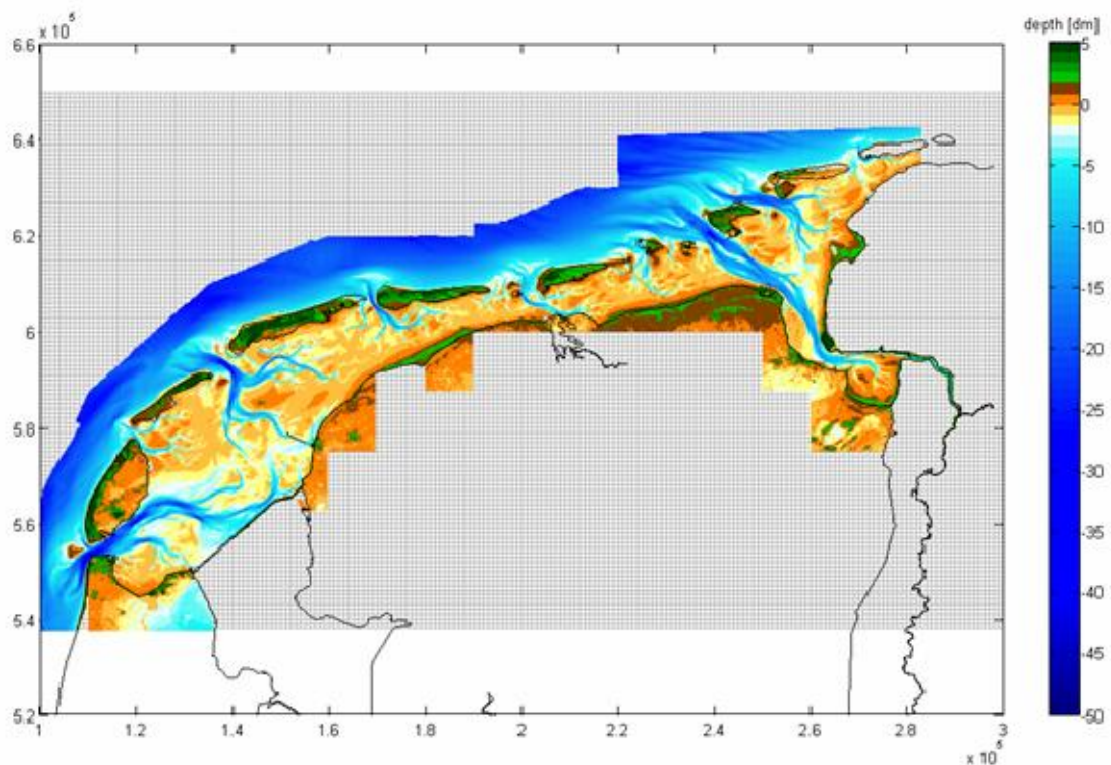
Fig.2.2 Waterstanden Bij Nes (linker panelen) en Schiermonnikoog (rechter panelen), op 26 (boven panelen) en 28 (beneden panelen) maart, 2010.

### Bestaande bodemhoogte-gegevens

Bestaande gegevens van bodemhoogtes, afkomstig uit o.a. lodingen en lidar van RWS, zijn verzameld om met deze recente lidar metingen te kunnen vergelijken. Figuur 2.3 laat de complete bathymetrie van de hele Nederlandse Waddenzee zien, samengesteld uit lodingen en lidar over de periode 2003-2008. Dit zijn de meest recente beschikbare gegevens.. De figuur laat ook zien voor welk gebied en in welke periode de gegevens gemeten zijn. Voor ons interesse gebied, het Friesche Zeegat zijn de vaklodingen uitgevoerd in 2006. De hogere delen van het gebied zijn aangevuld met gegevens uit lidar metingen van andere jaren (Zie Fig.2.3).

Oudere historische gegevens van bodemhoogtes in de Waddenzee zijn ook beschikbaar. Deze zullen niet worden gebruikt voor directe vergelijkingen met de lidar metingen van 2010, maar ze zullen wel worden gebruikt om een idee te krijgen van de morfologische ontwikkelingen in de Waddenzee.





## overzicht van de anciënniteit data

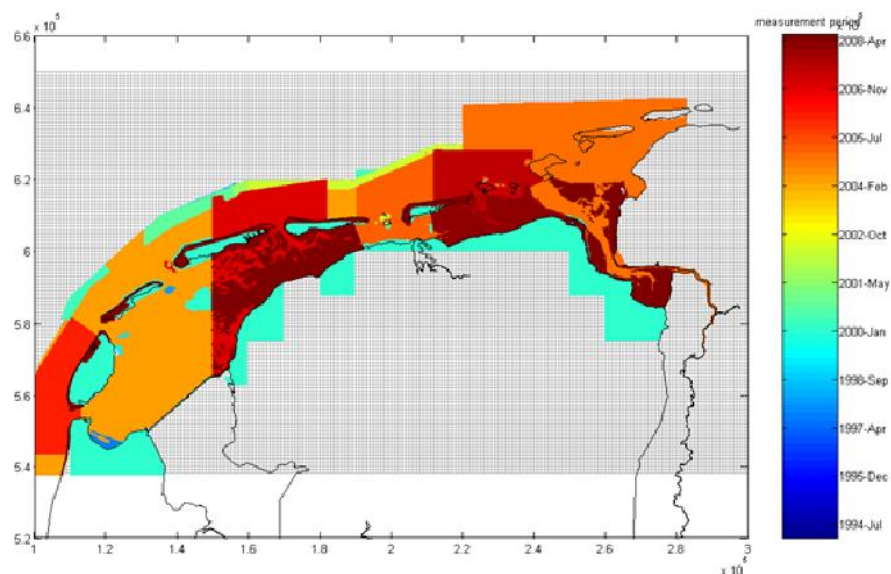


Fig.2.3 Samengestelde bodem voor de Nederlandse Waddenzee (boven) en de inwinningsdatum van de gebruikte gegevens (onder)

## 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 per 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 betreffende 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.
- 2 Visualiseren van de gegevens. Na stap 1 kunnen de gemeten bodemhoogtes worden gevisualiseerd in bijvoorbeeld contour plotten zoals Fig.2.4. Een aantal zaken valt dan meteen op:
  - De gegevens dekken niet het hele gebied. De witte vlekken zijn de plekken waar geen data gevonden zijn binnen minstens een cel van 20 m per 20 m. Dit kan komen doordat er in het betreffende plek 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 vluchtstroken suggereren dat deze plekken aan de rand van de vluchtstroken liggen.
  - De geulen in het gebied zijn duidelijk herkenbaar als gebieden met lage hoogtes (blauw deel van de figuur). Blijkbaar wordt de hoogte van het wateroppervlak in de geulen gemeten. Men kan ook zien dat de metingen bij verschillende waterstanden heeft plaatsgevonden (strepenpatronen in het blauw deel in de richting van vluchtstroken).
- 3 Verdere verwerking en analyse van de data. De resultaten van stap 1 worden ook als basis gebruikt voor de verdere verwerking en analyse, zoals het bepalen van relevante morfologische parameters en vergelijking met de bestaande gegevens. Bij de verdere verwerkingen en analyse worden de plekken zonder data zonodig aangevuld met de bestaande en meest recente gegevens.

**Opmerking:** De grid van 20 m per 20 m is gekozen omdat de bestaande Rijkswaterstaat hetzelfde grid hanteert. In principe kan men ook een fijnere grid gebruiken. Maar bij veel fijnere grid zal de nauwkeurigheid van de bepaalde bodemhoogte op de grid minder nauwkeurig worden, omdat de stochastische fout van de lidar meting dan zwaarder tellen door dat per gridcel minder meetpunten aanwezig zijn (zie hoofdstuk 3). Voor het bepalen van de geïntegreerde grootheden zoals areaal, hoogte en volume van gebieden boven een bepaalde hoogte in een vloedkom heeft de verdere verfijning van de grid weinige invloed.

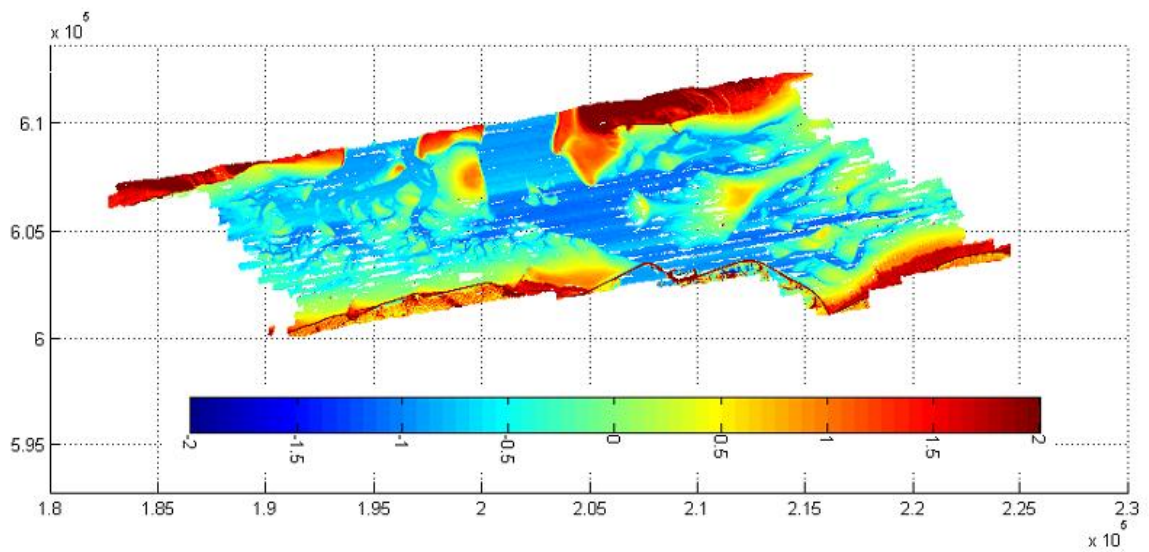


Fig.2.4 Visualiseren van de bodemhoogte gegevens op 20 m grid.

### 2.3 Morfologische parameters

Het is de bedoeling om de relevante morfologische parameters van het intergetijdengebied (platen) te bepalen aan de hand van de lidar data. Het betreffen plaatareaal, -hoogte en volume per vloedkom. Uit de beschrijving van de ingewonnen lidar data is echter al gebleken dat niet alle gebieden zijn gemeten bij dezelfde waterstand. De metingen, zelfs met deze moderne techniek, kosten tijd. Daardoor is het niet mogelijk het hele gebied te meten bij LW. In feite, de gehanteerde bovengrens van de waterstand van -0.7 m NAP is nog hoger dan het Gemiddelde Laag Water (GLW) in het gebied (zie Fig.2.5). Dit houdt dus in dat de metingen niet het hele intergetijdengebied kan bedekken. Het is dan ook onmogelijk gebleken de morfologische parameters van de platen te bepalen uit de lidar data.

Wij moeten daarom concluderen dat metingen met alleen lidar alleen informatie kunnen geven over het hogere deel van de platen. Zonder aanvullende metingen met lodingen is het niet mogelijk de grootte van de platen uitgedrukt in areaal, hoogte en volume te bepalen.

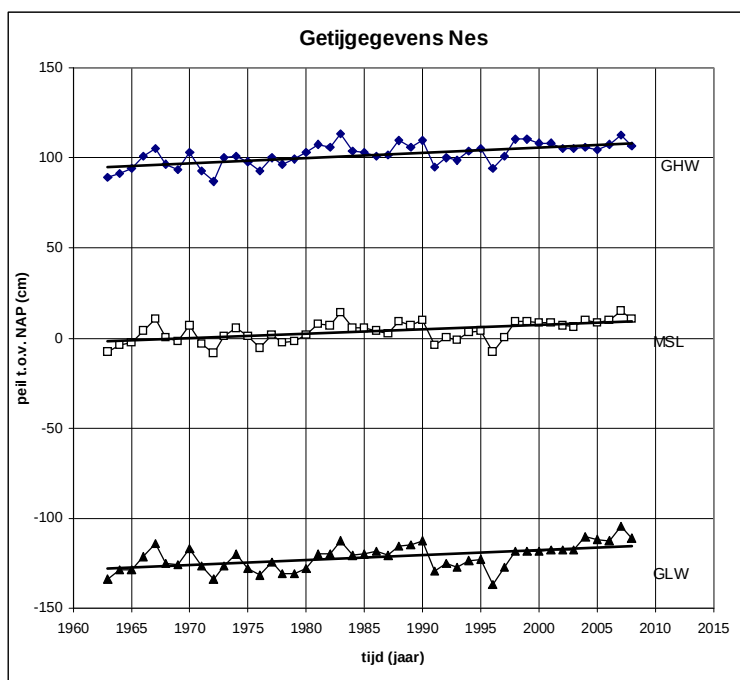


Fig.2.5 Getijgegevens Nes, verzameld binnen het kader van monitoring effecten bodemdaling door gaswinning op Ameland.

### 2.4 Morfologische veranderingen

De meest recente bestaande gegevens van de bodemhoogtes in dit gebied zijn uit 2006. Door deze af te trekken van de in 2010 gemeten bodemhoogtes ontstaat de sedimentatie – erosie patroon in de periode 2006 – 2010 (zie Fig.2.6). De geulen in het gebied zijn duidelijk herkenbaar als gebieden met extreme hoge ‘sedimentatie’. Dit komt door dat de lidar metingen in de geulen niet het bodemniveau, maar het waterniveau weergeven. Verder zien de patronen van veranderingen er logisch uit: Het is algemeen bekend dat de grootste veranderingen optreden rondom overgang van plaat naar geul, door geulmigratie. In Fig.2.6 is de geulmigratie echter alleen nog herkenbaar in gebieden van grote erosie (waar plaat geul wordt). De gebieden van grote sedimentatie (waar geul plaat wordt) zijn niet meer te

onderscheiden van de geulen zelf waar valse (grote) sedimentatie wordt berekend op deze manier (Zie Fig.2.7). Dit is een andere beperking van de metingen alleen met lidar.

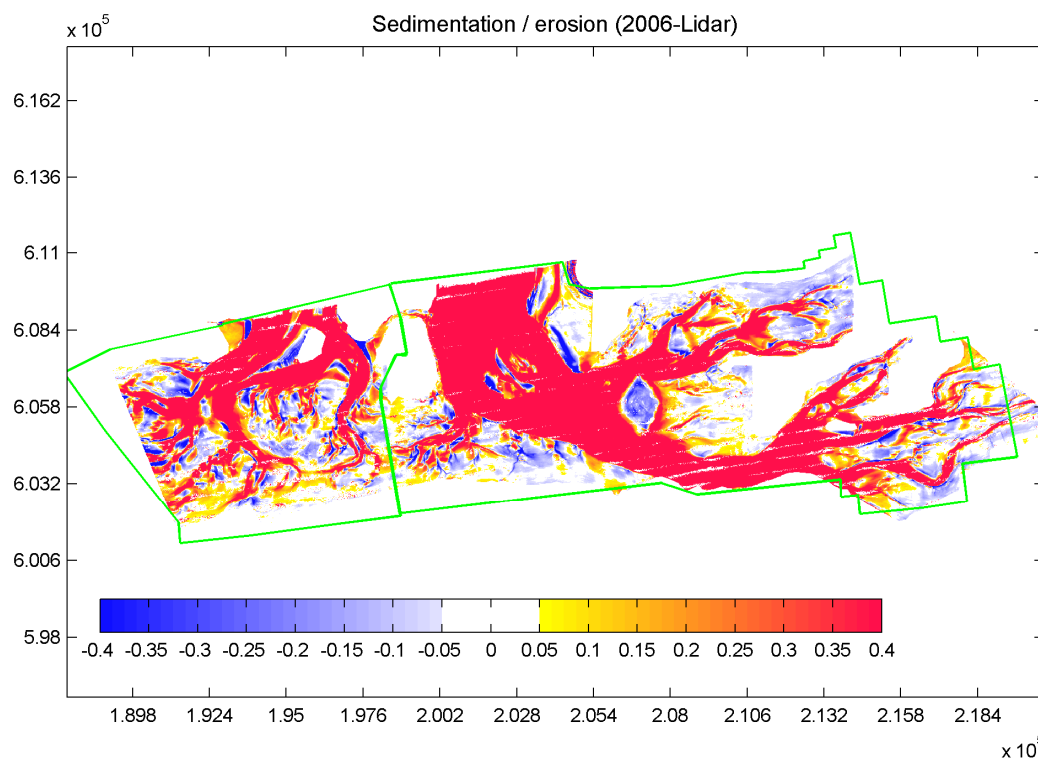


Fig.2.6 Sedimentatie (positief) – erosie (negatief) patronen afgeleid uit de dit keer gemeten bodemhoogtes en de bestaande gegevens van 2006.

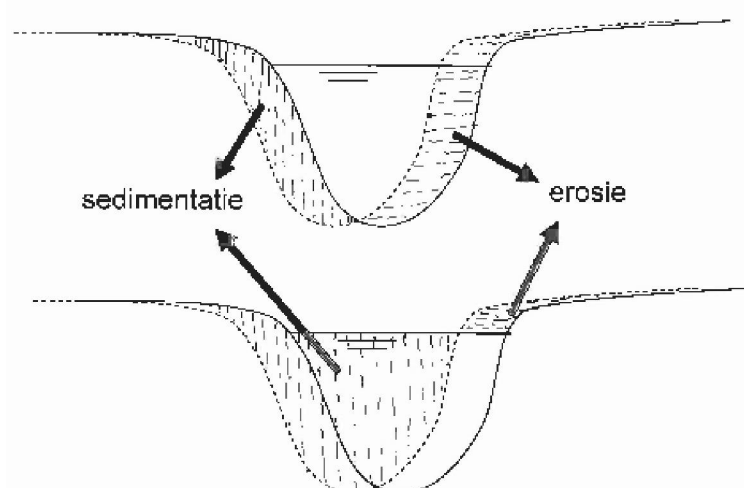


Fig.2.7 Schets veranderingen bij geulmigratie. Boven: werkelijke verandering, Onder: volgens lidar data

### 3 Analyse intergetijdengebieden

#### 3.1 Intergetijdengebied en methode van analyse

Intergetijdengebied in bijvoorbeeld de Waddenzee is per definitie het gebied dat droogvalt bij laagwater en overstroomd wordt bij hoogwater. Omdat het getij en dus laagwater en hoogwater voortdurend aan het veranderen is, is dit een rekbaar begrip. Daarom is het belangrijk altijd het bijbehorende getijdenframe (laag- en hoogwater, LW en HW) te noemen wanneer er gesproken wordt over de omvang van het intergetijdengebied. Zo kan er onderscheid gemaakt worden tussen het intergetijdengebied behorend bij een vast getijdenframe, bijvoorbeeld tussen gemiddeld LW en gemiddeld HW, en dat bij variërend getijdenframe. Het gemiddelde LW en het gemiddelde HW kunnen op de lange termijn ook variëren, door bijvoorbeeld zeespiegelstijging en/of door variatie van de getijslag zoals de 18.6 jarige cyclus (zie bijvoorbeeld Fig.2.5). Het intergetijdengebied met een vast getijdenframe verandert alleen als het bodemniveau verandert, terwijl het intergetijdengebied met een variërend getijdenframe verandert ook als het bodemniveau niet verandert.

In de huidige analyse is gekozen om de omvang van het intergetijdengebied te bepalen aan de hand van hypsometrische curve. Dit is voor een willekeurig deelgebied, bijvoorbeeld een vloedkom het horizontale oppervlak als functie van verticale coördinaat (niveau),  $A(z)$ . Het plaatareaal, of wel het oppervlak van het intergetijdengebied is dan per definitie:

$$A_f = A(\text{HW}) - A(\text{LW}) \quad (3.1)$$

Het plaatvolume is dan

$$V_f = A(\text{HW})H - \int_{\text{LW}}^{\text{HW}} A(z)dz \quad (3.2)$$

$H$  is de getijslag

$$H = \text{HW} - \text{LW} \quad (3.3)$$

De plaathoogte is gedefinieerd als

$$H_f = \frac{V_f}{A_f} \quad (3.4)$$

Soms praat men als relatieve plaatareaal en relatieve plaathoogte. Zij zijn als volgt gedefinieerd:

$$\text{Relatief plaatareaal} = \frac{A_f}{A(\text{HW})} \quad (3.5)$$

$$\text{Relatieve plaathoogte} = \frac{H_f}{H} \quad (3.6)$$

Op deze manier kan de omvang van de plaat worden bepaald voor een willekeurig getijdenframe. Voorwaarde is wel dat de data het gebied boven het gehanteerde LW volledig bedekt. In vorig hoofdstuk is echter al geconstateerd dat de lidar data zijn opgenomen bij waterstand lager dan -0.7 m NAP. Deze boven limiet is hoger dan LW van zelfs het gemiddelde getij. Daarom kan de omvang van de platen niet worden bepaald vanaf het LW. De hypsometrische curve bevat echter veel meer informatie, wat een vergelijking met een

andere dataset altijd mogelijk maakt. Beperking is dat men alleen het verschil tussen de twee datasets boven een bepaald niveau (theoretisch de hoogste waterstand gedurende metingen in het gebied) kan bepalen.

Er zijn, in 2010, plekken die niet gedekt zijn door de lidar data. Dit geldt ook voor de hoger gelegen gebieden. Bij het bepalen van de hypsommetrische curven worden deze plekken aangevuld met de RWS gegevens uit 2006. Dit is nodig om een vergelijking met de bestaande data mogelijk te maken.

### 3.2 Resultaten en nauwkeurigheid

Figuur 3.1 geeft de hypsommetrische curven van de twee vloedkommen, Pinkegat en Zoutkamperlaag, bepaald uit de huidige, 2010, lidar data en uit de RWS gegevens uit 2006, weer. Duidelijk is nu dat er weinige veranderingen zijn opgetreden in de hoger gelegen delen van de gebieden. In beide vloedkommen is er sprake van een kleine sedimentatie. Voor de lager gelegen gebieden, geven de lidar data geen betrouwbare informatie meer. De relatieve kleine veranderingen komen overeen met de verwachtingen vanwege de relatief korte periode. Dit geeft in ieder geval vertrouwen dat de metingen goed zijn uitgevoerd.

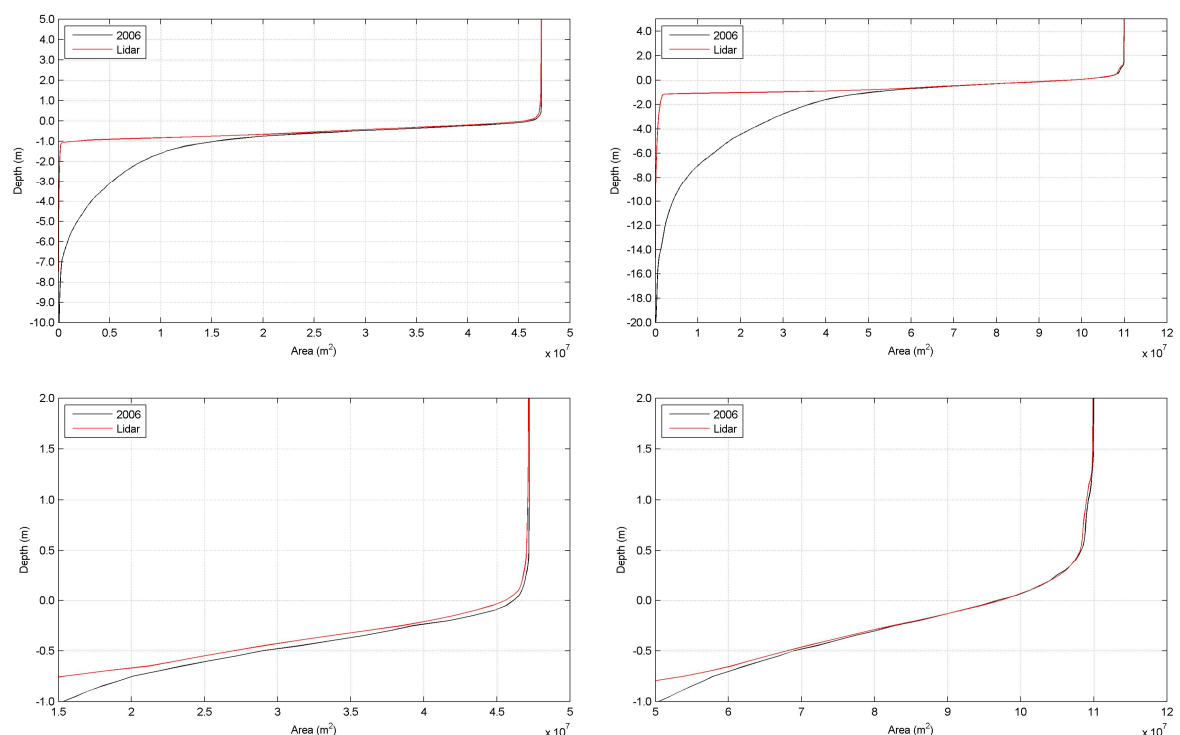


Fig.3.1 Hypsommetrische curven. Links: Pinkegat, Rechts: Zoutkamperlaag

#### Opmerking:

De hypsommetrische curven in Fig.3.1 geven kleinere totale oppervlakken van de vloedkommen dan in werkelijkheid. Dit komt doordat de 2006 data niet de gehele vloedkommen bedekt. Ten doel van de vergelijking hebben wij de 2006 data niet aangevuld met gegevens uit eerdere jaren.

Belangrijke vraag is nu hoe nauwkeurig de metingen zijn en hoe dit zich vertaalt naar de parameters die worden afgeleid van de geleverde lidar data.



Volgens Fugro (2010) hebben de gemeten hoogtes een theoretische fout (standaard afwijking) van 6.2 cm, bestaande uit een (maximale) systematische fout van 3.5 cm en een stochastische fout van 2.7 cm. Controle met 40 terrestrisch gewaterpaste punten leert dat de fouten allemaal kleiner dan 3 cm zijn. Dit bevestigt de claims over de fouten. Een onderscheid tussen systematische en stochastische fouten is hierbij echter niet te geven. Rijkswaterstaat (Brand e.a., 2003) hanteert meer categorieën van fouten:

- 1 fout per punt (door meetonzekerheid van de laserafstandmeter),
- 2 fout per gebied (van ongeveer 100 m x 500 m) gemeten met één GPS-waarneming (door ruis in GPS-waarneming),
- 3 fout per strook (door fouten in GPS- en INS-sensoren),
- 4 fout voor heel gebied (door onzekerheid in NAP-referentiegebieden).

Duidelijk is dat wat Fugro (2010) systematische fout noemt overeenkomt met fout (4), i.e. voor het hele gebied. Niet geheel duidelijk is of de door Fugro (2010) genoemde stochastische fout alle andere 3 soorten fouten vertegenwoordigen. In dit rapport wordt er vanuit gegaan dat het zo is, hoewel de gegeven waarde relatief klein is t.o.v. de waarden die Brand e.a. (2003) noemen. Fugro (2010) beschrijft de overlapcontrole die in feite een indicatie geeft over fout (3), hoewel de andere twee soorten fouten (1) en (2) ook invloeden hebben. Na correctie blijken de verschillen tussen twee stroken bij alle overlappen binnen 5 cm (standaard afwijking) te liggen. Dit lijkt strijdig te zijn met de claim over de stochastische fout van 2.7 cm. Theoretisch moet de standaard afwijking van de verschillen namelijk dan kleiner zijn dan  $\sqrt{2} * 2.7 \approx 3.9$  cm. De genoemde waarde van de systematische fout zit wel in de beurt van de waarden genoemd in Brand e.a. (2003). Een andere indicatie van de mogelijke grootte van de systematische fout bij dergelijke metingen is gegeven door Kinneging (2010), die een vergelijking tussen lidar metingen en echolodingen maakt voor eenzelfde gebied. De verschillen tussen de twee metingen blijken een samenstelling van twee verdelingen te vertonen: een smalle piek (bij verschil van ongeveer 2 cm) en een lage brede verdeling. Het verschil van ongeveer 2 cm dat voor grootste deel van het gebied geldt kan worden beschouwd als een trekking van het (stochastische) verschil door het feite dat beide methode van metingen een systematische fout bevatten.

Hoe de door Fugro (2010) genoemde stochastische fout wordt geïnterpreteerd heeft wel invloed op de berekening van fouten in de afgeleide grootheden / parameters. Neem bijvoorbeeld de fout van de bodemhoogtes op 20 m per 20 m grid, zoals is afgebeeld in Fig.2.4. Als de genoemde fout beschouwd wordt als stochastische per meetpunt, dan heeft dit nauwelijks invloed. De fout van de bodemhoogte op een grid wordt dan als volgt berekend:

$$\sqrt{\frac{2.7^2}{N} + 3.5^2}$$

Waarbij N het aantal meetpunt een grid-cel (van 400 m<sup>2</sup>) bevat. Fugro (2010) noemde een punt dichtheid op de plaat van 3 – 5 punten per m<sup>2</sup>. Dit impliceert dat N een waarde heeft van 1200 – 2000. Dan draagt de stochastische fout nauwelijks bij aan de fout van de gemiddelde waarde. Maar als de genoemde stochastische fout voornamelijk uit foutsoorten (2) en (3) bestaat, dan geldt dat dit per grid-cel zich hetzelfde gedraagt als de systematische fout. De door Fugro (2010) genoemde totale fout van 6.2 cm geldt dan ook voor de bodemhoogte op elk gridpunt. Beide beschouwde gevallen zijn extreem. Daarom kunnen wij zeggen dat de fout van de bodemhoogtes op de 20 m per 20 m grid tussen 3.5 en 6.2 cm is. Bij de ondergrens is het voornamelijk een systematische fout (constant in het hele gebied) en bij de bovengrens bestaat het ook uit een deel stochastische fout van 2.7 cm.

Voor de berekende sedimentatie – erosie zoals afgebeeld op Fig.2.6 geldt

$$\sigma_{\Delta z} = \sqrt{\sigma_{z2006}^2 + \sigma_{z2010}^2}$$

Als de twee metingen uit 2006 en 2010 even nauwkeurig zijn dan is de fout  $\sqrt{2}$  keer zo groot als de fout van de bodemhoogte, dus tussen 5 en 9 cm.

Eerder is al uitgelegd dat het niet mogelijk is de omvang van de platen te bepalen uit de lidar metingen alleen. Daarom wordt een beschouwing gemaakt van de nauwkeurigheden van parameters die de omvang van gebieden boven een bepaald niveau (bijvoorbeeld -0.5 m NAP) binnen een vloedkom gegeven. Voor de gemiddelde hoogte van zo een gebied geldt dat de fout praktische gelijk is aan de systematische fout van de lidar metingen (dus 3.5 cm), omdat de bijdrage van de stochastische fout nihil is door middeling over een groot aantal punten. De fout van het oppervlak van het gebied boven een bepaald niveau kan worden geschat als de fout in deze hoogte maal de helling van de hypsommetrische curve op dit niveau:

$$\sigma_A = \frac{dA}{dz} \sigma_h \quad (3.7)$$

Ook hier kan voor  $s_h$  de systematische fout van de lidar metingen worden gebruikt. Het gebied in een vloedkom rondom een bepaald niveau bevat nog steeds een groot aantal meetpunten. Voor de fout in het (sediment) volume boven een bepaald niveau geldt

$$\sigma_V = A \sigma_h \quad (3.8)$$

Als voorbeelden worden de waarden voor de twee vloedkommen bij -0.5 m NAP bepaald en gegeven in de volgende tabel. Aangenomen is dat alle gegevens met waarden boven -0.5 m NAP bodemhoogte (en dus geen water) weergeven.

*Tabel 3.1 Omvang van gebieden boven -0.5 m NAP in de twee vloedkommen en de bijbehorende fouten*

|                     | Pinkegat |         |           | Zoutkamperlaag |         |           |
|---------------------|----------|---------|-----------|----------------|---------|-----------|
|                     | waarde   | fout    | Rel. fout | waarde         | fout    | Rel. fout |
| A (m <sup>2</sup> ) | 20240400 | 1411480 | 7%        | 41964000       | 1874600 | 4%        |
| V (m <sup>3</sup> ) | 5371130  | 708414  | 13%       | 17593160       | 1468740 | 8%        |
| h (m)               | 0.27     | 0.035   | 13%       | 0.42           | 0.035   | 8%        |

Opmerkingen over meetfouten:

- Voor gebieden met vegetatie is de nauwkeurigheid van lidar metingen lager (Fugro, 2010). Hieraan wordt voorlopig geen aandacht besteed, omdat ons interesse gebied weinig vegetatie bevat.
- Ook de kleine fouten in de x- en y-coördinaten van de punten zijn buiten beschouwing gelaten, omdat dit weinig effect heeft op de fouten van de beschouwde grootheden.

### 3.3 Morfologische veranderingen

Om een idee te krijgen over de morfologische veranderingen van de Wadplaten worden de historische gegevens van de bodemhoogtes in de Nederlandse Waddenzee vanaf 1926 bekeken. Hierbij maken wij gebruik van de hypsommetrische curven die eerder door

Rijkswaterstaat voor de verschillende bekkens zijn bepaald (zie Elias e.a., 2006). Figuur.3.2 laat de beschikbare hypsommetrische curven van het Friesche Zeegat (i.e. Pinkegat + Zoutkamperlaag) zien. Dezelfde data zijn ook voor Marsdiep, Eierlandsegat, Vlie en Amlanderzeegat beschikbaar. Uit deze data kunnen de omvang van het intergetijdengebied in de verschillende bekkens worden bepaald (zie Fig.3.3). Hierbij is een vast getijframe per bekken gebruikt, met NAP als middenstand en gemiddelde getijslag. Voor het Friesche Zeegat resulteert dit in LW en HW van respectievelijk -1.1 m en +1.1 m NAP. Duidelijk is te zien dat de veranderingen zowel trend als fluctuaties in de tijd vertonen. Alle bekkens tonen bijvoorbeeld een toenemende plaathoogte op de lange-termijn. Deze lange-termijn trend kan worden beschouwd als response van het systeem op de zeespiegelstijging en op de menselijke ingrepen in het verleden zoals de afsluitingen van de Zuiderzee en van de Lauwerszee.

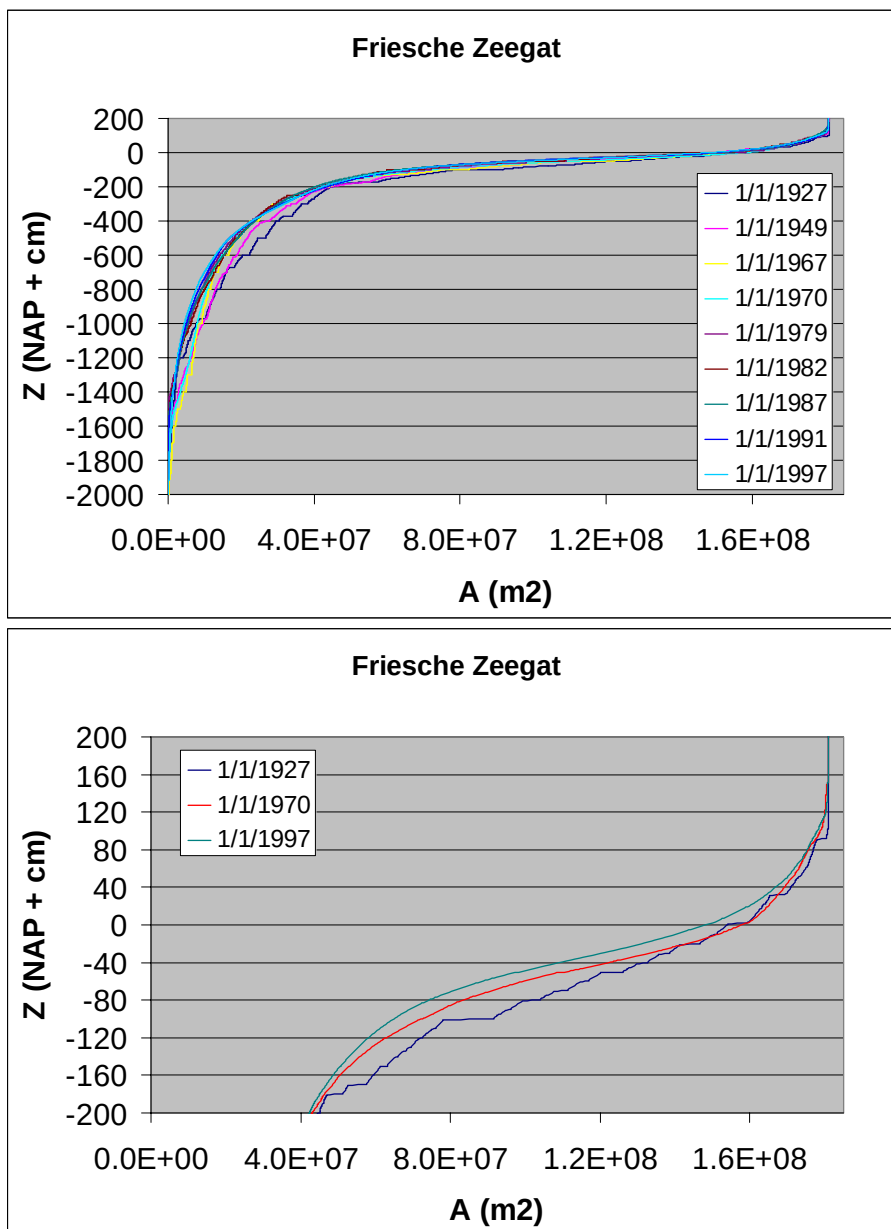


Fig.3.2 Hypsommetrische curven van het Friesche Zeegat. Boven: alle data. Onder: 3 jaar en ingezoomd rondom NAP

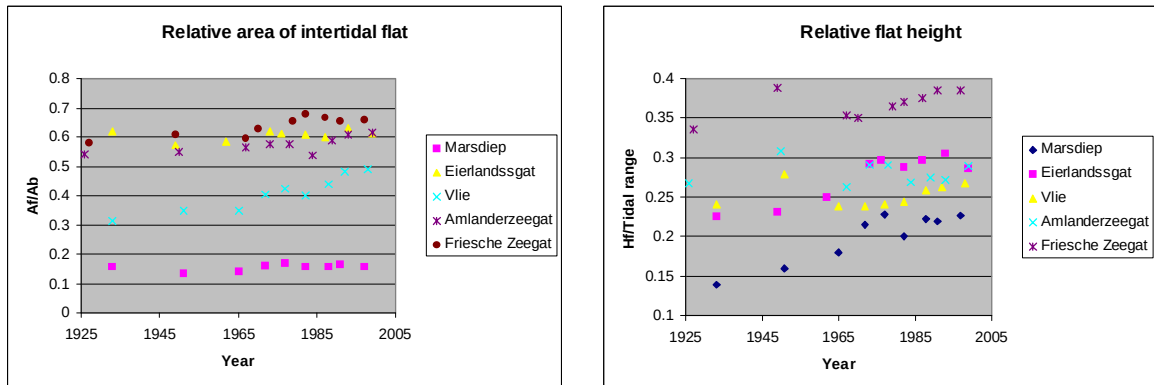


Fig.3.3 Relatief plaat areaal en relatieve plaathoogte in de Nederlandse Waddenzee

Bovenop de lange-termijn trend vertonen de veranderingen ook fluctuaties (Fig.3.3). Deze fluctuaties kunnen een gevolg zijn van de fouten in de data, maar kunnen ook echte veranderingen in de natuur zijn. Morfologische veranderingen in de Waddenzee zijn aangedreven door stromingen en golven, die bepaald worden door getij, wind, etc.. De aandrijvingen zijn niet constant maar bevatten allerlei fluctuaties op verschillende tijdschalen. Het is dan logisch dat de morfologische veranderingen ook fluctuaties vertonen. Als voorbeeld toont Fig.3.4 de gemodelleerde fluctuaties van plaatvolume in de Pinkegat onder invloed van de 18.6 jarige cyclus in de getijslag, zoals gerapporteerd door Wang en Eysink (2005). Men moet zich realiseren dat dit maar één van de vele soorten fluctuaties is.

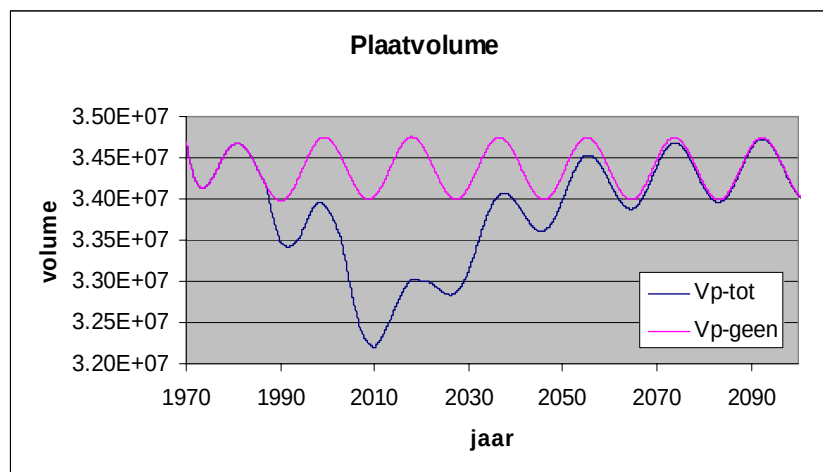


Fig.3.4 Gemodelleerde ontwikkeling van plaatvolume in Pinkegat (Wang en Eysink, 2005)

Figuur 3.5 laat zien dat de fluctuaties van de veranderingen op wadplaten niet alleen theoretisch zijn, maar ook werkelijk kan optreden. Dit figuur laat zien de gemeten veranderingen van het bodemniveau op een punt in de buurt van Ameland. Het betreffen de resultaten van Spijkermetingen uitgevoerd door het Natuurcentrum Ameland binnen het kader van monitoring effecten bodemdalingen door gaswinning op Ameland. Spijkers (ankers) worden ingegraven onder de bodem, en op elke spijker een touw is vastgebonden. Door metingen van de lengte van de touwen boven de plaat worden de veranderingen van het

bodemniveau nauwkeurig bepaald. De metingen laten duidelijk zien dat fluctuaties van verschillende frequenties optreden bovenop de lange-termijn trendmatige veranderingen.

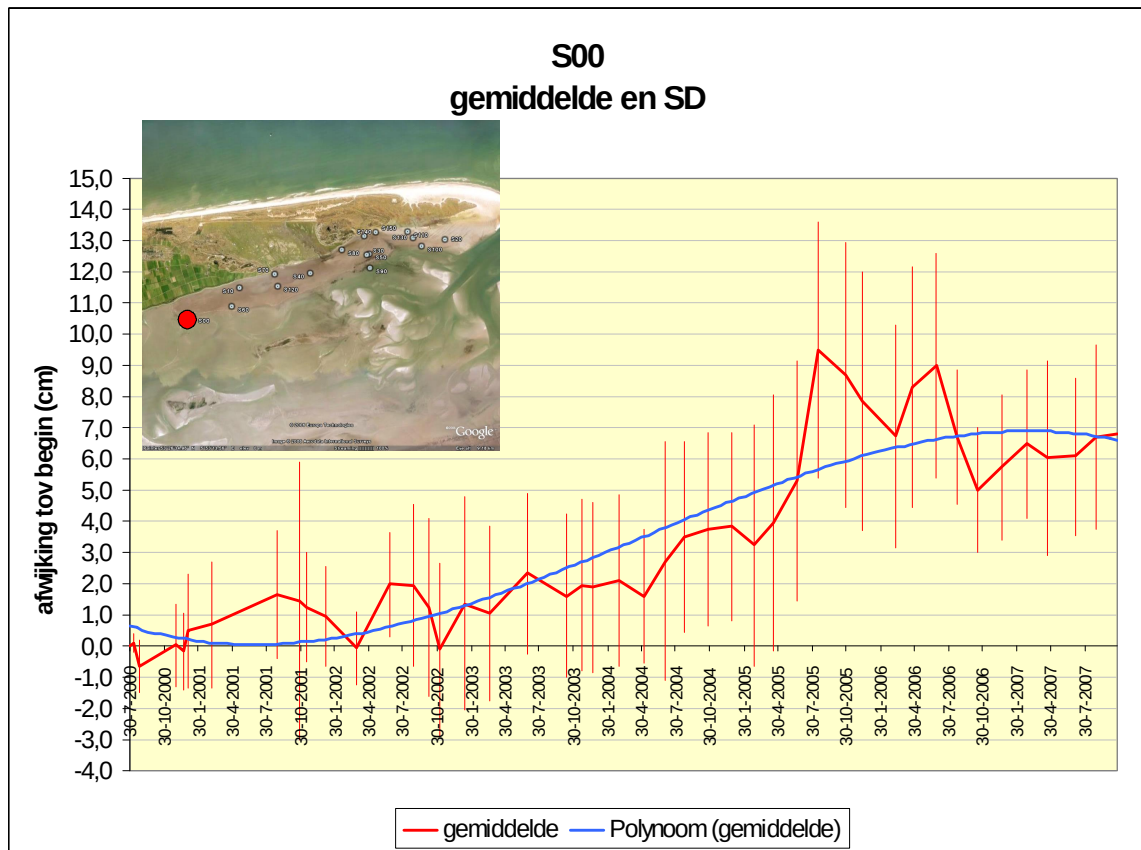


Fig.3.5 Gemeten bodemniveau veranderingen met spijkermetingen

### 3.4 Evaluatie toepassing Lidar voor monitoring bodemdaling

Lidar data geeft hoge resolutie informatie over de morfologie. Dit is ook gebleken uit de huidige lidar opname in maart 2010. Op de droge plaat bevat de aangeleverde data 3 tot 5 punten per  $m^2$ . Voor morfologisch onderzoek kan zo een dataset erg interessant zijn. Echter voor de doeleinden in dit project moeten wij constateren dat lidar data alleen niet voldoende zijn om de omvang van de wadplaten te bepalen. Het is ook niet mogelijk gebleken de relevante morfologische parameters, het areaal, het volume en de hoogte van de intergetijdengebieden per vloedkom te bepalen uit de lidar data. De reden is dat ook lidar metingen veel acquisitie tijd kosten en kunnen daarom niet alleen tijdens extreme lage waterstand worden uitgevoerd. De huidige metingen zijn uitgevoerd in drie dagen in een springtij periode. Op elke dag worden de metingen gedaan tijdens de laagwaterperiode overdag. De metingen zijn uitgevoerd bij waterstanden niet hoger dan -0.7 m NAP. Het gemiddelde laagwater in het gebied is echter rond -1.1 m NAP. Daarom kan niet het gehele intergetijdengebied worden gemeten. De conclusie is dus:

*Lidar metingen alleen leveren niet voldoende informatie op om de morfologische parameters van het intergetijdgebied te bepalen. Combinatie met lodingen is noodzakelijk om de omvang van het intergetijdgebied te meten.*

Omdat de omvang van het intergetijdegebied niet kan worden bepaald op basis van lidar metingen afzonderlijk, kan er ook geen beschouwing worden gedaan over de nauwkeurigheid daarvan.

De lidar meting verschaft wel informatie over hoger gelegen deel van de wadplaten. Dit kan het best uitgedrukt worden met behulp van de hypsommetrische curve per interesse gebied, bijvoorbeeld een vloedkom. Aan de hand van zo een curve kan het areaal, het sedimentvolume en de gemiddelde hoogteligging van het gebied boven een bepaald niveau (dat hoger is dan de hoogste waterstand tijdens de metingen) in het interesse gebied worden bepaald. Hiervan is de nauwkeurigheid wel te geven (paragraaf 3.2). De conclusies zijn:

- De fout van de gemiddelde hoogteligging is praktisch gelijk aan de systematische fout van de lidar metingen, onafhankelijk van de kenmerken van het gebied zolang het veel grotere afmetingen heeft dan de breedte van de vluchtstroken tijdens de lidar opname. Voor de huidige metingen is dit gespecificeerd als 3.5 cm.
- De fouten van het areaal en het sedimentvolume zijn wel afhankelijk van de kenmerken van het gebied en kunnen worden afgeleid vanuit de fout van de hoogteligging (zie 3.2).

De fout in de hoogteligging kan dus het best worden vergeleken met de morfologische veranderingen en bodemdalingen om tot advies te komen over gebruik van lidar metingen bij het monitoren van effecten van bodemdalingen.

De morfologische veranderingen zijn beschreven in 3.3. De volgende constatering is van belang voor de beschouwing (zie fig.3.3):

- De snelheid van de trendmatige veranderingen van de plaathoogte is zodanig dat de verandering tussen twee metingen (tegenwoordig ieder 6 jaar) van eenzelfde orde is, als de meetfout (voor verschil tussen twee metingen  $\sqrt{2} * 3.5 \approx 5$  cm).
- Mede door de fluctuaties bovenop de trendmatige veranderingen kan de trend en een eventuele trendverandering pas na 3 tot 4 meetperioden worden bepaald.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat *voor het bepalen van morfologische veranderingen het weinig zin heeft veel vaker te meten dan de huidige meetpraktijk van Rijkswaterstaat van eens in 6 jaar, en dat 3 tot 4 meetperioden nodig zijn om eventuele trendbreuk in de veranderingen te kunnen meten.*

De maximale te verwachten bodemdalingen door gaswinning op Ameland en in de Waddenzee is in de orde van 10 cm (zie bijvoorbeeld Wang en Eysink, 2005). Gemiddeld per vloedkom is het niet meer dan de meetfout van bodemniveaoverschil tussen twee metingen (~5 cm). Dus zelfs als er geen morfologische veranderingen gaan optreden zal het heel moeilijk worden om met lidar metingen de bodemdalingen op de wadplaat te meten. Uit alle voorgaande studies met betrekking tot bodemdalingen is gebleken dat bodemdaling leidt tot extra sedimentatie, wat het effect van de bodemdaling nog moeilijker meetbaar maakt. Daarom wordt geconcludeerd dat *lidar metingen niet effectief zijn voor de monitoring van effecten van bodemdalingen door gaswinning.*

Op basis van de voorgaande conclusies komen wij tot het volgende advies met betrekking tot gebruik van lidar metingen voor monitoring van effecten van bodemdalingen door gaswinning.

- Voer geen extra lidar metingen uit, maar verzamel de data van de regulier metingen door Rijkswaterstaat van eens in 6 jaar. Deze metingen bestaan uit (echo-) lodingen en lidar opnames. Men kan overwegen naast de data op de 20 m

per 20 m grid ook de lidar data zelf te verzamelen en te analyseren. De lidar data hebben veel hogere ruimtelijke resolutie.

- In combinatie kan men overwegen extra waterpassingen uit te voeren op bepaalde delen van de wadplaten. Deze metingen leveren data met lagere ruimtelijke resolutie en dekking, maar hogere temporele resolutie, en zijn dus complementair aan de lidar data.



## 4 Conclusies en aanbevelingen

### 4.1 Samenvatting conclusies

De data verzameld door Fugro tijdens de lidar metingen in het Friesche Zeegat (Pinkegat en Zoutkamperlaag) eind maart 2010 zijn verwerkt en geanalyseerd. Samengevat zijn de volgende conclusies getrokken:

- De metingen zijn uitgevoerd bij waterstand van maximaal -0.7 m NAP. De data bevat daarom niet alle informatie over de morfologie van het intergetijdegebied.
- Uit de data kunnen de beoogde morfologische parameters van de wadplaten niet worden bepaald. Dit zal ook gelden voor andere lidar data omdat ook lidar metingen tijd kosten. Voor het bepalen van de omvang van het intergetijdegebied is de combinatie met gegevens uit lodingen noodzakelijk.
- De lidar meting bevat wel informatie over de hoger gelegen delen van de wadplaten. De informatie kan het best worden uitgedrukt in een hypsommetrische curve per interesse gebied (bijvoorbeeld een vloedkom).
- Door de lidar meting te vergelijken met de bestaande gegevens van 2006 wordt een beeld gekregen van de morfologische veranderingen in de periode 2006-2010. De boven genoemde beperking van de data is wel van invloed hierop.
- De data bevatten fouten bestaande uit systematische en stochastische fouten. De systematische fout is door Fugro gespecificeerd als 3.5 cm. Volgens Fugro is de stochastische fout 2.7 cm, maar het is niet duidelijk welke foutcomponenten dit bevat. Vergeleken met fouten genoemd in literatuur lijkt de genoemde stochastische fout aan de lage kant. Voor de afgeleide grootheden is de systematische fout veel belangrijker omdat de stochastische fout wordt uitgemiddeld als een groter gebied als een vloedkom wordt beschouwd.
- De fout van de gemiddelde hoogteligging van een (hoger gelegen) deel van een vloedkom is praktisch gelijk aan de systematische fout van de lidar metingen, onafhankelijk van de kenmerken de vloedkom. De fouten van het areaal en het sedimentvolume in hetzelfde deel zijn wel afhankelijk van de kenmerken van het gebied en kunnen worden afgeleid vanuit de fout van de hoogteligging.

De morfologische veranderingen op de wadplaten en bodemdalingen door gaswinning zijn beschouwd in relatie tot de fouten in lidar data. De volgende conclusies zijn getrokken:

- De snelheid van de trendmatige veranderingen van de plaat hoogte is zodanig dat de verandering tussen twee metingen (tegenwoordig ieder 6 jaar) is in dezelfde orde als de meetfout (voor verschil tussen twee metingen  $\sqrt{2} * 3.5 \approx 5$  cm). Voor het bepalen van morfologische veranderingen heeft het weinig zin veel vaker te meten dan de huidige meetpraktijk van Rijkswaterstaat van eens in 6 jaar.
- Mede door de fluctuaties bovenop de trendmatige veranderingen kan de trend in veranderingen pas na 3 tot 4 meet perioden worden bepaald. Drie tot vier meetperioden zijn nodig om eventuele trendbreuk in de veranderingen te kunnen meten.
- De te verwachten bodemdalingen door gaswinning op Ameland en in de Waddenzee zijn in dezelfde orde van de meetfout van bodemniveaueverschil tussen twee metingen (~5 cm). Lidar metingen, zoals in deze pilot zijn uitgevoerd, zullen niet effectief zijn voor de monitoring van effecten van bodemdalingen door gaswinning.

## 4.2 Aanbevelingen

Met betrekking tot gebruik van lidar metingen voor de monitoring van effecten bodemdalingen door gaswinning worden de volgende aanbevelingen gedaan:

- Voer geen extra lidar metingen uit, maar verzamel de data van de regulier metingen door Rijkswaterstaat van eens in 6 jaar. Deze metingen bestaan uit (echo-) lodingen en lidar opnames. Men kan overwegen naast de data op de 20 m per 20 m grid ook de lidar data zelf te verzamelen en te analyseren. De lidar data hebben veel hogere ruimtelijke resolutie.
- In combinatie kan men overwegen extra waterpassingen uit te voeren op bepaalde delen van de wadplaten. Deze metingen leveren data met lagere ruimtelijke resolutie en dekking, maar hogere temporele resolutie, en zijn dus complementair aan de lidar data.

## 5 Referenties

- Elias, E., M. van Koningsveld, P.K. Tonnon en Z.B. Wang, 2006, Sediment budget analysis and testing hypotheses for the Dutch coastal system, WL | Delft Hydraulics, report Z4100.
- Fugro, 2010, Areal Mapping Survey 2010, Waddengebied Ameland en Schiermonnikoog, Projectrapportage 501.11624.
- 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. en W.D. Eysink, 2005, Abiotische effecten van bodemdaling in de Waddenzee doorgaswinning, WL|Delft Hydraulics, Rapport Z3995.