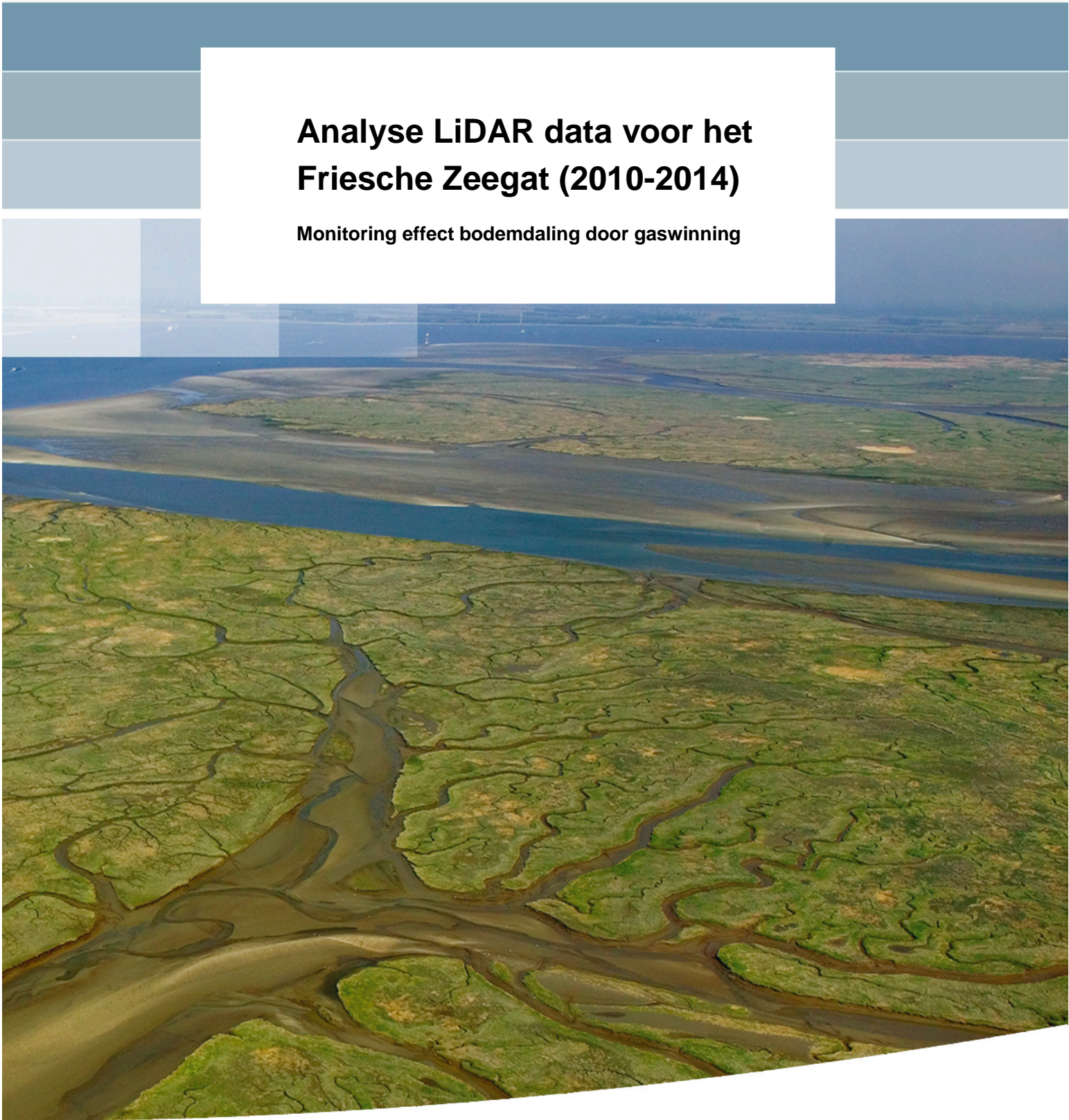


**Analyse LiDAR data voor het
Friesche Zeegat (2010-2014)**

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning



Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2014)

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning

ir. J. Vroom
dr.ir. J. Beekhuizen

1210543-000

Titel

Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2014)

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.	1210543-000	1210543-000-ZKS-0003	58

Trefwoorden

LiDAR data, Waddenzee, bodemdaling, gaswinning, Friesche Zeegat, RGB-waarden, morfologie, hypsometrische curves



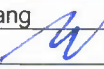
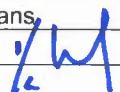
Samenvatting

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

Het doel van deze studie is het in kaart brengen van de morfologische ontwikkelingen van de wadplaten in het Friesche Zeegat sinds 2010. Hierbij gaat de interesse specifiek uit naar de langjarige trend van de variatie in wadplaathoogte en totaal oppervlak droogvallend wad.

De belangrijkste uitkomst van deze analyse is dat er nog geen conclusies getrokken kunnen worden over het effect van bodemdaling op de wadplaathoogte omdat a) de verschillen tussen de zeven geanalyseerde LiDAR opnames klein zijn ten opzichte van de fout in de data zoals aangegeven door Fugro, en b) de meetfrequentie en duur van LiDAR opnames niet representatief zijn voor de tijdschaal waarop deze langjarige trend zich uit. Dit is in lijn met de eerdere analyses in Cronin en Wang (2012), Elias et al. (2013) en Arentz en Vroom (2014).

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf Review	Paraaf Goedkeuring	Paraaf
1.0	dec. 2014	ir. J. Vroom		prof.dr.ir. Z.B. Wang	drs. F.M.J. Hoozemans
1.2	jan. 2015	ir. J. Vroom			

Status

definitief

Inhoud

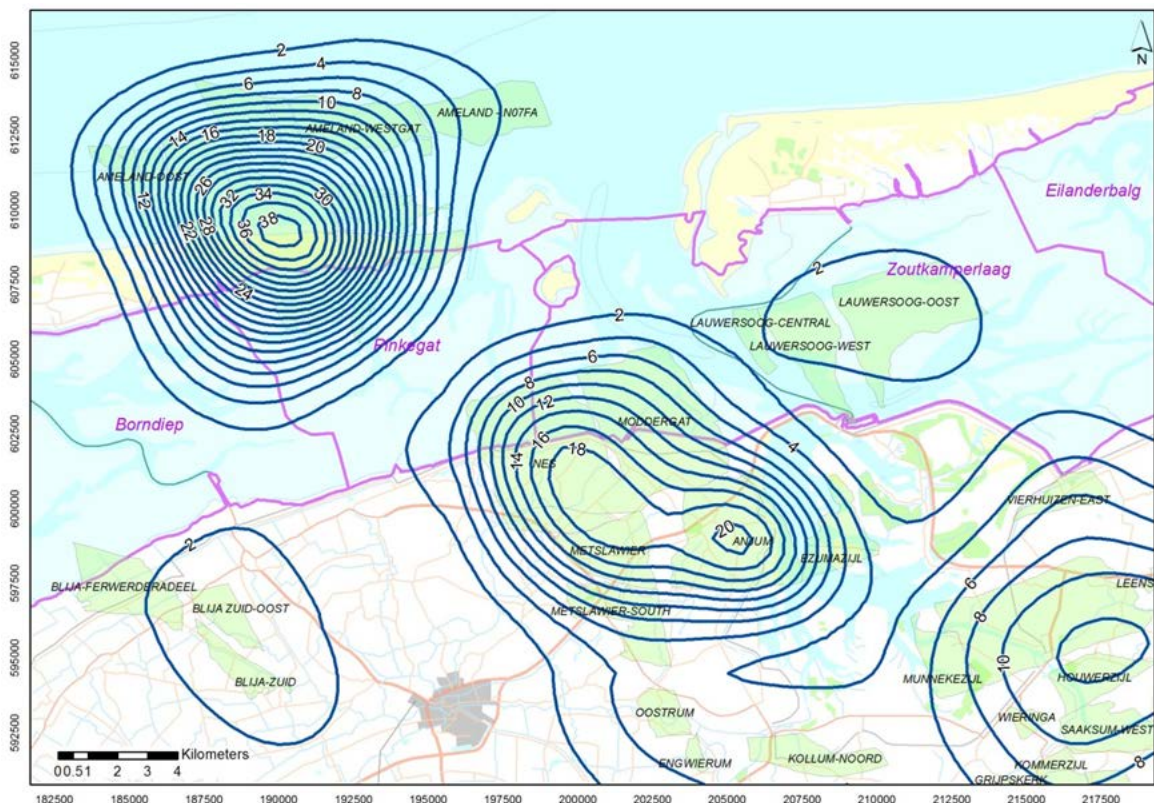
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Analyse LiDAR data	2
1.3 Leeswijzer	2
2 Aanpak	3
3 Beschrijving en verwerking van de LiDAR data	5
3.1 Algemeen	5
3.2 Meetfout	6
3.3 Beschrijving	7
3.3.1 Voorjaar 2014	8
3.3.2 Najaar 2014	8
3.4 Levering	9
3.5 Verwerking	10
3.6 Bodemkaarten	11
4 Erosie en sedimentatie	17
4.1 Erosie/sedimentatiekaarten	17
4.2 Erosie/sedimentatiesnelheden	24
5 Analyse per deelgebied	31
5.1 Analyse kombergingsgebieden	31
5.2 Analyse deelgebieden	36
6 Conclusies en Aanbevelingen	45
6.1 Conclusies	45
6.2 Aanbevelingen	46
7 Referenties	47
 Bijlage(n)	
A Classificatie van wad en water met behulp van kleurinformatie LiDAR	A-1
A.1 Introductie	A-1
A.2 Methode	A-1
A.3 Resultaten	A-3
A.4 Discussie	A-5
A.5 Conclusie en aanbevelingen	A-6
B Waterstandsverhang in het Friesche Zeegat	B-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert een aantal aardgasvelden in het Waddengebied, zie Figuur 1.1. De gaswinning bij Ameland is gestart in 1986, en sinds 2007 zijn ook drie velden in het Waddengebied (Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen) in gebruik. Als gevolg van de gaswinning kan bodemdaling optreden, die volgens voorspellingen aan het aardoppervlak in het Friesche Zeegat (komberging Zoutkamperlaag en Pinkegat) maximaal enkele millimeters per jaar bedraagt. In hoeverre de wadplaten kunnen meegroeien met bodemdaling (en zeespiegelstijging), hangt af van de bodemdalingssnelheid (of relatieve zeespiegelstijging) en de beschikbaarheid van sediment.

Bij de uitgifte van de vergunning voor gaswinning is er een monitoringverplichting opgenomen. Het doel van het monitoringprogramma van de NAM is om vast te stellen of er een effect van de gaswinning is op de abiotiek (bodemdaling) en de biotiek (habitattypen en doelsoorten, m.n. vogels). In deze rapportage wordt er gekeken of er morfologische veranderingen zijn opgetreden als gevolg van de gaswinning.



Figuur 1.1 Voorspelde ruimtelijke verdeling van de bodemdaling [in cm] in 2050, volgens de prognose in de Meet en Regelcyclus rapportage 2012 (Wang, 2013).

1.2 Analyse LiDAR data

Sinds 2010 worden door Fugro in opdracht van de NAM LiDAR opnames gemaakt van het Friesche Zeegat, die worden gebruikt om veranderingen in de hoogte en het oppervlak van droogvallende wadplaten in kaart te brengen. De achterliggende vraag is of de wadplaten in staat zijn om de relatieve zeespiegelstijging te volgen. Hierin is relatieve zeespiegelstijging gedefinieerd als het netto effect van zeespiegelstijging en bodemdaling (autonome bodemdaling en bodemdaling door gaswinning). De morfologische veranderingen in het Friesche Zeegat worden veroorzaakt door processen met verschillende tijd- en ruimteschalen, zoals geulmigratie, storm events en relatieve zeespiegelstijging. De bodemligging in het Friesche Zeegat verandert daardoor continu. Om te kijken of er een trendmatige verandering optreedt in de wadplaathoogte als gevolg van relatieve zeespiegelstijging, moet naar een langere periode gekeken worden omdat het beeld anders gedomineerd wordt door processen die op kortere termijn een groter effect hebben.

De LiDAR opnames zijn jaarlijks geanalyseerd door Deltares (Arentz en Vroom, 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang, 2012; Wang et al., 2010). In deze voorgaande studies is gebleken dat de LiDAR opnames (nog) niet geschikt zijn om conclusies te trekken over de morfologische ontwikkeling van de wadplaathoogte. De reden hiervoor is enerzijds dat de meetfout groter is dan het overgrote deel van de jaarlijkse morfologische veranderingen, en ook groter is dan de voorspelde jaarlijkse bodemdaling als gevolg van de gaswinning. Anderzijds wordt het beeld nog gedomineerd door morfologische veranderingen met een korte tijdschaal en/of een grotere impact.

De grootte van de meetfout is een belangrijk aspect van de LiDAR data, omdat deze aangeeft welke bodemveranderingen als significant kunnen worden beschouwd. In voorgaande studies is de meetfout regelmatig onderwerp van discussie geweest. In paragraaf 3.2 wordt deze discussie beknopt samengevat en aangegeven hoe de door Fugro opgegeven meetfout in de analyse wordt geïnterpreteerd en gebruikt.

Voor de analyse van de wadplaten wordt alleen de meetdata met een hoogteligging hoger dan 0,5 m NAP gebruikt. De reden hiervoor is dat het moeilijk is een goed onderscheid te maken tussen de waterspiegel en natte wadplaten. De meetdata wordt ingewonnen als de waterstand bij Nes lager is dan -0,7 m NAP, maar er kan ook een verhang over het bekken optreden waardoor op sommige punten de waterstand hoger kan zijn dan -0,7 m NAP. De mogelijkheid een andere afkapgrens (dan 0,5 m NAP) te gebruiken, wordt in deze studie onderzocht op basis van een analyse van de RGB-waarden voor een beter onderscheid tussen de waterspiegel en wadplaten (zie bijlage A) en een analyse van het waterstandsverhang in het Friesche Zeegat (zie bijlage B).

1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de werkwijze van de analyse van de LiDAR opnames toegelicht. Vervolgens wordt de data beschreven in hoofdstuk 3. Hier komen de (weers)omstandigheden tijdens de opnamedagen aan bod, wordt de meetfout van de opnames besproken, en worden de bodemkaarten van alle jaren weergegeven. De bodemveranderingen die zijn opgetreden worden berekend door de bodemkaarten van elkaar af te trekken. Dit is opgenomen in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 worden voor de twee kombergingsgebieden en vijf deelgebieden hypsometrische curven en histogrammen weergegeven. Tot slot worden in hoofdstuk 6 conclusies en aanbevelingen gegeven.

2 Aanpak

Voor het in kaart brengen van de morfologische ontwikkeling van de wadplaten wordt dezelfde aanpak gehanteerd als in voorgaande studies (Arentz en Vroom, 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang, 2012; Wang et al., 2010). De aanpak wordt hieronder stapsgewijs beschreven.

De basis voor deze analyse wordt gevormd door de vergridde LiDAR data van de periode 2010-2014 (ASCII 1x1 m), zoals aangeleverd door Fugro. Voor de nieuwe data (voorjaar en najaar 2014) wordt in hoofdstuk 3 een beschrijving gegeven, waarbij de gebiedsdekking, het vluchtschema en de weersomstandigheden de revue passeren.

De eerste stap is het omzetten naar kaartbladen met een resolutie van 10 m x 10 m waardoor de data behapbaar worden voor verdere analyse.

Vervolgens wordt de dataset gecorrigeerd voor water door alleen de data met een waarde boven de -0.5 m NAP te gebruiken. Doordat de LiDAR opnames alleen bij waterstanden lager dan -0.7 m NAP bij Nes worden gevlogen, is de verwachting dat de waarden hoger dan -0.5 m NAP geen waterspiegel meer bevatten (met uitzondering van de plassen die op de platen blijven staan). Hierdoor zijn de berekende plaatarealen representatief voor oppervlakte van de platen boven de -0.5 m NAP.

Hierna worden de LiDAR data uit 2014 vergeleken met alle eerdere LiDAR data (voorjaar 2010, voor- en najaar 2011, najaar 2012 en najaar 2013). De verschillen worden weergegeven als erosie/sedimentatiekaarten. Een vergelijking met de RWS data is al in Elias et al. (2013) niet zinvol gebleken omdat deze data op een andere manier verwerkt en ingewonnen zijn. Hierdoor wijkt de bodemligging teveel af van de Fugro LiDAR bodems.

Daarna worden de erosie-/sedimentatiesnelheden in meter per jaar gemaakt. Hierdoor kunnen de verschillende tijdsperiodes gemakkelijk met elkaar vergeleken worden. De erosie-/sedimentatiesnelheden op basis van de LiDAR data wordt vervolgens vergeleken met de erosie-/sedimentatiesnelheden op basis van de RWS vaklodings data over de periode 1987-2012.

Ook wordt het aantal cellen met een bepaalde hoogteverandering cumulatief uitgezet, om te kijken welk deel van de veranderingen groter zijn dan de meetfout.

Tot slot analyseren we arealen van de wadplaten per kombergingsgebied Pinkegat en Zoutkamperlaag en eveneens voor vijf deelgebieden. Deze analyse is gebaseerd op hypsometrische curven en histogrammen. Een hypsometrische curve geeft het areaal ten opzichte van de bodemhoogte cumulatief weer. Het histogram geeft eveneens het areaal ten opzichte van de bodemhoogte weer, niet cumulatief maar verdeeld over diepteklassen. Zie Elias et al. (2013) en Cronin en Wang (2012) voor details. De hypsometrische curven van de RWS vaklodings data voor 2005 en 2012 zullen ter referentie worden toegevoegd.

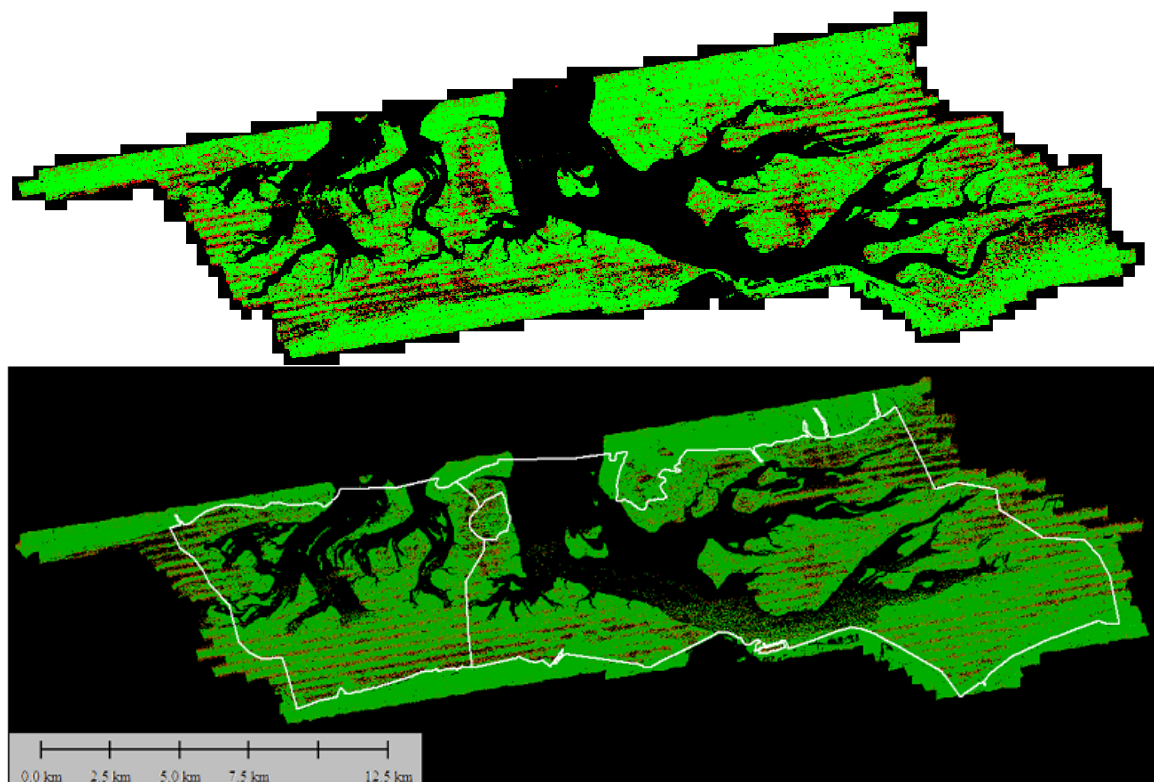
3 Beschrijving en verwerking van de LiDAR data

3.1 Algemeen

LiDAR (Light Detection And Ranging) is een technologie die de afstand tot een object of oppervlak berekent met:

- 1 het tijdsverschil tussen uitzenden van een laserpuls en ontvangen van de reflectie
- 2 de hoek waaronder de laserpuls is uitgezonden
- 3 de absolute locatie van de sensor.

De kwaliteit van de data hangt o.a. van de reflectie. De meting van natte oppervlakten zoals wadplaten wordt bemoeilijkt doordat er minder reflectie wordt ontvangen dan boven land (ca. 4-5 punten per vierkante meter). Ruwere oppervlakken verstrooien de reflectie sterker, waardoor een kleiner deel terug wordt opgevangen. Echter, enige ruwheid is wel gewenst, aangezien bij een spiegelglad oppervlak alleen de puls recht onder de sensor kan worden terug ontvangen. Ook het type oppervlak beïnvloedt de mate van absorptie en reflectie binnen bepaalde bandbreedten van de laserpuls. Daarnaast hangt de mate waarin het signaal terug wordt ontvangen af van de hoek van het te meten oppervlak t.o.v. de laser: recht onder het vliegtuig is de reflectie wel goed, maar meer naar de zijkant van de scan wordt de reflectie minder. Beide effecten leiden ertoe dat de puntendichtheid van de data reduceert, en dit effect wordt sterker naar de randen van de vluchtbaan. Dit is terug te zien in de puntendichtheid, dat een duidelijk streep patroon laat zien, zie Figuur 3.1.



Figuur 3.1 Puntendichtheid van de LiDAR opnames van voorjaar 2014 (bovenste figuur) en het najaar van 2014 (onderste figuur). Groen: ≥ 4 punten per m^2 , rood: < 4 punten per m^2 , zwart: geen data of data beneden $-0,7$ m NAP.

Ook de weersomstandigheden zijn van invloed op de kwaliteit van de data. LiDAR kan niet door regen, bewolking of mist kijken. Impliciet hebben wind en golven ook invloed, omdat die de ruwheid van het oppervlak bepalen.

Het is lastig een onderscheid te maken tussen de waterspiegel en de wadplaat. Dit wordt nog verder bemoeilijkt omdat er op de wadplaten bij laagwater nog steeds een dunne waterfilm aanwezig kan zijn. In bijlage A is een eerste verkenning uitgevoerd naar de mogelijkheid RGB-waardes (kleurwaardes) te gebruiken voor een beter onderscheid tussen wadplaat en waterspiegel. De eerste verkenning laat zien dat de combinatie van RGB-waardes met hoogte-informatie potentie biedt om ook buiten de afkapgrens wad en water te onderscheiden. In een testgebied van 12 km² werd door de gecombineerde classificatie een groter wadoppervlakte (69%) gevonden dan de classificatie enkel op basis van een hoogte met een afkapgrens van -0,5 m NAP (42%). Voordat deze techniek voor alle LiDAR opnames kan worden toegepast, moet nog nader worden gekeken naar de betrouwbaarheid van de classificatie.

Een belangrijk aspect van de kwaliteit van de data is de fout. Deze wordt besproken in de volgende paragraaf.

3.2 Meetfout

Er is eerder gebleken dat de definitie van de fout zoals beschreven door Fugro (Fugro, 2013) onvoldoende duidelijk is voor gebruik in de morfologische analyses zoals uitgevoerd door Deltares (zie Wang et al. (2010), Elias et al. (2013) en Arentz en Vroom (2014)). De streeppatronen in de richting van de vliegbanen die in de verschilkaarten tussen twee metingen duidelijk zichtbaar zijn vormen de aanleiding voor discussies over de interpretatie van de fout. Deze strepen zijn niet fysisch verklaarbaar in termen van sedimentatie of erosie. Vragen die terug blijven keren zijn:

1. Hoe moeten we de door Fugro opgegeven systematische en stochastische fouten interpreteren?
2. Wat worden de fouten na vergridding?
3. Hoe groot zijn de fouten voor de verschilkaarten?

Op 1 april 2014 is er een bijeenkomst geïnitieerd door NAM met Fugro, RWS en Deltares om de nauwkeurigheid van de Fugro LiDAR data te bespreken. Tijdens deze bijeenkomst is afgesproken een gezamenlijke foutenmemo op te stellen (NAM, 2014). Dit heeft drie memo's opgeleverd:

- Deltares memo van 18 april door L. Arentz (Arentz, 2014);
- Fugro memo 15 mei 2014 door B. Valte (Fugro, 2014a);
- Concept memo Lidar nauwkeurigheden van H. Piening waarop Z.B. Wang input heeft geleverd (Piening, 2014). Zie e-mails van H. Piening 02-06-2014 en antwoord van Z.B. Wang op 04-06-2014.

Op basis van de memo van Fugro (Fugro, 2014a) heeft Deltares de volgende interpretatie van de antwoorden op de drie bovenstaande vragen:

1. Interpretatie stochastische en systematische fouten
Met de stochastische fout wordt de hoogfrequentie ruis van het LiDAR meetsysteem aangeduid. Deze ruis wordt voor het overgrote deel weg gefilterd bij de vergridding. Met de systematische fout worden twee fouten aangeduid: 1) de laagfrequente navigatiefout. Deze fout is constant over korte periode van enkele seconden waarbij de GPS en vliegomstandigheden niet significant veranderen binnen een vliegstrook en

zeker niet tussen twee vliegstroken – het heeft eigenlijk een stochastisch karakter, maar met een lange golflengte waardoor deze lokaal als constant kan worden beschouwd (Fugro, 2014a); 2) de systematische fout die over het hele gebied gelijk is. Deze fout wordt geëlimineerd door de inpassing op de controlegrids (Fugro, 2014a; Fugro, 2014b; Fugro, 2014c).

2. Fout van een individuele kaart na vergridding
Fugro geeft aan dat de fout van een individuele kaart na vergridding +/- 4 cm is (Fugro, 2014a; Fugro, 2014b; Fugro, 2014c). Deltares interpreteert dit als de systematische fout met een stochastisch / langgolvig karakter, onder de aanname dat de stochastische fout weg valt na vergridding en de uniforme systematische fout wegvalt door inpassing op de controlegrids.
3. Hoe groot zijn de fouten voor de verschilkaarten?
Voor de fout van een verschilkaart tussen twee vergriddde individuele kaarten geeft Fugro een fout aan van $2 \times 4 = 8$ cm (Fugro, 2014a; Fugro, 2014b; Fugro, 2014c). Hierbij wordt ook aangegeven dat de systematische fouten die over de gehele survey gelijk zijn worden geëlimineerd door de inpassing op de controlegrids (Fugro, 2014a; Fugro, 2014b; Fugro, 2014c). Volgens Deltares is, gegeven het stochastische karakter van de fout van een individuele kaart, de *gemiddelde* fout van een verschilkaart 5.7 cm ($\sqrt{2} * 4$) moeten zijn. De fout van 8 cm zou dan als een maximum kunnen worden beschouwd.

In de huidige LIDAR analyse wordt voor verschilkaarten de maximale meetfout van 8 cm gehanteerd. Voor de hypsometrische curven en histogrammen wordt gekeken naar individuele kaarten, en daar is de systematische fout met een langgolvig karakter van belang. De hypsometrische curven en histogrammen worden daarom bekeken in relatie tot een meetfout van 3,8 cm.

3.3 Beschrijving

De metingen die in 2014 zijn uitgevoerd worden in deze paragraaf beschreven. De metingen van de periode 2010-2013 zijn beschreven in de voorgaande studies. Tabel 3.1 geeft een overzicht van de data met datering en referentie van de rapportages.

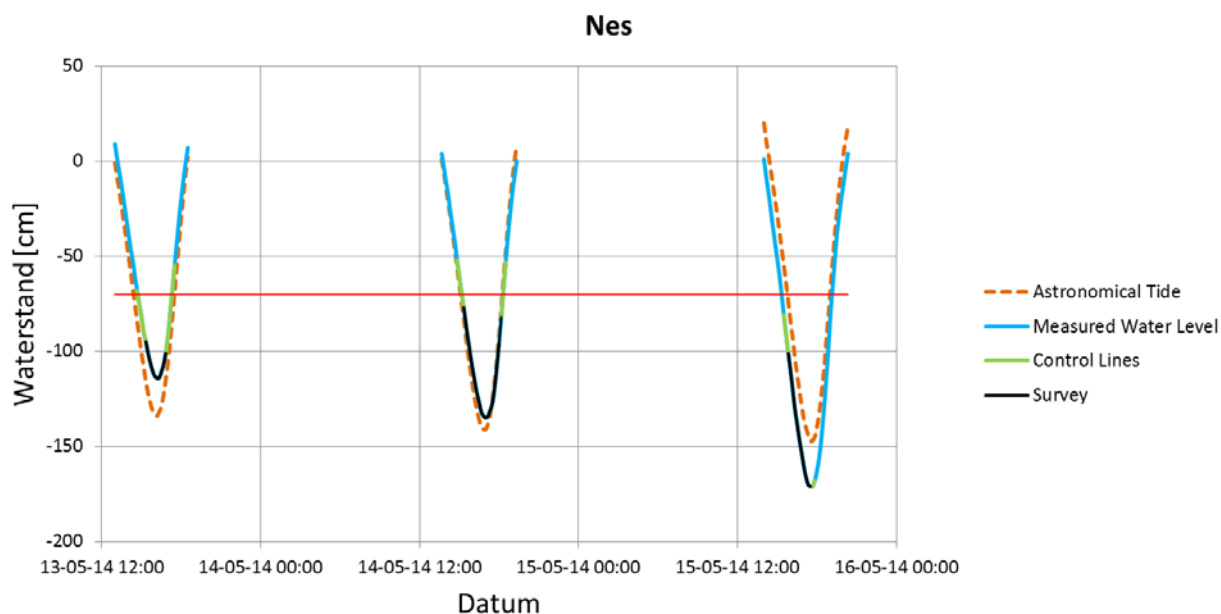
Tabel 3.1 Overzicht van de verschillende LiDAR opnames en analyses van het Friesche Zeegat. Van de data van najaar 2011 en najaar 2012 is in later stadium een geüpdatete set van Fugro ontvangen.

Lidar referentie	Datum van opname	Referentie
2010 (voorjaar)	25-04-2010, 26-04-2010, 28-04-2010	Wang et al., 2010
2011 (voorjaar)	14-04-2011, 15-04-2011, 16-04-2011	Cronin en Wang, 2012
2011 (najaar) Data geüpdatet in 2012	24-9-2011, 25-9-2011, 26-9-2011, 27-9-2011	
2012 (najaar) Data geüpdatet in 2013	15-10-2012, 16-10-2012, 26-10-2012	Elias et al., 2013
2013 (najaar)	18-10-2013, 19-10-2013, 20-10-2013	Arentz en Vroom, 2014
2014 (voorjaar)	13-05-2014, 14-05-2014, 15-05-2014	
2014 (najaar)	21-09-2014, 22-09-2014, 23-09-2014	

3.3.1 Voorjaar 2014

In het voorjaar van 2014 is er op 13, 14 en 15 mei een LiDAR survey uitgevoerd door Fugro. Net als voorgaande jaren zijn de vluchten uitgevoerd tijdens laagwater, bij waterstanden lager dan -0.7 m NAP bij Nes (Ameland), behalve de vluchten voor de cross-lines. Er werd gevlogen op een hoogte van 440 m met een snelheid van 222 km/h, wat betekent dat de vliegduur van één lijn ongeveer 10 minuten bedroeg. Tijdens de meetdagen was het goed weer, de lucht was helder. De waterstanden tijdens de vluchtdagen zijn weergegeven in Figuur 3.2. Vooral tijdens de derde opnamedag is er een groot verschil tussen het astronomisch getij en de gemeten waterstand, dit verschil kan verklaard worden door effecten van wind.

Daarnaast zijn een aantal ground control points (GCP's) gemeten op de wadplaten. Deze GCP's dienen als een 'ground-truth', om de nauwkeurigheid te verifiëren en om eventueel de dataset integraal op te tillen of te laten zakken. De GCP's op het vasteland zijn niet opnieuw gemeten, daarvoor is de data van de vorige opname gebruikt (oktober 2013). De GCP's worden gebruikt om de dataset te corrigeren.



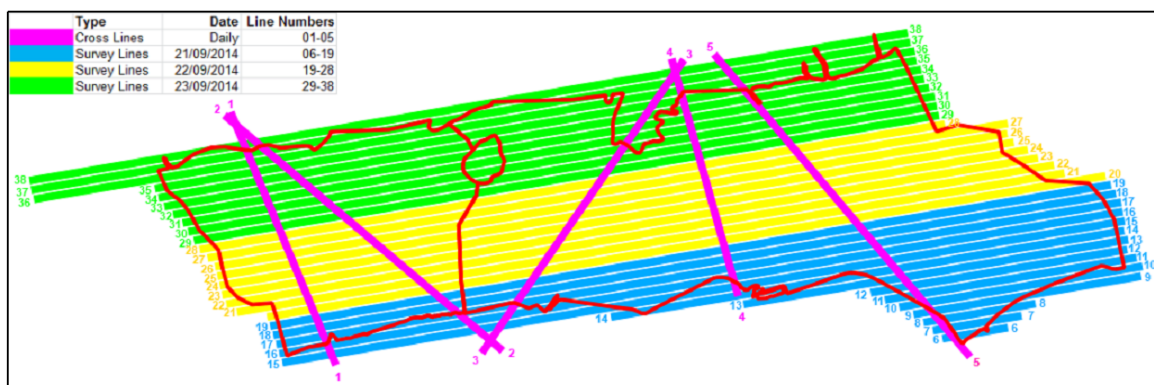
Figuur 3.2 Gemeten waterstanden (blauw) bij Nes gedurende de opnamedagen van het voorjaar van 2014. Momenten waarop data is ingewonnen zijn aangegeven met zwart en de cross-lines met groen.

3.3.2 Najaar 2014

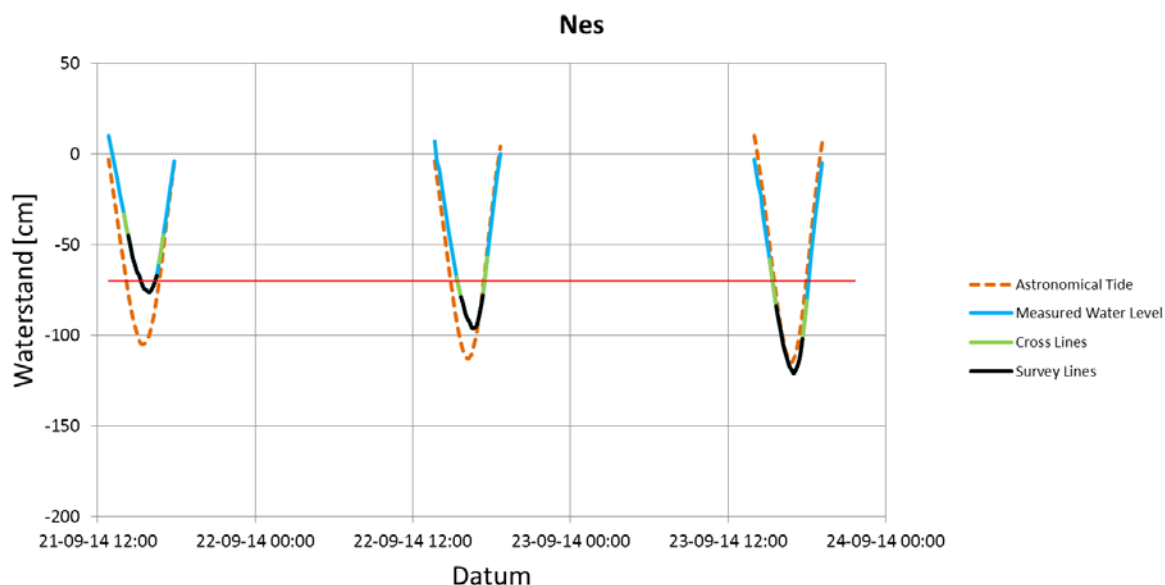
In het najaar van 2014 is er op 21, 22 en 23 september een LiDAR survey uitgevoerd door Fugro. De vlieglijnen van de LiDAR opnames in het najaar van 2014 zijn per opnamedag aangegeven in Figuur 3.3. Net als voorgaande jaren zijn de vluchten uitgevoerd tijdens laagwater, bij waterstanden lager dan -0.7 m NAP bij Nes (Ameland), behalve de vluchten voor de cross-lines en de lijnen 6-14 in het zuidoostelijk deel van het Friesche Zeegat. Deze lijnen zijn gevlogen op de eerste dag, toen de gemeten waterstand duidelijk hoger was dan -0,7 m NAP. Hierdoor lijken rond de geulen nog wat kleine delen beïnvloed te zijn (zie Fugro, 2014b).

Tijdens de meetdagen was het goed weer, de lucht was helder. De waterstanden tijdens de vluchtdagen zijn weergegeven in Figuur 3.4. Vooral tijdens de eerste en tweede opnamedag is er een groot verschil tussen het astronomisch getij en de gemeten waterstand, dit verschil wordt verklaard door effecten van wind en luchtdruk.

Wederom zijn alleen de GCP's op de wadplaten opnieuw gemeten, zodat de dataset - in combinatie met de al gemeten GCP's op het vasteland - gecorrigeerd kon worden.



Figuur 3.3 Vlieglijnen op de verschillende dagen (21 (blauw), 22 (geel) en 23 september (groen)) van de najaarsopname van 2014.



Figuur 3.4 Gemeten waterstanden (blauw) bij Nes gedurende de opnamedagen van het najaar van 2014. Momenten waarop data is ingewonnen zijn aangegeven met zwart en de cross-lines met groen.

3.4 Levering

De LiDAR data voor 2010 (voorjaar), 2011 (voorjaar en najaar), 2012 (najaar), 2013 (najaar) en 2014 (voorjaar en najaar) zijn allen aangeleverd door Fugro in dezelfde twee formaten:

- 1 als ASCII-bestanden op een 1 m x 1 m grid (hierna te noemen "ASCII 1x1 m data"). De ASCII bestanden bevatten x-, y- en z-waarden. De x- en y-coördinaat geven horizontale

positie aan in RijksDriehoekcoördinaten en de z-coördinaat is de gemeten hoogte t.o.v. NAP.

- 2 als ruwe LAS-punten ook wel XYZiRGB bestanden (hierna te noemen "LAS-punten"). De LAS-data bevatten alle punten, d.w.z. 0-5 punten per vierkante meter. De LAS-punten worden aangeleverd in LAS-formaat 1.2 en bevatten ook informatie als vluchtlijn, tijd, return nummer, intensiteit, scan hoek en RGB. Deze data zijn al op zekere hoogte bewerkt door Fugro, zo zijn bijvoorbeeld uitschieters verwijderd.

3.5 Verwerking

De ASCII 1x1 m data worden op dezelfde manier verwerkt als in voorgaande jaren en staat beschreven in Cronin en Wang (2012). Samengevat worden de volgende stappen doorlopen:

- 1 De ASCII 1x1 m data worden omgezet naar een resolutie van 10 m x 10 m. Bij het omzetten wordt geen data geïnterpoleerd, de punten binnen het 10 m x 10 m vak worden gemiddeld. Vakken zonder punten blijven leeg. In Elias et al. (2013) is gekeken naar het effect van verschillende gridgroottes (5 m, 10 m en 20 m) op het resultaat van de analyse en is geconstateerd dat het effect verwaarloosbaar klein is. Vanuit praktisch oogpunt is gekozen om met 10 m x 10 m grids te werken.
- 2 De vergride 10 x 10 m data worden gegroepeerd per kaartblad. De indeling van de kaartbladen is identiek aan de 'vakklodingen' data van Rijkswaterstaat.
- 3 Data met een bodemhoogte lager dan -0,5 m NAP worden verwijderd, zodat de waterspiegel uit de data wordt gefilterd. Deze dataset wordt gebruikt voor de analyses.

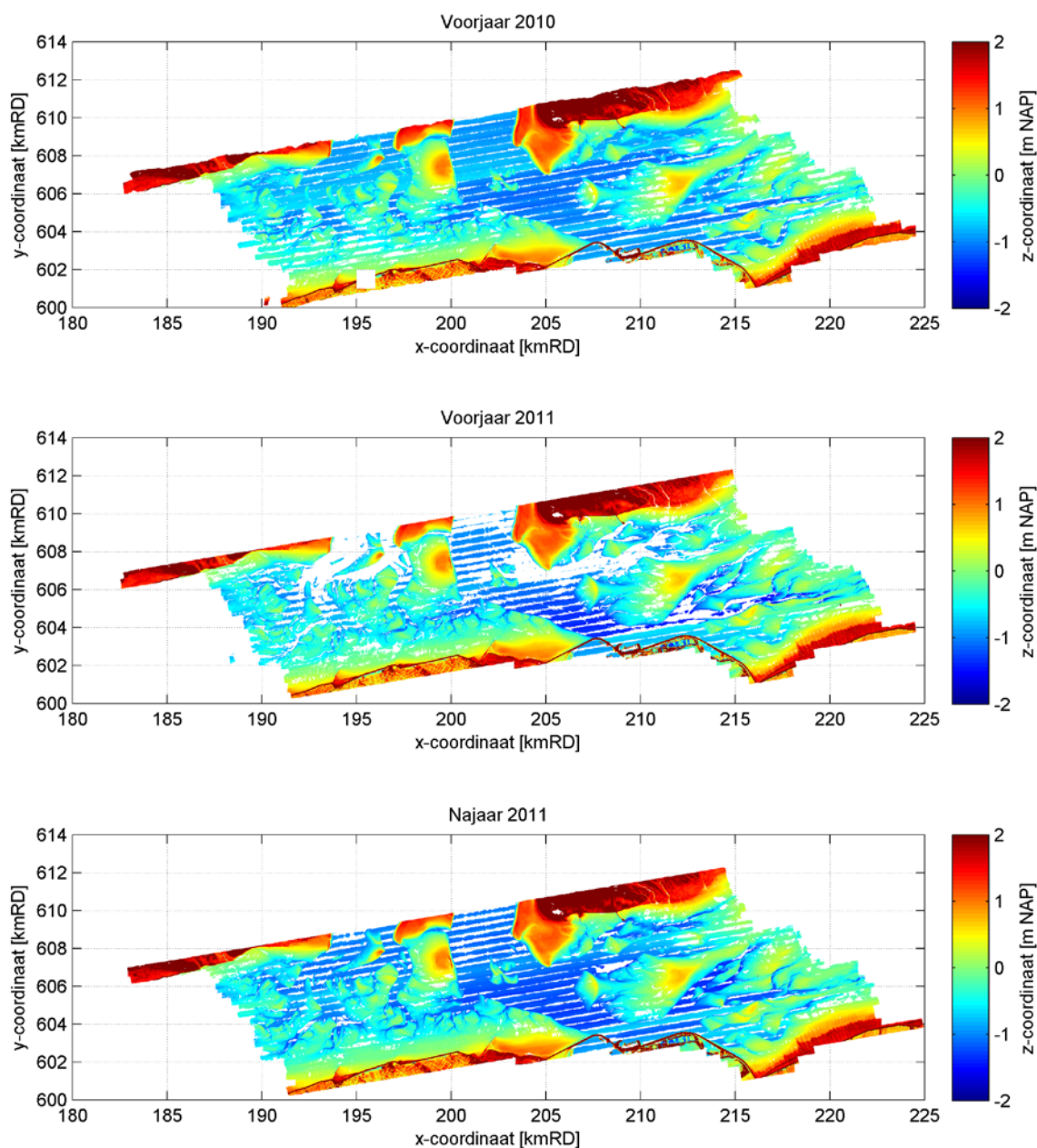
De dekking (aantal cellen met een waarde binnen de polygoon) voor en na filtering van het water is weergegeven in Tabel 3.2. De polygoon genoemd in Tabel 3.1 betreft het Friesche Zeegat en is de omhullende van de kombergingsgebieden Zoutkamperlaag en Pinkegat. De polygoon is met een zwarte lijn aangegeven in Figuur 3.6. Het valt op dat de data voor 2013 een dekking heeft van 100%. Dit is het gevolg van een interpolatieslag die door Fugro is gedaan. Voor consistentie is het belangrijk in het vervolg alle datasets op dezelfde manier te bewerken. Ook is te zien dat er vanaf het najaar van 2013 een grotere dekking is dan daarvoor, dit is ook het moment dat er bij Fugro een nieuwe scanner in gebruik is genomen. Deze scanner leidt blijkbaar tot een betere dekking. In het najaar van 2014 blijft een relatief groot percentage gebied over na de filtering van het water. Dit komt waarschijnlijk doordat een deel van de data (tijdens dag 1) is gevlogen bij een hogere waterstand. De waterstand hoger dan -0,5 m NAP is niet weggefilterd.

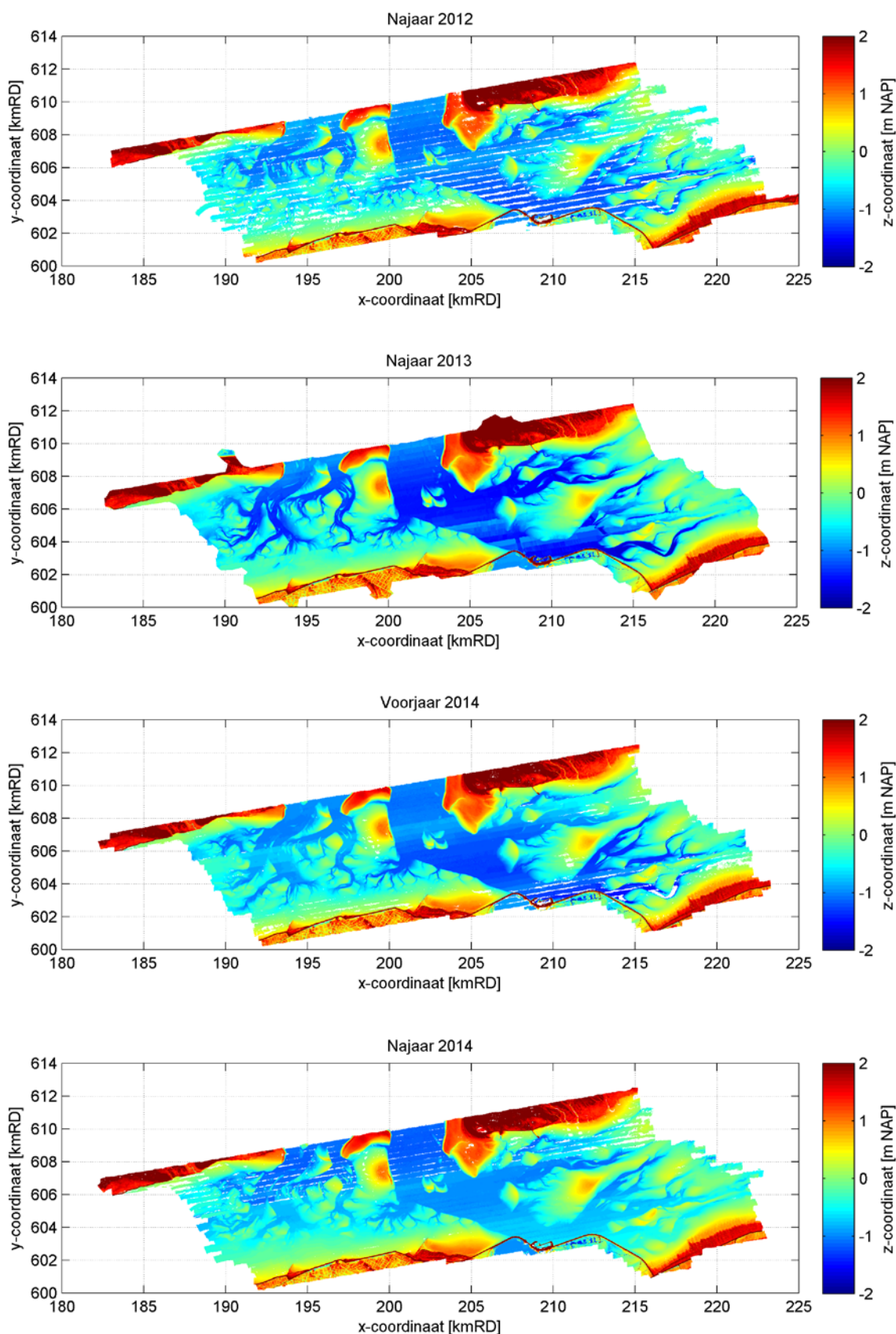
Tabel 3.2 Weergave van het percentage cellen met waarden voor en na de filtering van de waterspiegel.

LiDAR opname	Dekking in [%]	
	In polygoon	In polygoon + filtering water
Voorjaar 2010	92,75	50,28
Voorjaar 2011	80,48	50,10
Najaar 2011	90,56	50,79
Najaar 2012	94,82	50,59
Najaar 2013	100,00	53,26
Voorjaar 2014	98,56	53,03
Najaar 2014	98,87	55,52

3.6 Bodemkaarten

Figuur 3.5 toont de vergride 10 x 10 m data voor alle beschikbare Fugro LiDAR data. De waterspiegel is duidelijk zichtbaar en heeft het sterkste streeppatroon. De data van 2013 heeft een volledige dekking, ook op het water. Dit komt doordat er al een interpolatieslag heeft plaatsgevonden om tot de ASCII 1x1 m data te komen.





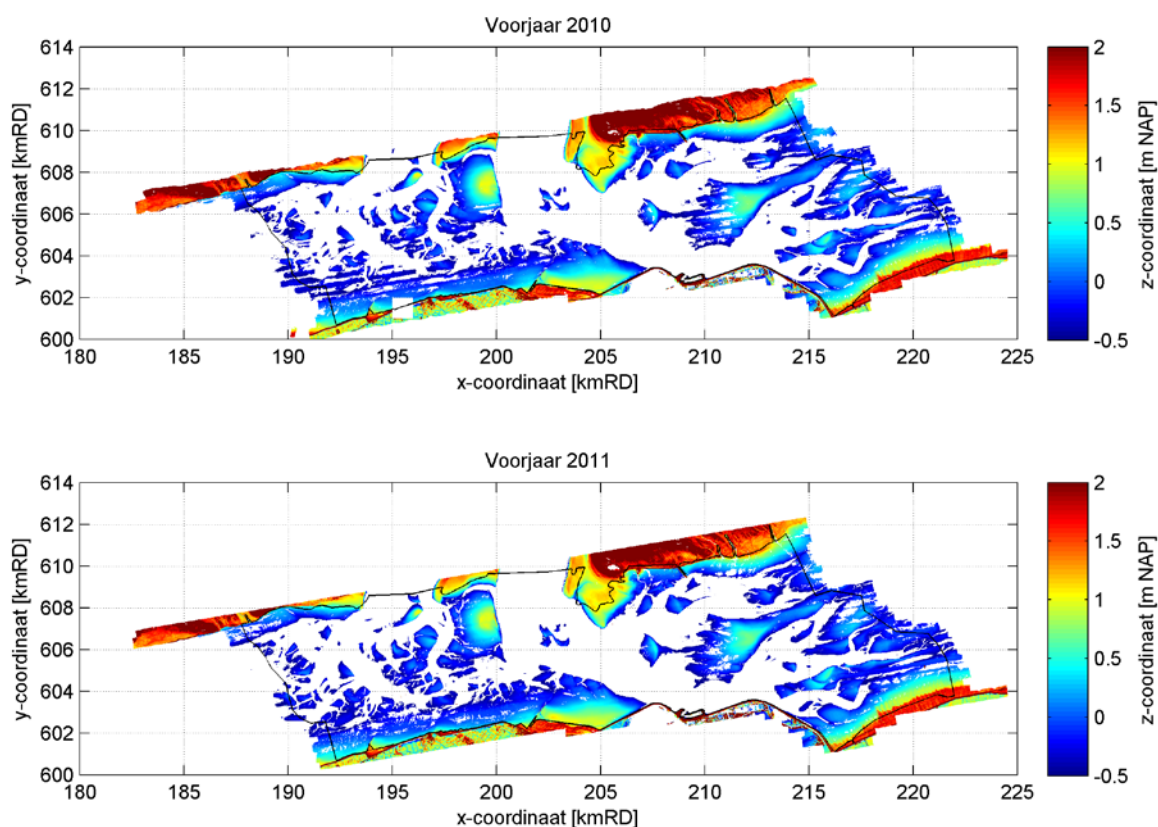
Figuur 3.5 Visualisatie van alle LiDAR opnames (april 2010 t/m september 2014) op een 10m x 10m grid.

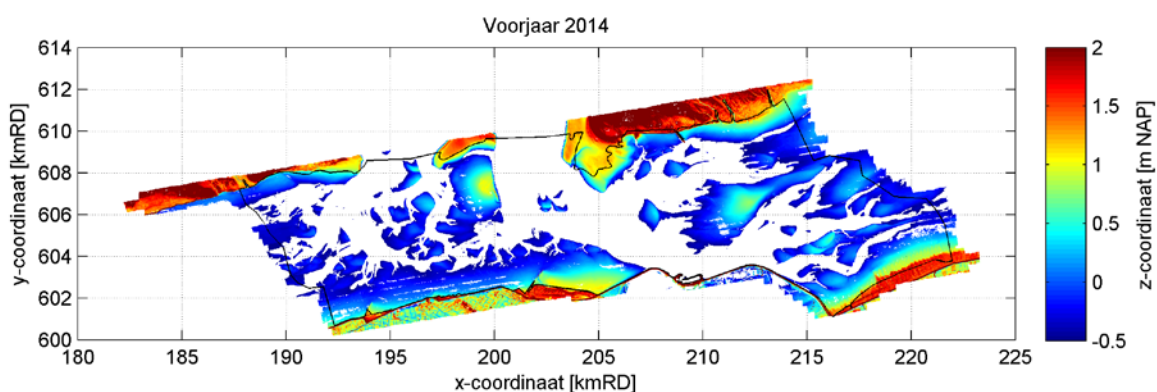
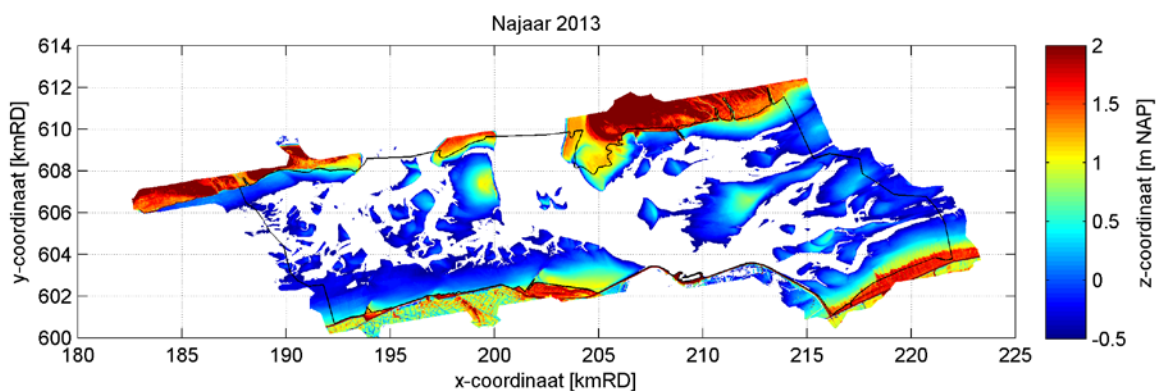
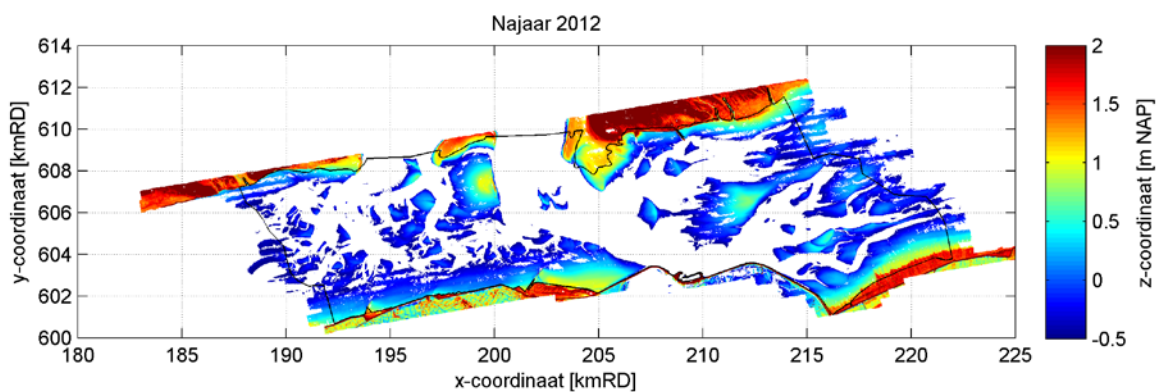
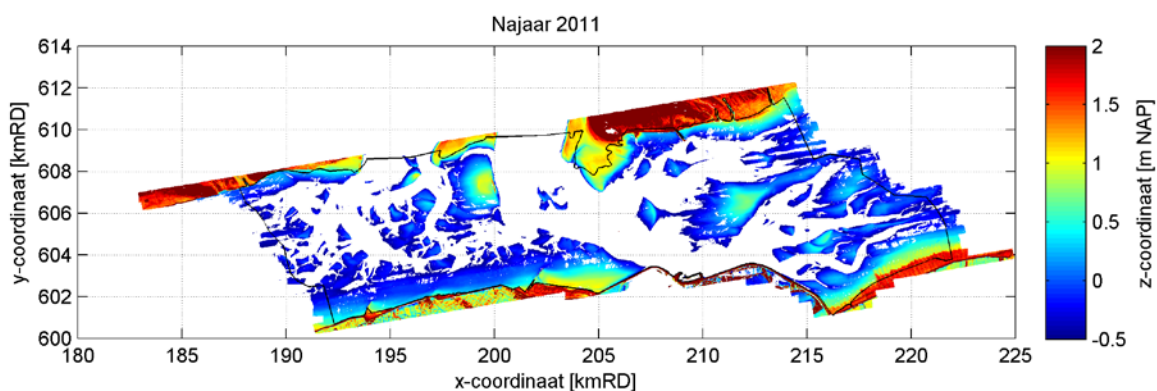
Door water uit de dataset te filteren, worden de verschillen in plaathoogte tussen twee opnamen niet verstoord door verschillen in waterstanden. In de ongefilterde set domineren variaties in waterstanden in de geulen het beeld op de verschilkaarten. Omdat er niet zonder meer een onderscheid gemaakt kan worden tussen waterspiegel en (natte) wadplaat, worden alle punten beneden -0,5 m NAP buiten beschouwing gelaten, zie Figuur 3.6.

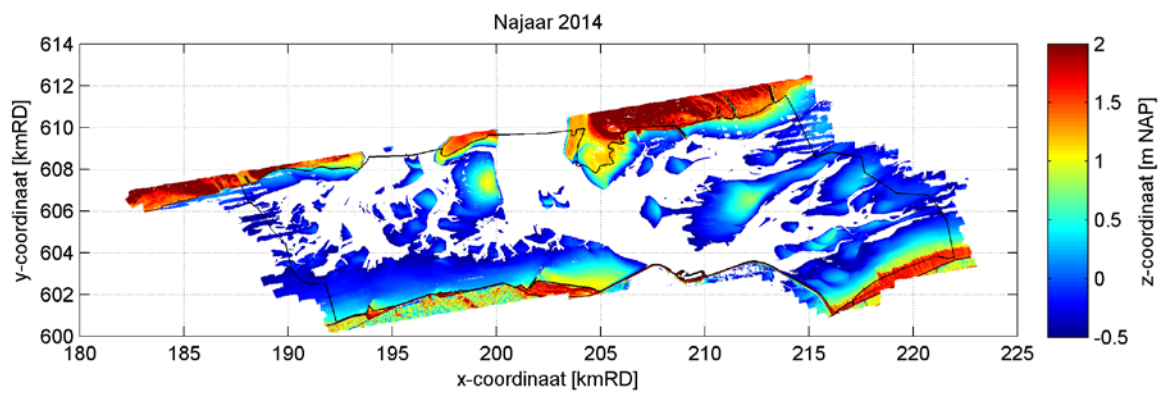
Aangezien de interesse uitgaat naar de ontwikkelingen van de plaathoogte en -oppervlak en niet naar de plaat-geul overgang is deze grove filtering acceptabel. Alleen voor de opname van het najaar van 2014 levert dit een foute filtering op, omdat deze data zijn gevlogen bij een waterstand hoger dan -0,5 m NAP. Hier moet bij de interpretatie rekening mee worden gehouden. De consequentie is dat de plaatarealen berekend in deze studie enkel representatief zijn voor plaatoppervlak boven -0,5 m NAP. Deze afkapgrens is gebaseerd op het feit dat de LiDAR opnames zijn gemaakt bij een (astronomische) waterstand lager dan -0,7 m NAP bij Nes en er een verhang kan optreden over het bekken. In bijlage B is een eerste analyse uitgevoerd naar het verhang in het bekken. Hieruit blijkt dat de waterstand in het zuidwestelijke deel van het bekken hoger kan zijn dan -0,5 m NAP als de waterstand bij Nes lager is dan -0,7 m NAP. Dit is gebaseerd op de waterstand bij Holwerd. In bijlage A is een verkenning uitgevoerd om het onderscheid tussen waterspiegel en (natte) wadplaat op basis van RGB-waarden te maken.

In het najaar van 2014 is er in het zuidoostelijk deel van het bekken een opname gemaakt bij waterstanden hoger dan -0,5 m NAP. Dit is terug te zien in de bodemligging.

In het vervolg van deze rapportage wordt gewerkt met de bodemdata zoals deze zijn weergegeven in Figuur 3.6.







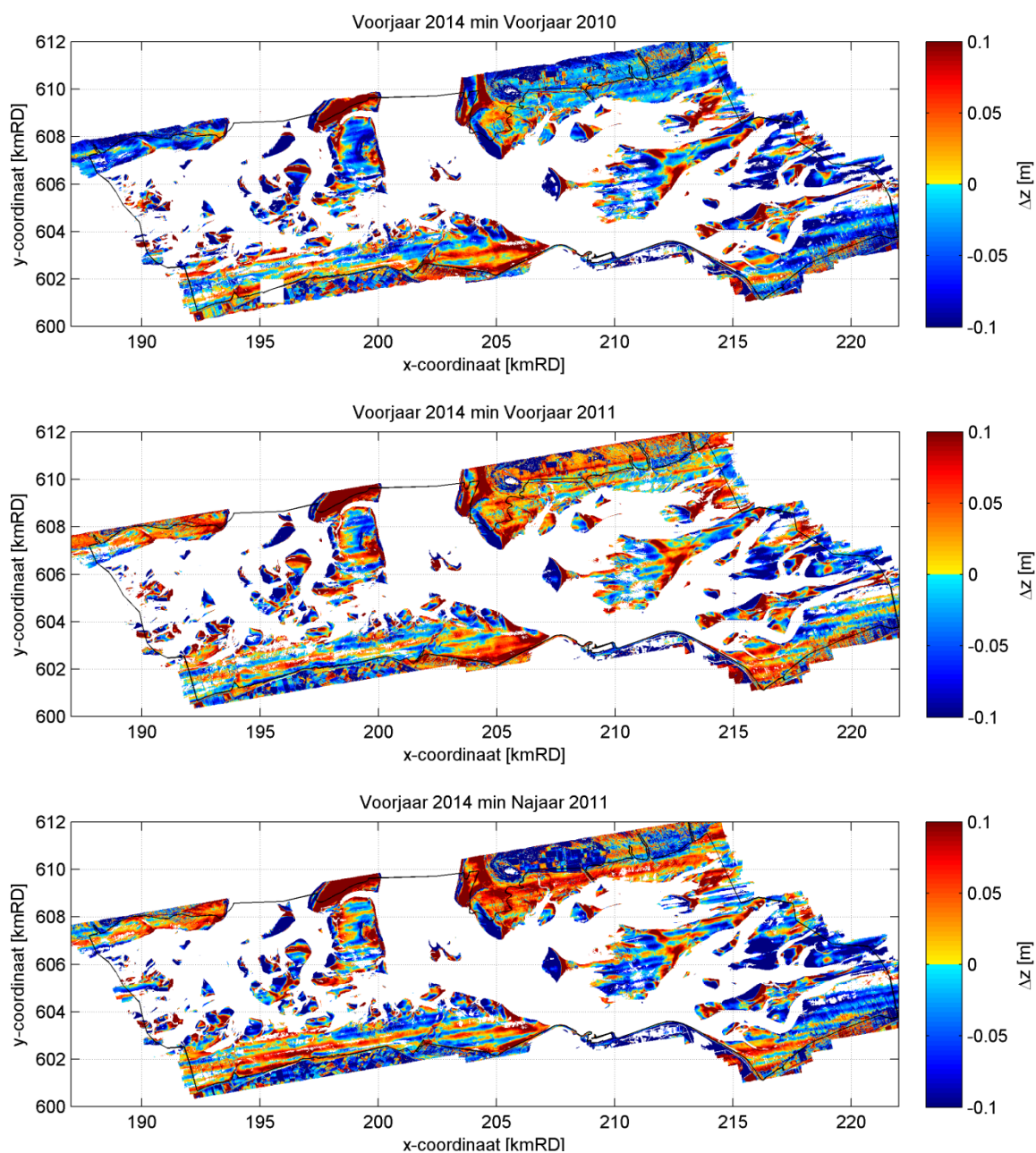
Figuur 3.6 Visualisatie van alle LiDAR opnames (april 2010 t/m september 2014) zonder waterspiegel op een 10m x 10m grid.

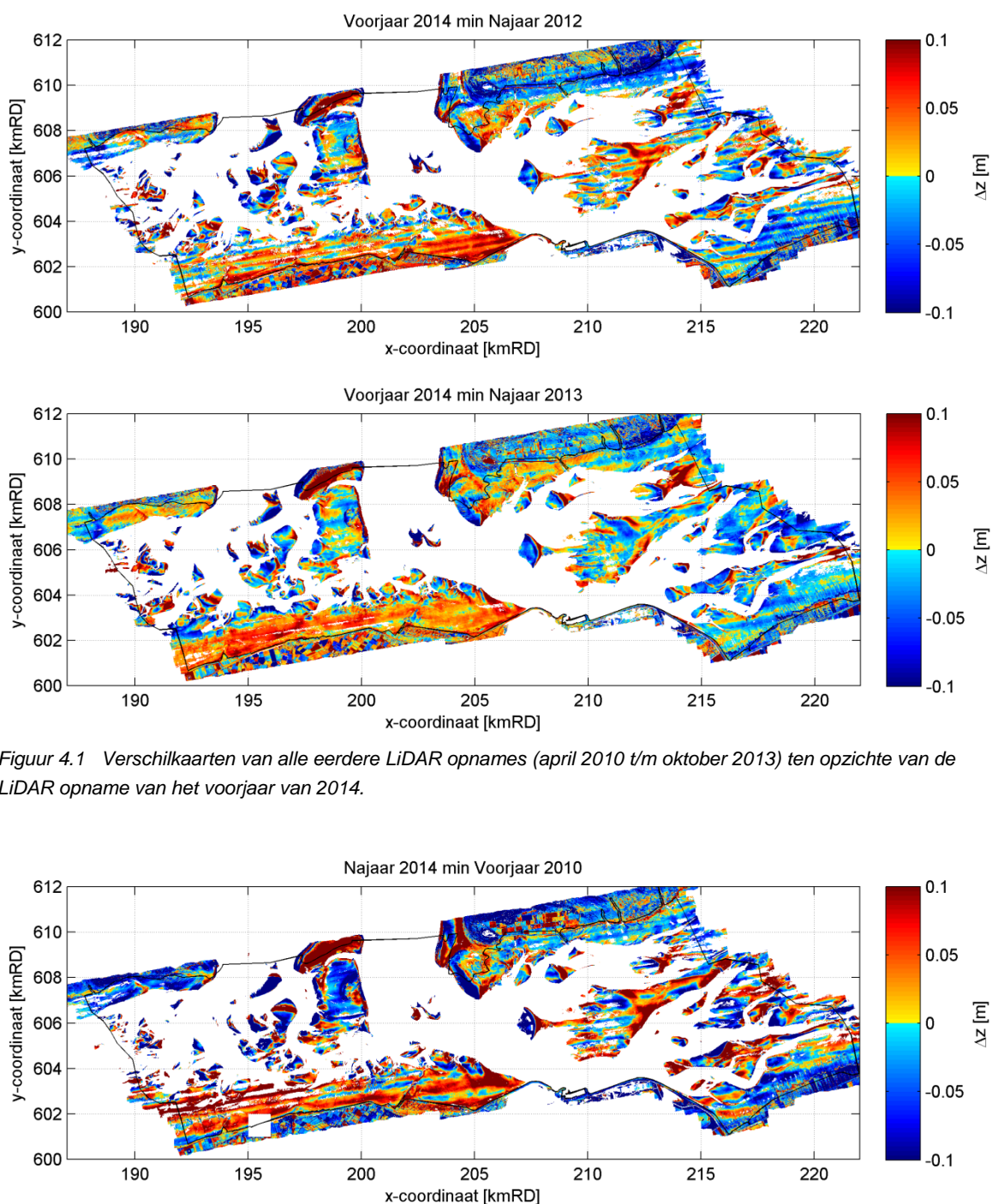
4 Erosie en sedimentatie

4.1 Erosie/sedimentatiekaarten

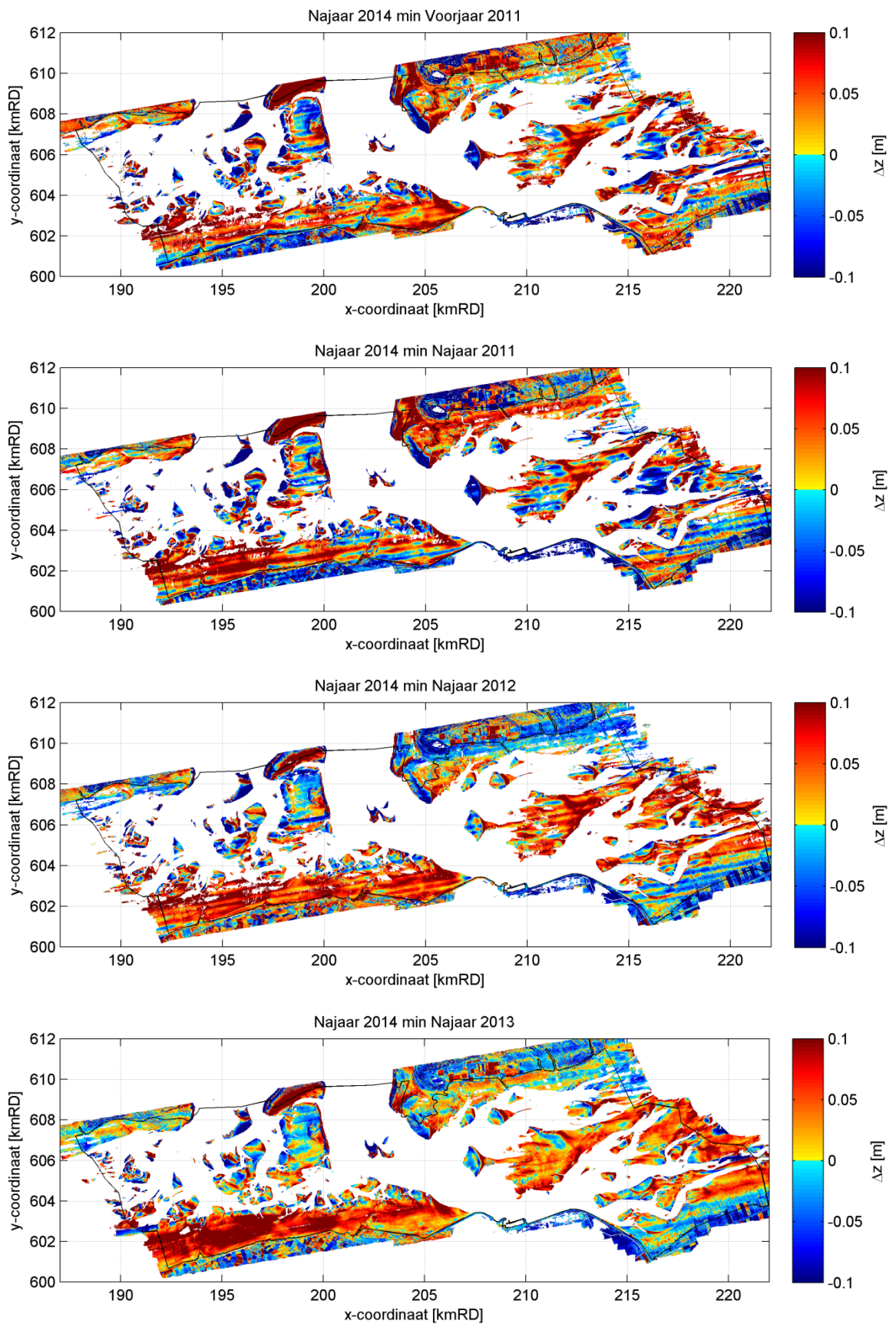
De bodem van zowel het voorjaar van 2014 als het najaar van 2014 wordt vergeleken met alle eerdere LiDAR bodems. De erosie/sedimentatiekaarten zijn geconstrueerd met de 10 m x 10 m data zoals weergegeven in Figuur 3.6.

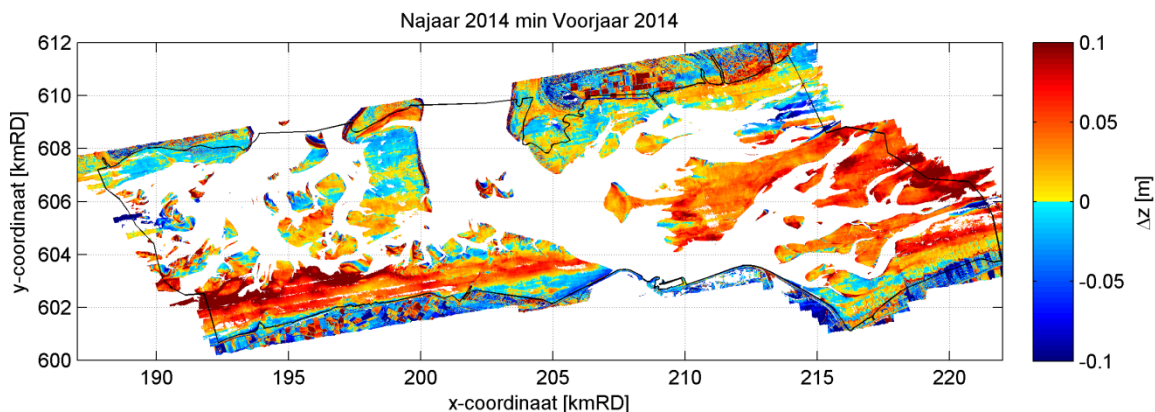
Het verschil tussen de oude bodems en de bodem van het voorjaar van 2014 staat weergegeven in Figuur 4.1. In Figuur 4.2 is het verschil van de oude bodems t.o.v. de bodem van het najaar van 2014 zichtbaar.





Figuur 4.1 Verschilkaarten van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m oktober 2013) ten opzichte van de LiDAR opname van het voorjaar van 2014.

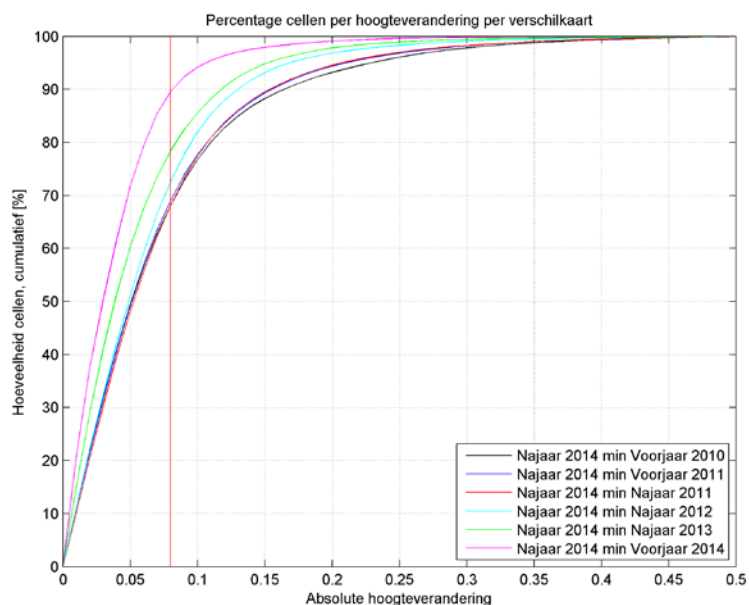




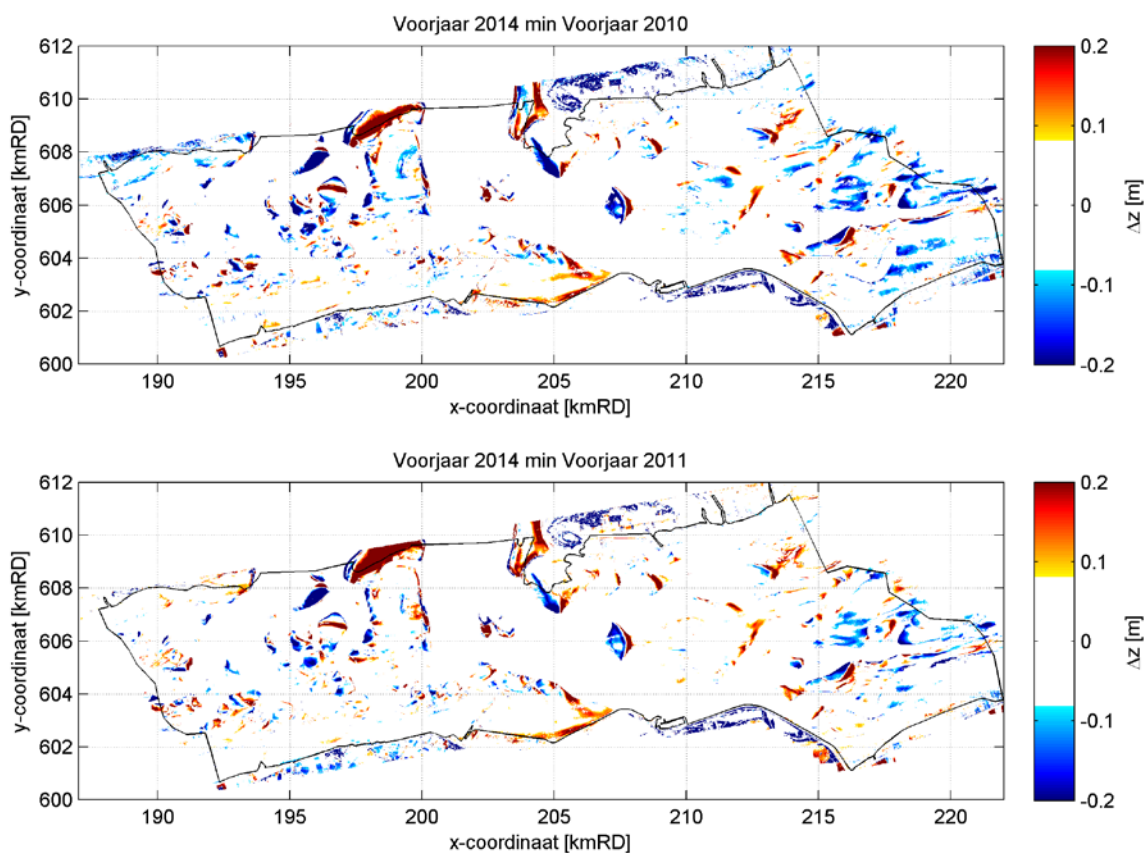
Figuur 4.2 Verschilkaarten van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m mei 2014) ten opzichte van de LiDAR opname van het najaar van 2014.

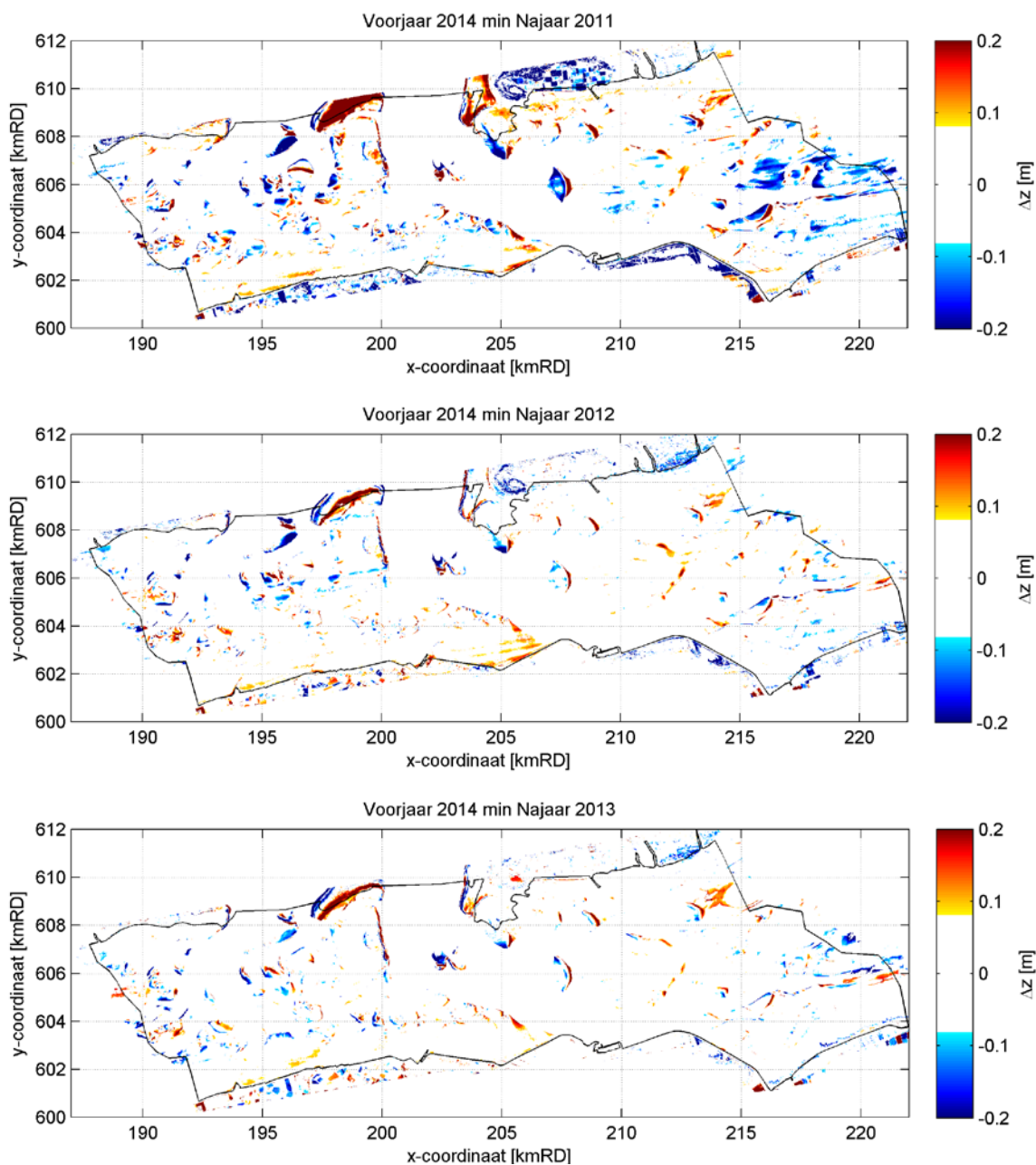
In de verschilkaarten zijn streeppatronen in de richting van de vluchtbanen terug te zien. Het is opvallend dat dit voor het verschil tussen de laatste drie opnames minder het geval lijkt. Mogelijk heeft dit te maken met de nieuwe scanner waarmee de opname is gemaakt. Voor een deel vallen de banen binnen de meetfout voor verschilkaarten van 8 cm. Figuur 4.3 laat zien dat meer dan 65% van de hoogteveranderingen binnen de foutmarge valt. Als de periode tussen de twee verschilkaarten korter is, en er morfologisch gezien dus kleinere veranderingen zijn, valt een nog groter percentage binnen de foutmarge. Als de we bodemkaart van het najaar van 2014 vergelijken met het voorjaar van 2014, heeft maar 10% van de cellen een verandering die groter is dan de foutmarge. Door de kleurschaal van Figuur 4.1 en Figuur 4.2 aan te passen zodat alleen nog de bodemhoogteverandering te zien is die groter is dan de fout voor verschilkaarten, blijft maar een klein percentage van de data zichtbaar (35% of minder). In principe zouden deze veranderingen verklaarbaar moeten zijn in termen van morfologische dynamiek en eventueel bodemdaling.

Bij de verschilkaarten waarbij de kleurenbalk is aangepast aan de meetfout (Figuur 4.4 en Figuur 4.5), zijn ook op sommige plekken nog streeppatronen zichtbaar, vooral bij de vergelijking van het najaar van 2014 met de eerdere bodems. Op het Rif (t.n.v. de Engelsmanplaat) is consequent sedimentatie te zien die groter is dan de meetfout, en ook aan de westzijde van Schiermonnikoog treedt afwisselend sedimentatie en erosie op. Het gele gebied dat in het najaar van 2014 te zien is ten westen van Lauwersmeer, aan de Waddenzeedijk, heeft een te sterk vluchtbaanpatroon om deze met zekerheid toe te schrijven aan sedimentatie. Een alternatieve verklaring kan zijn dat er in dit gebied een waterstand hoger dan de afkapgrens is opgetreden tijdens de opnames (zie bijlage B). Bovendien is deze sedimentatie ook niet terug te zien bij de verschilkaarten t.o.v. het voorjaar van 2014. Hoe dan ook zijn er geen gebieden die grootschalige erosie laten zien, er zijn dan ook geen indicaties van wadplaatdaling als gevolg van gaswinning. Dit is in overeenstemming met de verwachte bodemdaling van enkele millimeters per jaar, die in afwezigheid van compenserende sedimentatie, ook over een periode van 4 jaar (najaar 2010 t/m najaar 2014) kleiner zou zijn dan de meetfout.

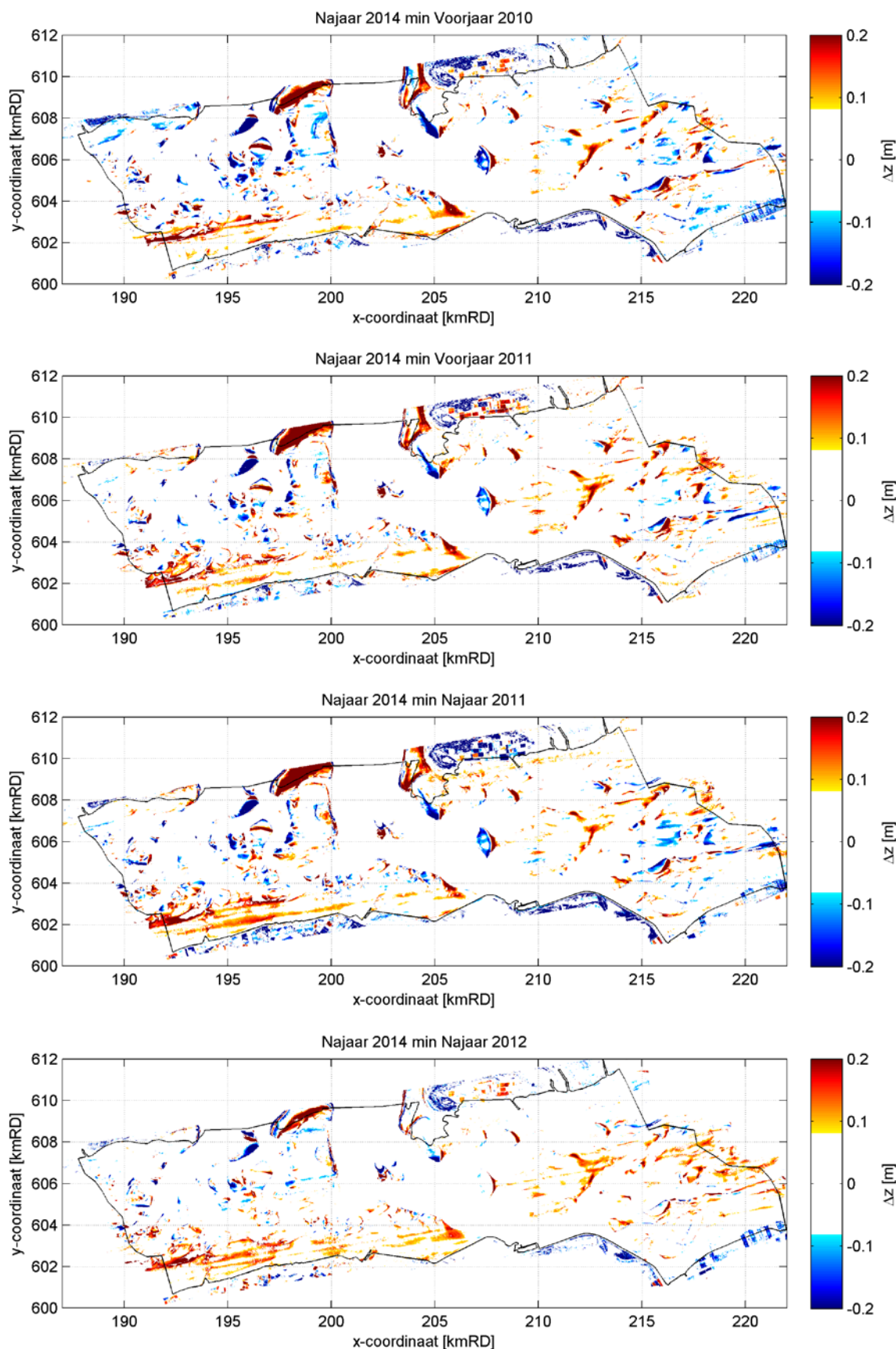


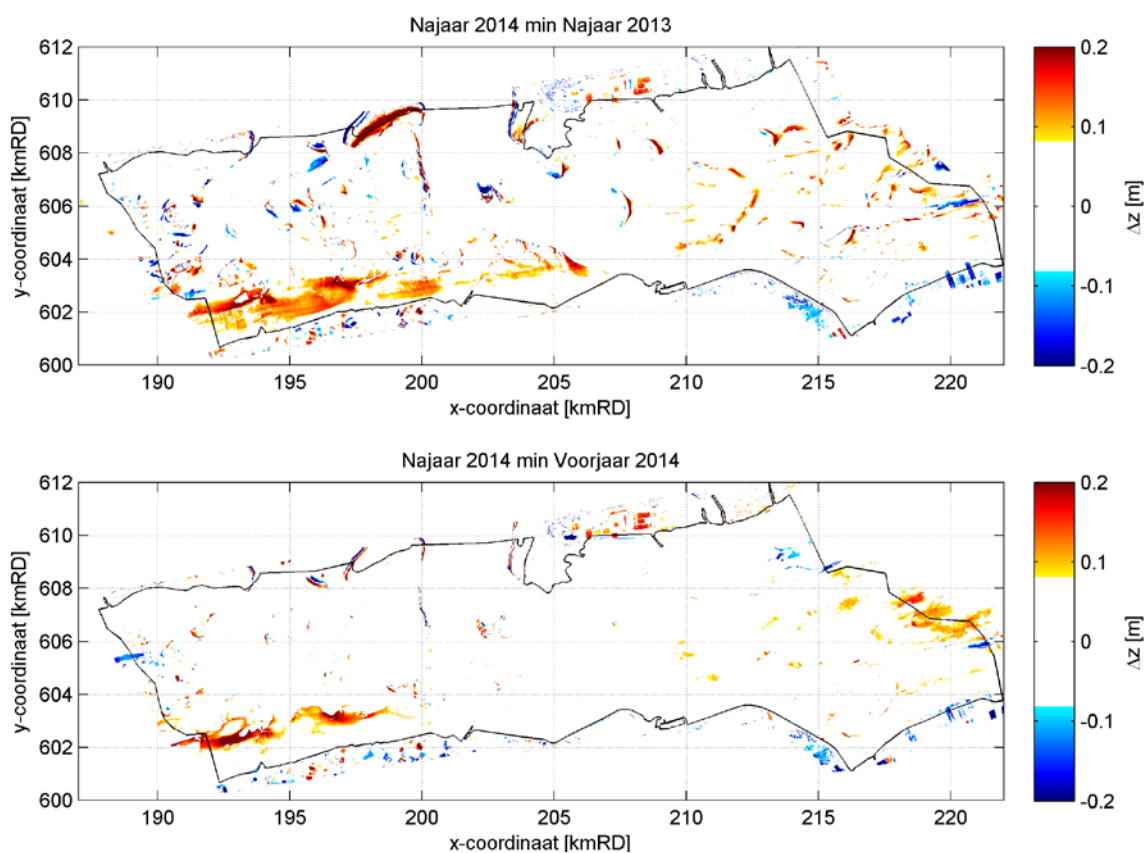
Figuur 4.3 Percentage van de cellen binnen de polygoon van het Friesche Zeegat met een bepaalde absolute waarde van de hoogteverandering in [m], cumulatief uitgezet voor de verschilkaarten van alle jaren t.o.v. het najaar van 2014. De verticale rode lijn geeft de grootte van de meetfout aan.





Figuur 4.4 Verschilkaarten van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m oktober 2013) ten opzichte van de LiDAR opname van het voorjaar van 2014 met kleurenbalk aangepast aan de meetfout.



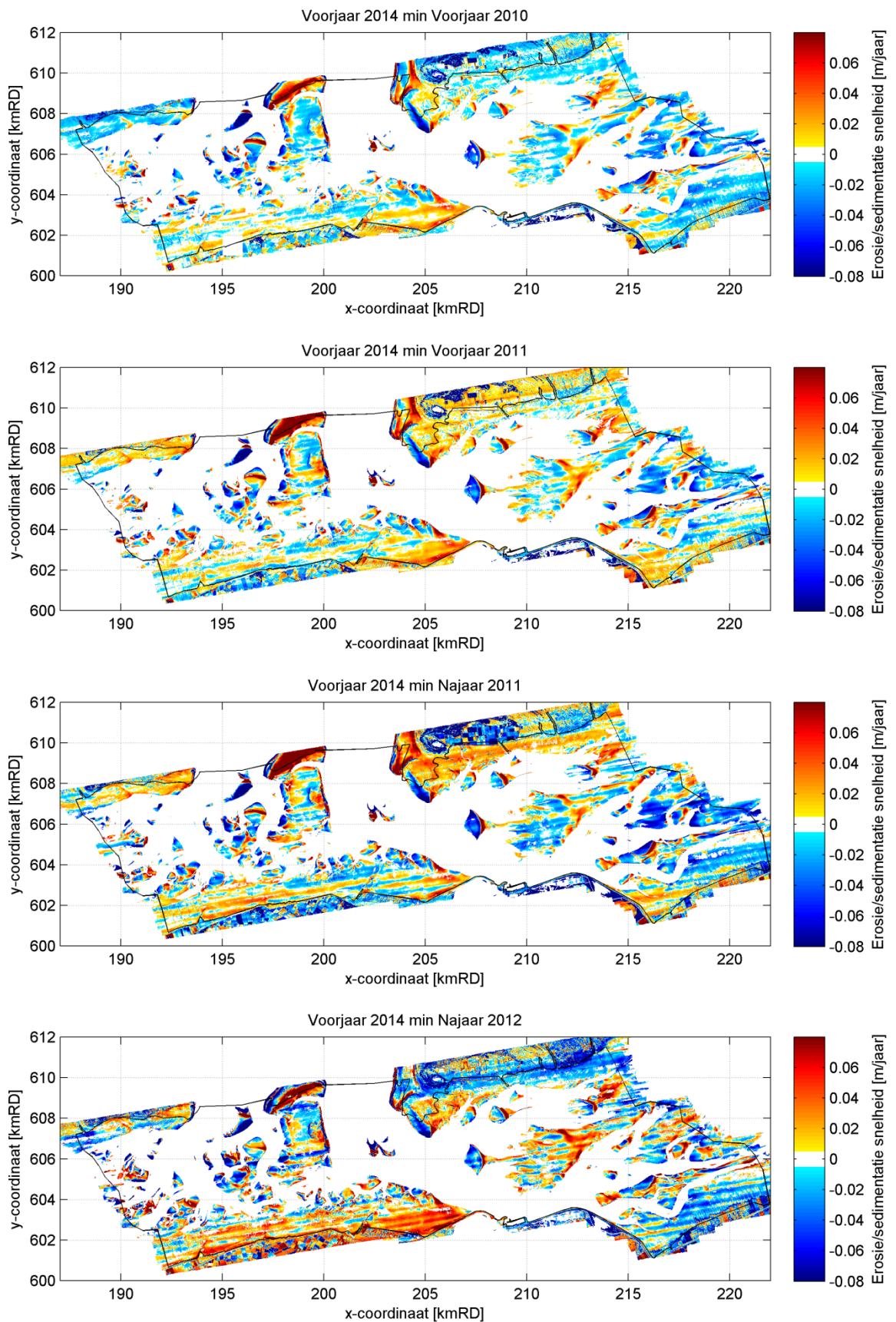


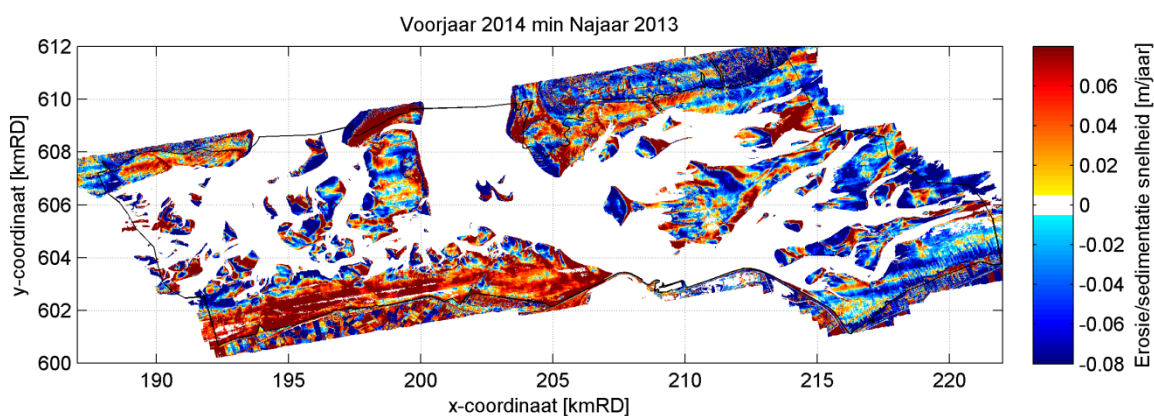
Figuur 4.5 Verschilkaarten van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m mei 2014) ten opzichte van de LiDAR opname van het najaar van 2014 met kleurenbalk aangepast aan de meetfout.

4.2 Erosie/sedimentatiesnelheden

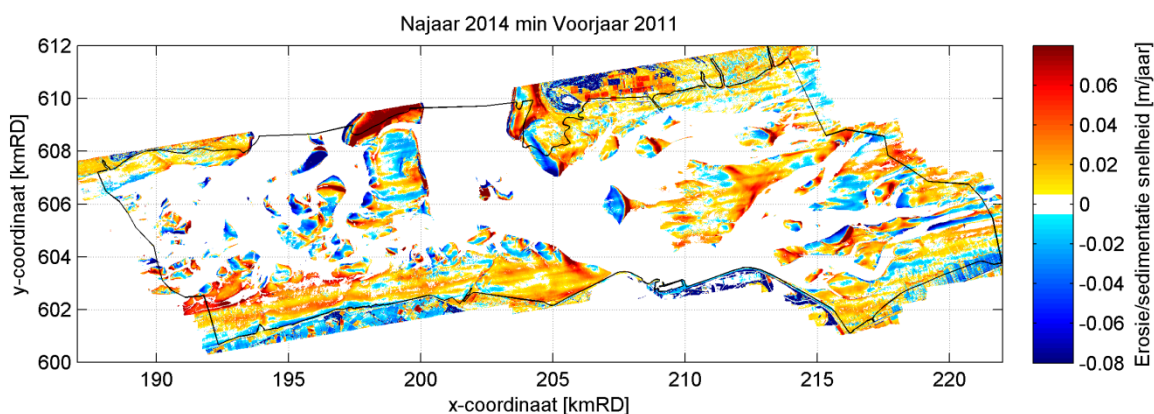
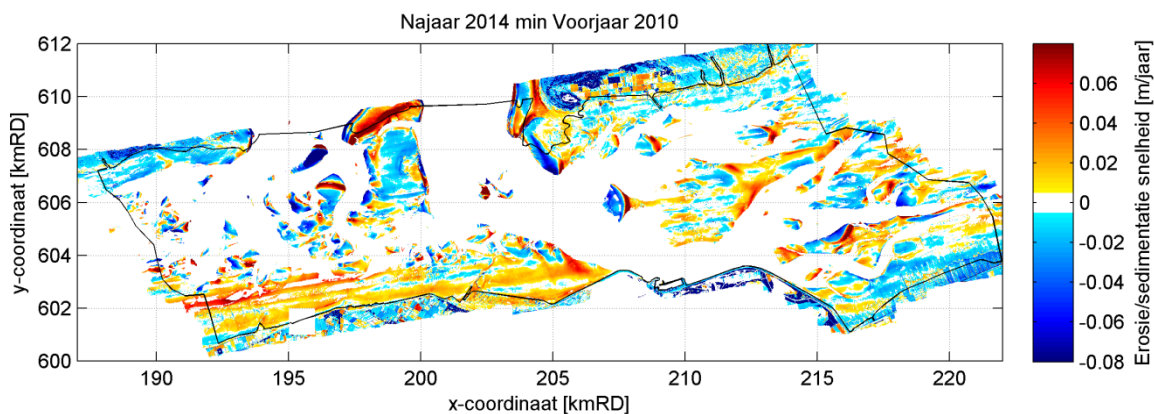
In deze paragraaf vergelijken we naar de snelheid van bodemveranderingen, door de bodemveranderingen uit de vorige paragraaf te interpoleren of extrapoleren naar veranderingen per jaar. De figuren van erosie/sedimentatiesnelheden zorgen ervoor dat de veranderingen tussen de verschillende jaren beter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

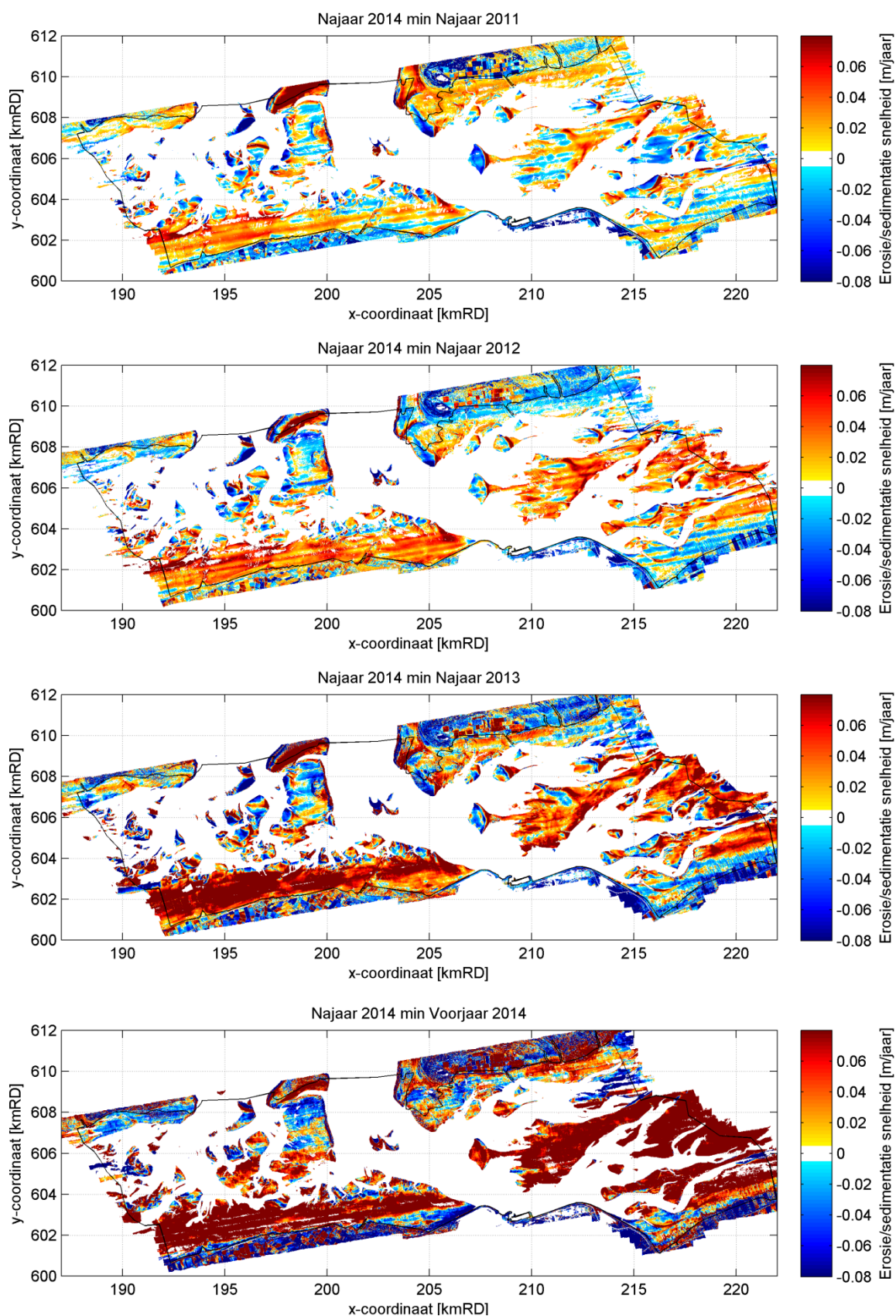
De erosie/sedimentatiesnelheden laten zien dat de snelheden groter zijn als de tijdperiode tussen de verschilkaarten kleiner is. Dat komt omdat de meetfout dan minder wordt uitgemiddeld. Het beeld wordt verder te veel gedomineerd door de streeppatronen om deze te vergelijken met de verschilkaarten van de RWS vaklodingen van 2005-2012, zie Figuur 4.8.



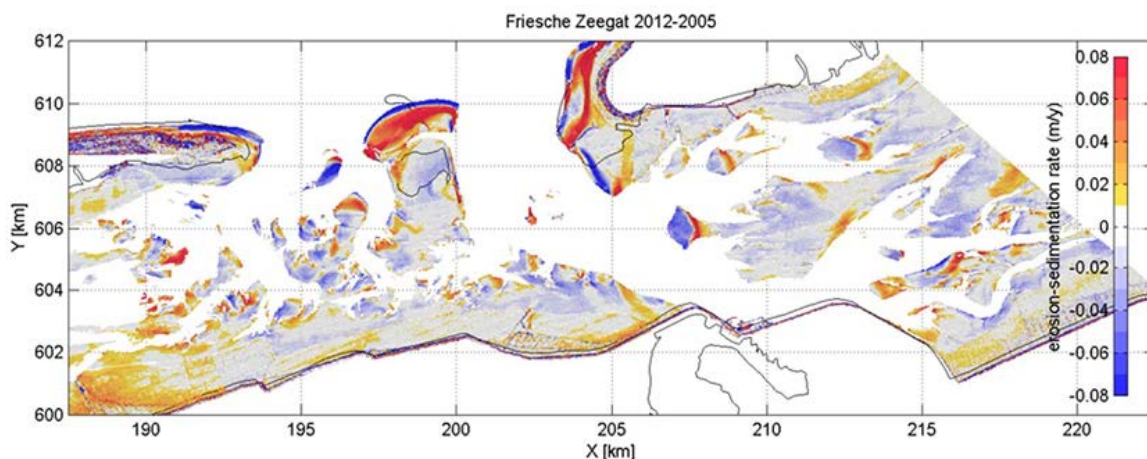


Figuur 4.6 Erosie/sedimentatiesnelheden in meter per jaar van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m oktober 2013) ten opzichte van de LiDAR opname van het voorjaar van 2014.



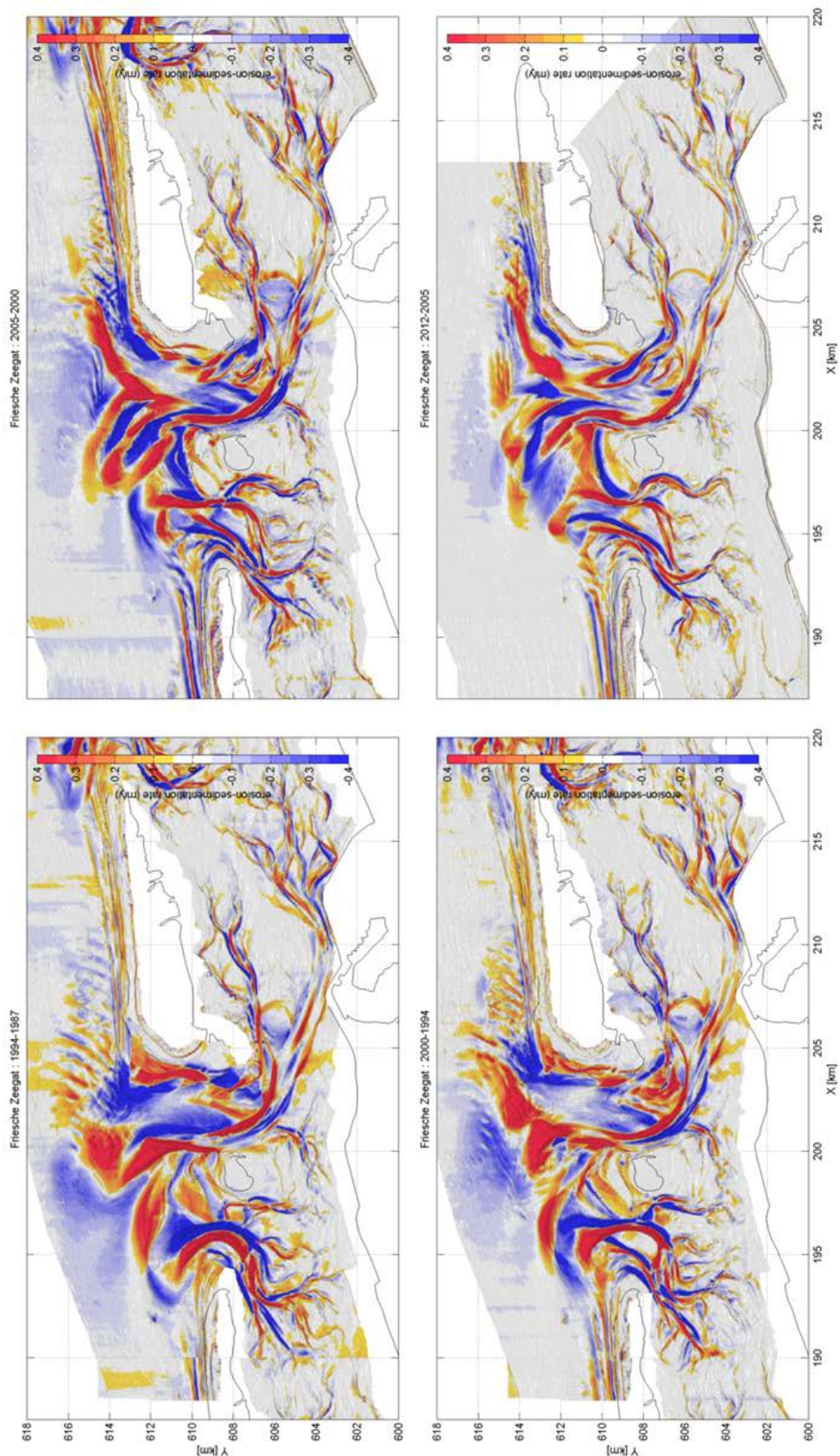


Figuur 4.7 Erosie/sedimentatiesnelheden in meter per jaar van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m mei 2014) ten opzichte van de LiDAR opname van het najaar van 2014.



Figuur 4.8 Erosie/sedimentatiesnelheden in meter van de RWS vaklodingen data van 2012 ten opzichte van 2005.

In Figuur 4.9 zijn de lange-termijn trends (1987-2012) van de bodemverandering in het Friesche Zeegat weergegeven op basis van de RWS data. In het Friesche Zeegat domineren geulmigraties het beeld. De veranderingen op de platen tussen de opeenvolgende opnames (orde 24 cm/6 jaar) zijn groter dan de meetfout. Oftewel, het geobserveerde gedrag is representatief voor de natuurlijke dynamiek in de morfologische ontwikkeling van de wadplaten / wadplaathoogtes. Gemiddeld over de recente metingen (2005 – 2012) ligt de erosiesnelheid van de platen in de orde 2 tot 3 cm/jaar. Er is geen verschil in snelheid te onderscheiden in de gaswinningsgebieden, zie Figuur 1.1, in vergelijking met het overige gedeelte van het bekken.



Figuur 4.9 Gemeten sedimentatie-erosiesnelheden (m/jaar) gebaseerd op de vaklodingen over de periode 1987-2012.

5 Analyse per deelgebied

In dit hoofdstuk worden de morfologische veranderingen geanalyseerd door middel van hypsometrische curven en histogrammen. Ze worden gemaakt voor de kombergingen van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag, maar ook voor enkele deelgebieden, die door de betrokken onderzoekers zijn gedefinieerd, zie Figuur 5.6. De hypsometrische curven geven per bodemhoogte het totale oppervlak van de LiDAR meting onder deze bodemhoogte. Het histogram geeft de oppervlakte verdeeld naar hoogteklaas weer (zie Cronin en Wang (2012) voor details). De hypsometrische curve wordt meestal per bekken of estuarium bekeken en heeft dan een typerende vorm, omdat er relatief veel intergetijdengebied is. Aan de hand van de hypsometrische curven en histogrammen kunnen de verschillende LiDAR-metingen met elkaar worden vergeleken.

Een kwestie die aandacht vraagt is verschillen in de gebiedsdekking van de data die de basis vormen voor deze analyse. In Cronin en Wang (2012) worden enkel de werkelijk aanwezige datapunten gebruikt voor de analyse. Er van uitgaande dat alle missende punten water betreffen, geeft dit een goed beeld van de hypsometrische curves boven de -0.5 m NAP. Als er ook missende punten boven het wad liggen, worden op deze manier gebieden met een verschillende oppervlakte of dekking met elkaar vergeleken.

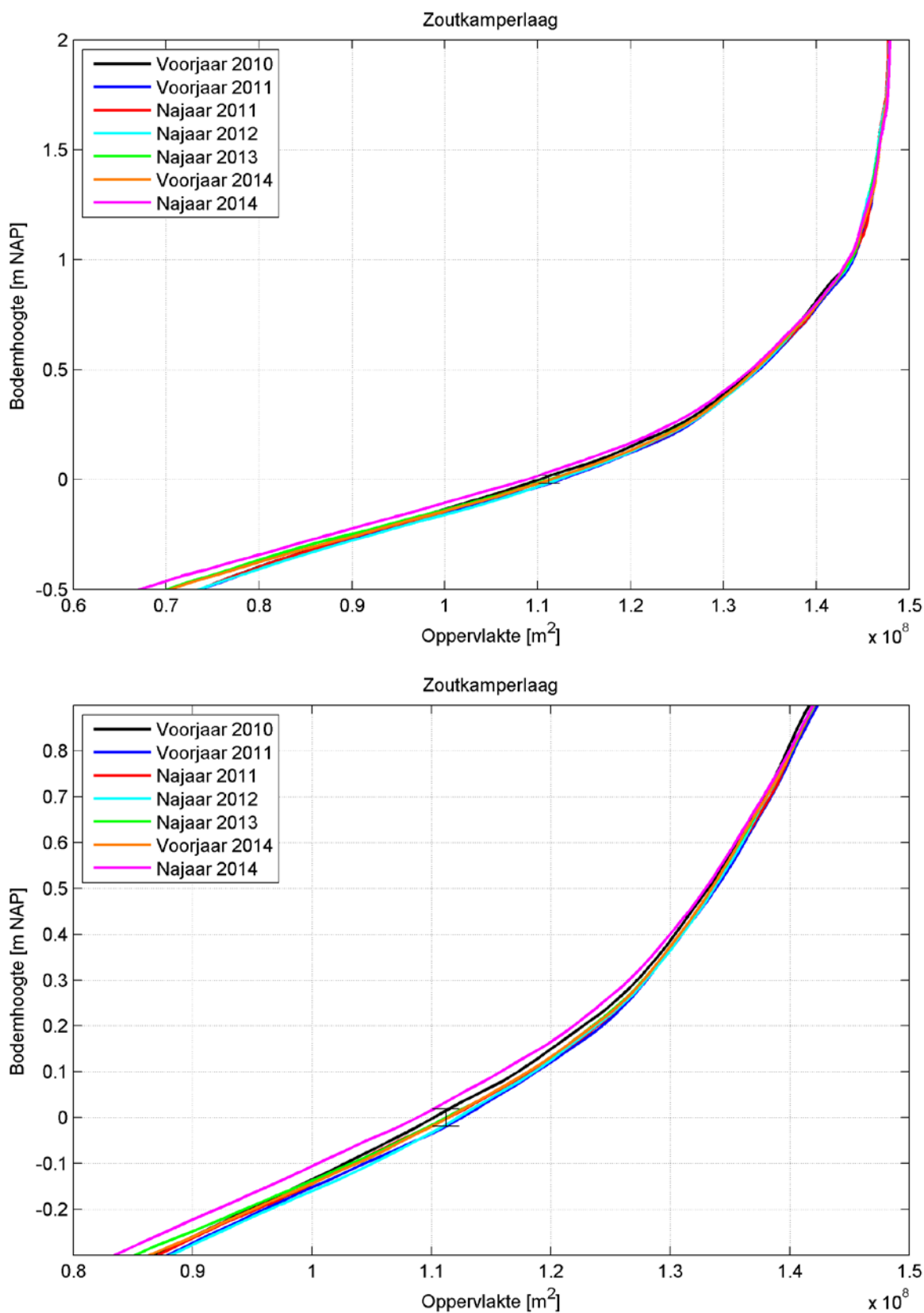
In Elias et al. (2013) zijn de gaten opgevuld door driehoeksinterpolatie vanuit de omliggende punten om zo 100% gebiedsdekking te krijgen. Impliciete aanname bij deze aanpak is dat interpolatie van de omliggende punten een voldoende nauwkeurige beschrijving van de missende data geeft. De dataset van het najaar van 2013 is van tevoren al geïnterpoleerd door Fugro (deze kaart heeft immers een dekking van 100%). Het zou consequent zijn om deze interpolatiemethode ook op de andere kaarten toe te passen, zodat alle bodemdata op dezelfde manier verwerkt zijn. Dit is een aanbeveling voor de volgende LiDAR data analyses.

Een andere methode om tot een consequente vergelijking te komen, is alleen de roosterpunten (cellen van 10x10 m) in de analyse te beschouwen, die in alle jaren een waarde voor de bodemligging hebben. Een nadeel hiervan is, dat er elk jaar minder punten overblijven.

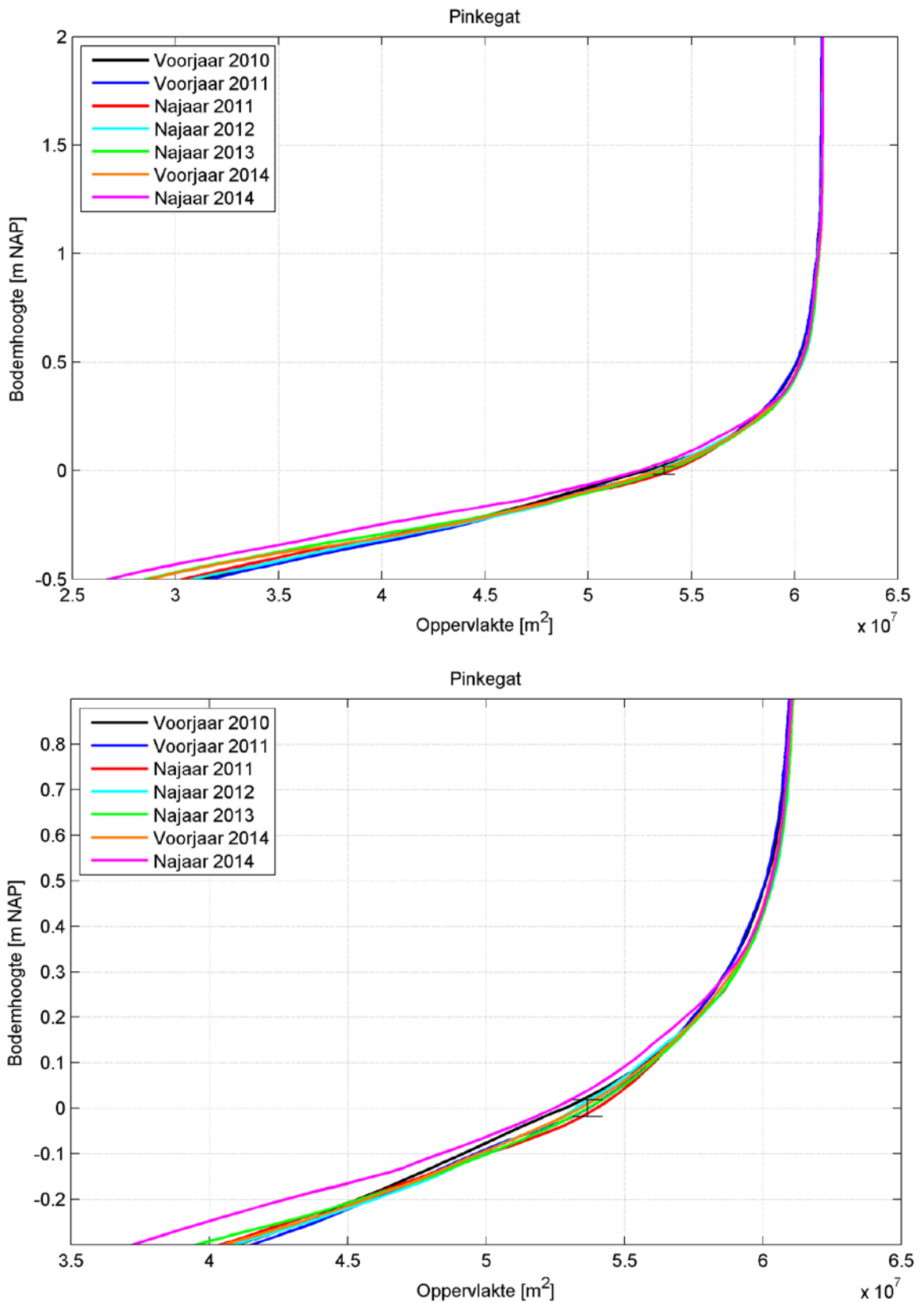
In huidige studie is besloten om de methode van Cronin en Wang (2012) te hanteren.

5.1 Analyse kombergingsgebieden

Figuur 5.1 en Figuur 5.2 geven de hypsometrische curven berekend voor de zeven LiDAR opnames voor de Zoutkamperlaag en het Pinkegat. De hypsometrische curven van zowel Zoutkamperlaag als het Pinkegat laten zien dat de bodem van het najaar van 2014 erg hoog ligt. Dit is opvallend. De veranderingen in beide kombergingsgebieden tussen opeenvolgende opnames zijn erg klein ten opzichte van de meetfout, zie de zwarte errorbar op 0 m NAP. De errorbar geeft de grootte van de systematische fout met langgolvig karakter aan, deze is voor alle jaren en voor alle bodemhoogtes gelijk aan 3,8 cm. Doordat de veranderingen klein zijn ten opzichte van de fout, kunnen er geen conclusies getrokken worden over natuurlijke fluctuaties dan wel morfologische trends van de wadplaten.

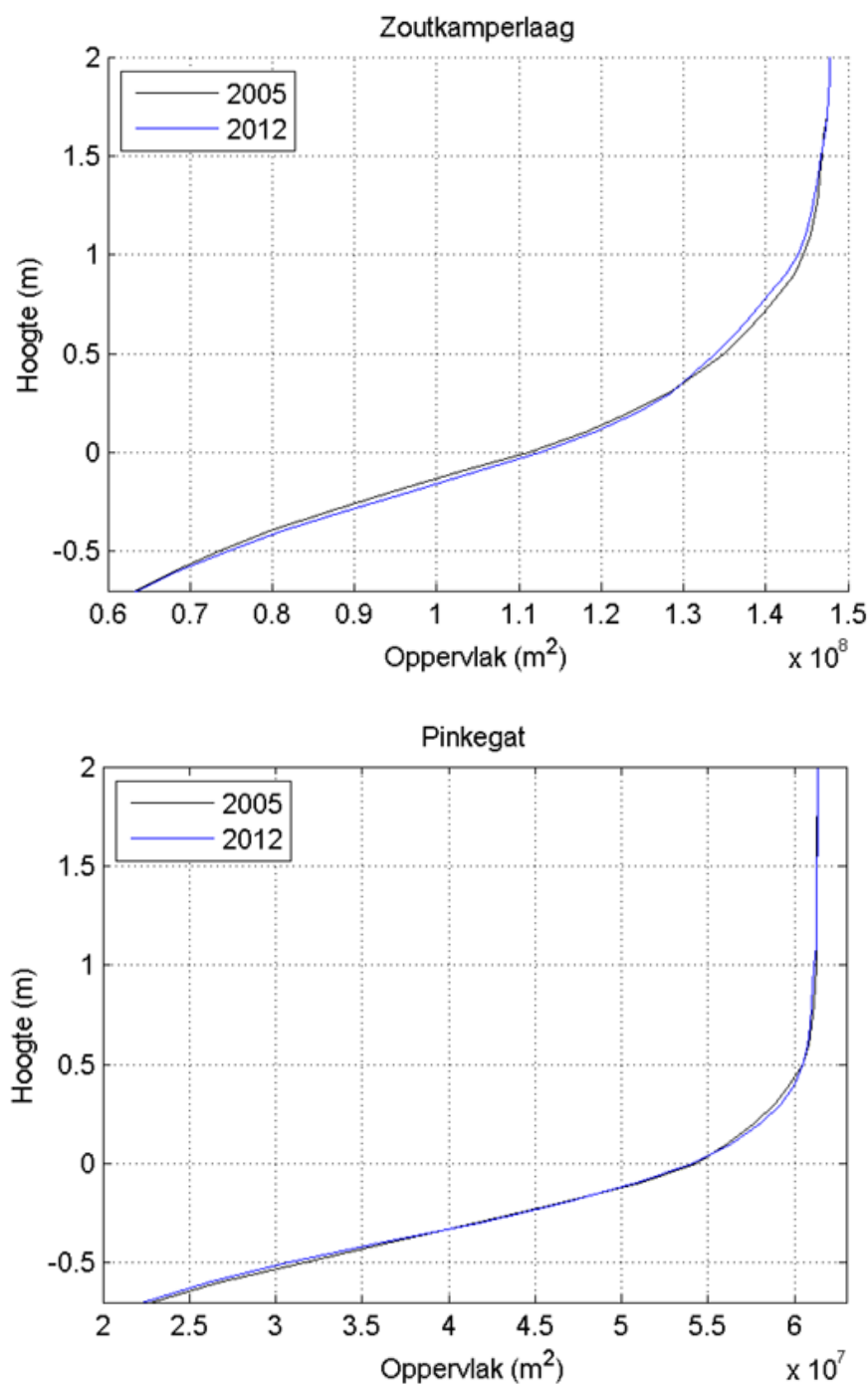


Figuur 5.1 Hypsometrische curves voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag voor alle LiDAR opnames voor het gehele hoogtebereik (boven) en ingezoomd (onder). De meetfout van 3,8 cm is weergegeven met een errorbar.



Figuur 5.2 Hypsometrische curves voor het kombereingsgebied Pinkegat voor alle LiDAR opnames voor het gehele hoogtebereik (boven) en ingezoomd (onder). De meetfout van 3,8 cm is weergegeven met een errorbar.

Ter referentie zijn ook voor de Rijkswaterstaat LiDAR data van 2005 en 2012 de hypsometrische curven bepaald (Figuur 5.3). Ook al zijn deze data op een andere manier verwerkt kan dit toch een beeld van de trend geven. Ook uit deze curven blijkt dat de veranderingen relatief gering zijn. De oppervlakten in het Pinkegat nemen iets toe beneden de 0 m NAP en af hierboven. In Zoutkamperlaag is dit beeld omgedraaid met een toename boven de 0 m NAP en een afname hieronder.

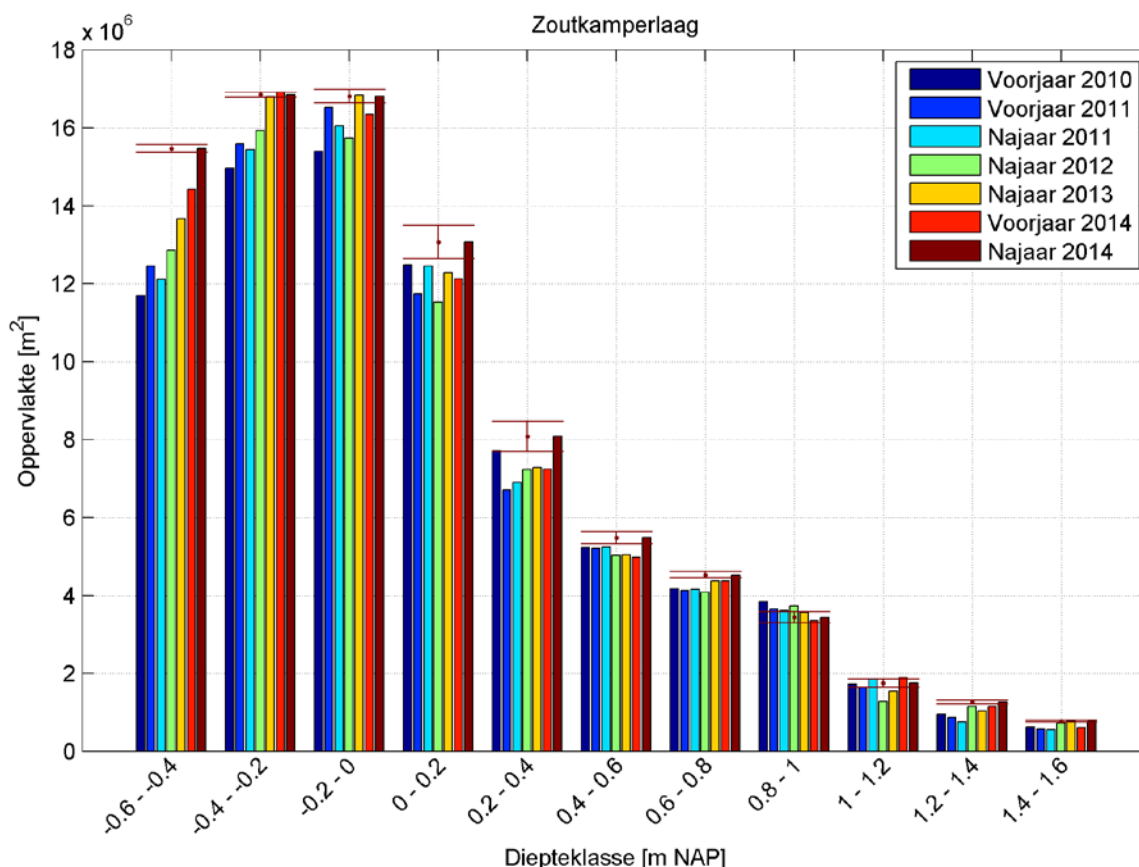


Figuur 5.3 Hypsometrische curven gebaseerd op de Rijkswaterstaat Vaklodgingen voor de jaren 2005/2006 en 2012.

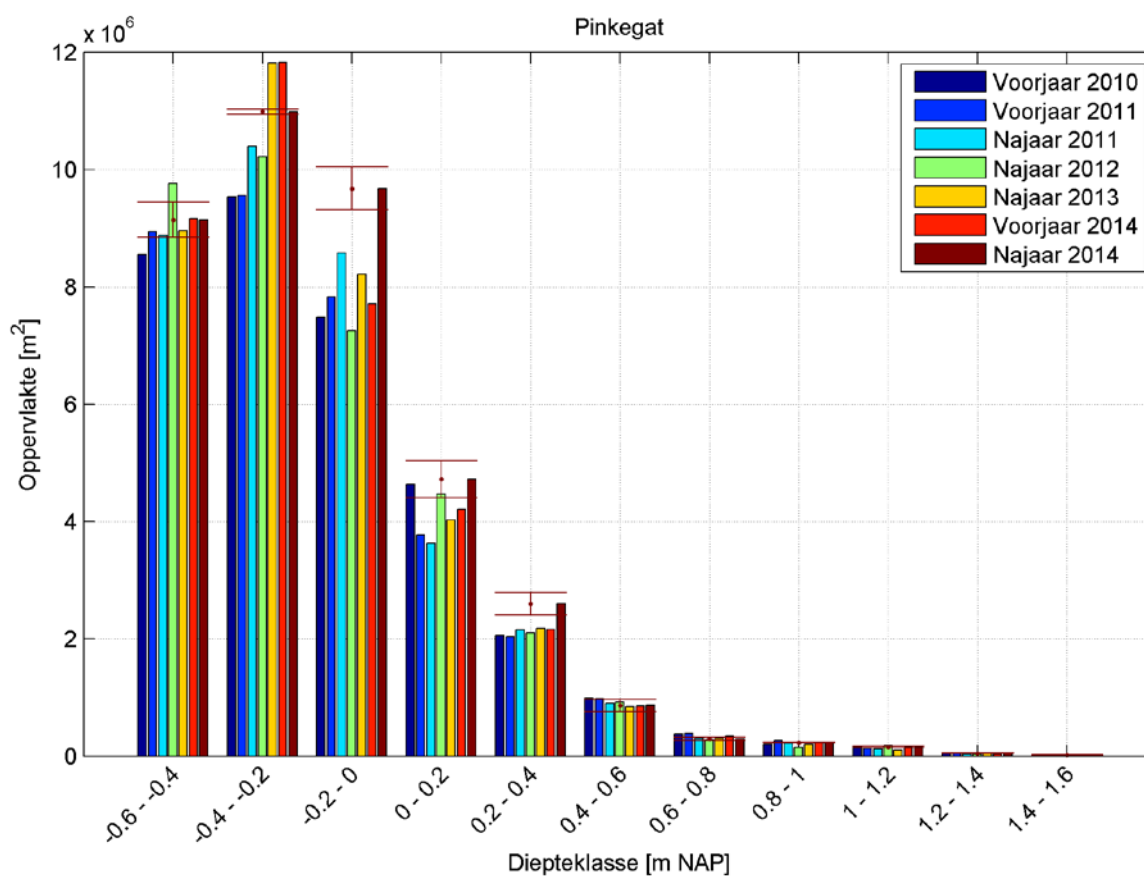
Doordat de lijnen dicht op elkaar liggen zijn de verschillen in de hypsometrische curven moeilijk te onderscheiden. Het histogram gepresenteerd in Figuur 5.4 geeft een duidelijkere weergave van de verschillen. Voor iedere hoogteklaas is het oppervlak weergegeven. Omdat er een systematische fout zit in de hoogte, werkt dit ook door in de oppervlakte per hoogteklaas. Daarom is ook deze fout berekend, door de tweede afgeleide van de hypsometrische curve (Figuur 5.1 en Figuur 5.2) te vermenigvuldigen met de fout van 3,8 cm, in formulevorm:

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

Deze fout is voor het najaar van 2014 met bruine errorbars weergegeven in de histogrammen zoals afgebeeld in Figuur 5.4 en Figuur 5.5.



Figuur 5.4 Histogram van de oppervlaktes per diepteklasse voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De bruine errorbar geeft de fout voor het najaar van 2014 aan.

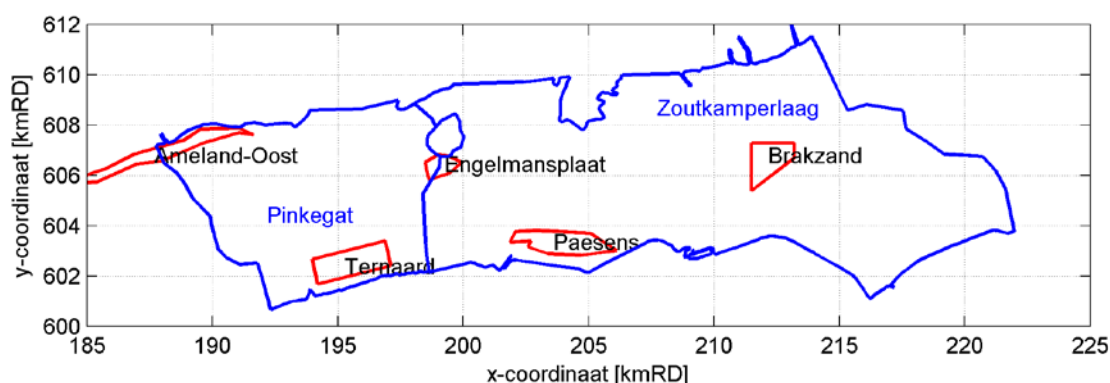


Figuur 5.5 Histogram van de oppervlaktes per diepteklasse voor het kombergingsgebied Pinkegat. De bruine errorbar geeft de fout voor het najaar van 2014 aan.

Bij Zoutkamperlaag neemt de oppervlakte van de klassen onder de 0 m NAP toe. De arealen boven 0 m NAP fluctueren wat, maar in het najaar van 2014 is het areaal wel toegenomen. Feit dat de laatste drie jaren voor de meeste diepteklassen een groter areaal aangeeft, kan het gevolg zijn van de hogere dekking in het bekken. Dit geldt ook voor het Pinkegat. Daar is het areaal lager in het profiel (beneden -0,2 m NAP) afgenomen en daarboven toegenomen. Boven 0,4 m NAP blijft het areaal ongeveer gelijk.

5.2 Analyse deelgebieden

De ligging van de deelgebieden is weergegeven in Figuur 5.6. Voor elke van de deelgebieden wordt de hypsometrische curve weergegeven. De deelgebieden hebben niet in elk jaar volledige dekking van data, zo blijkt uit Tabel 5.1. Voor de analyse wordt er weer vanuit gegaan dat de missende punten beneden -0,5 m NAP liggen zijn. De hypsometrische curven zijn weergegeven in Figuur 5.7.

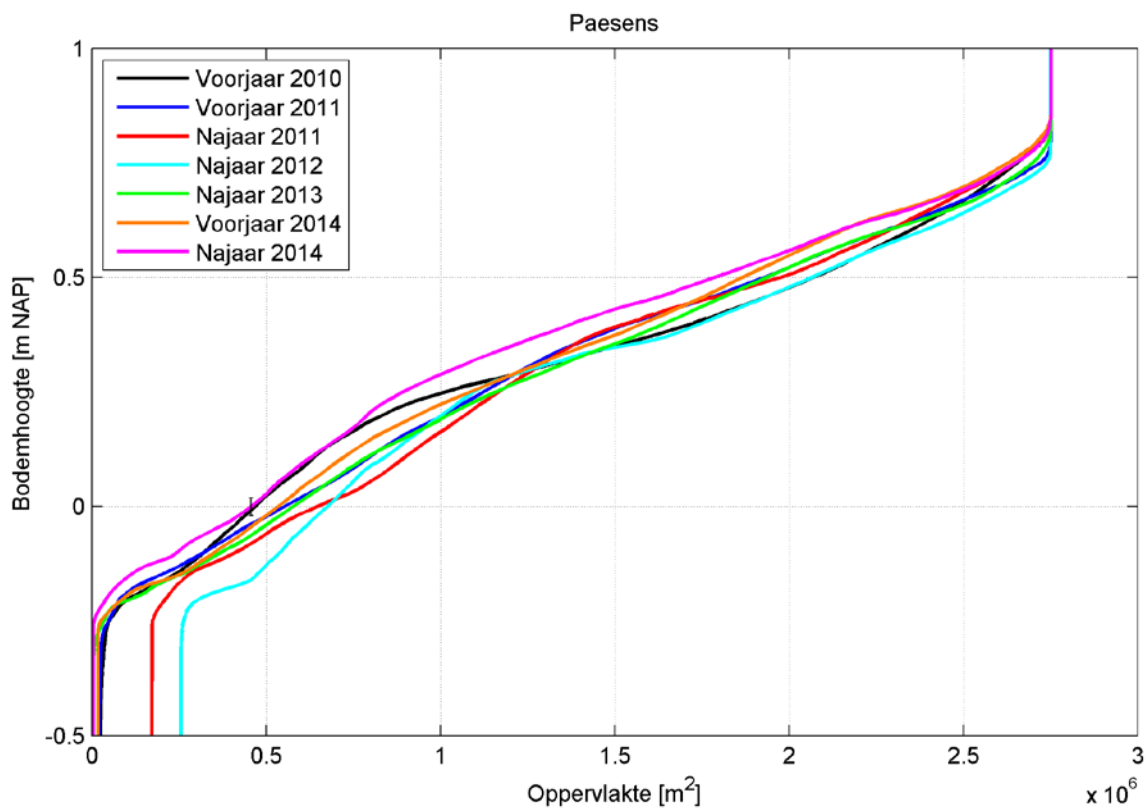
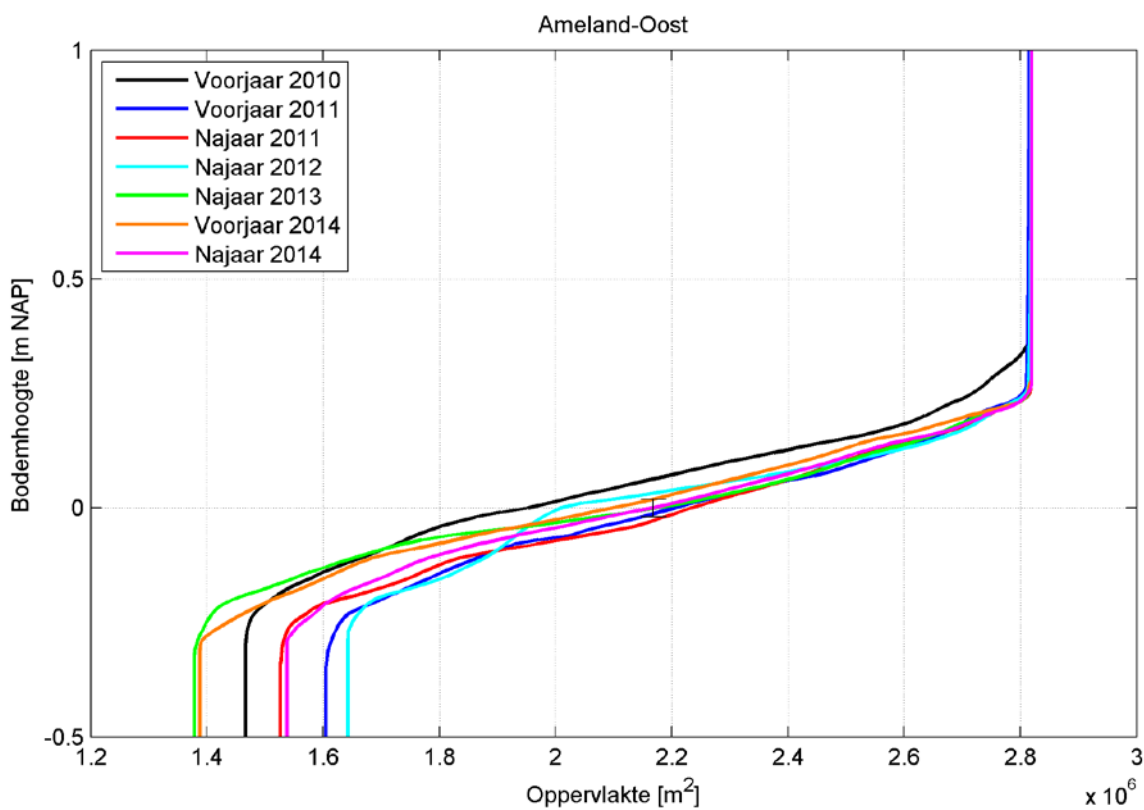


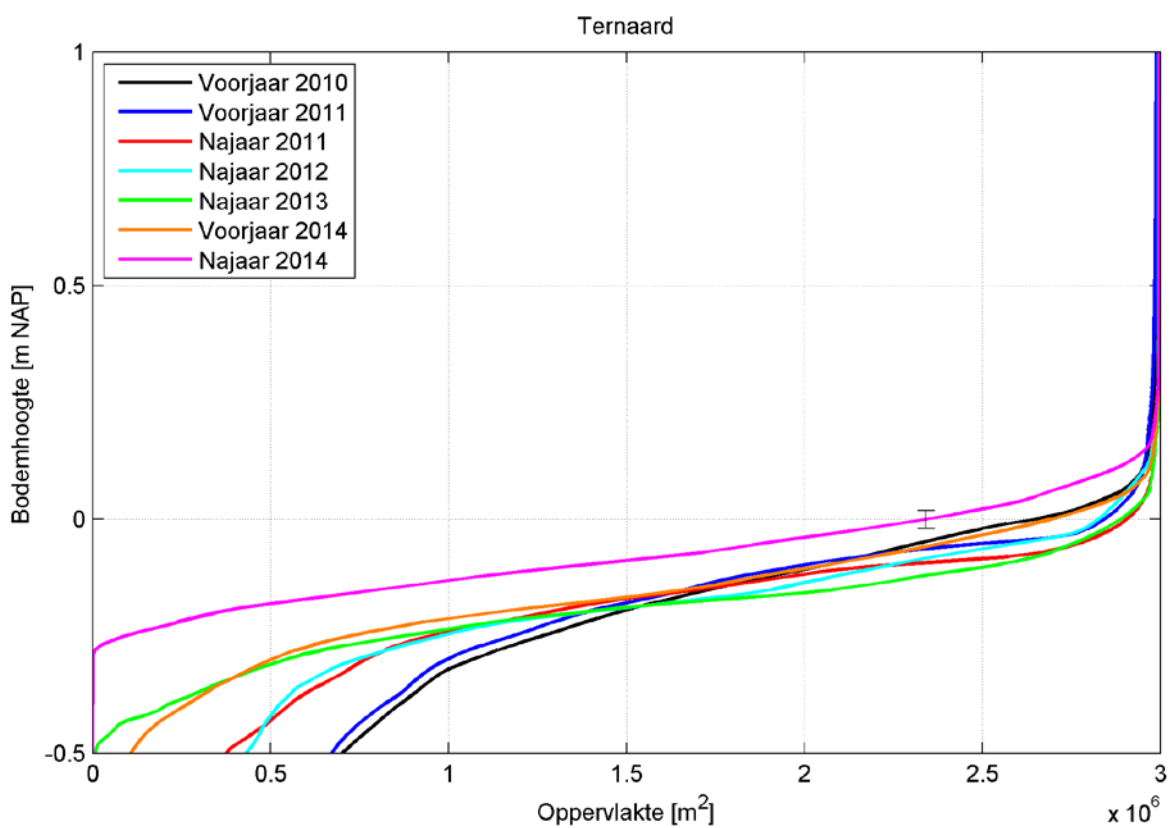
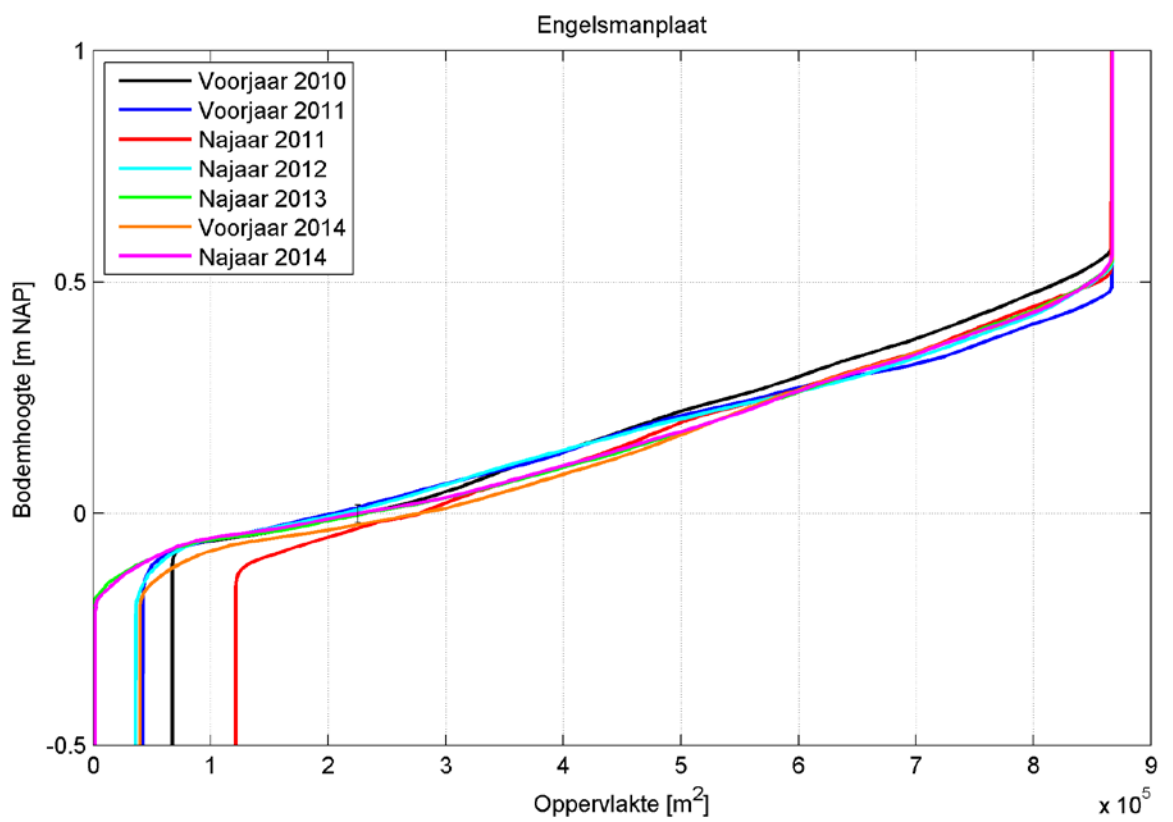
Figuur 5.6 Ligging van de vijf deelgebieden (rood) binnen de kombergingsgebieden van Pinkegat en Zoutkamperlaag (blauw).

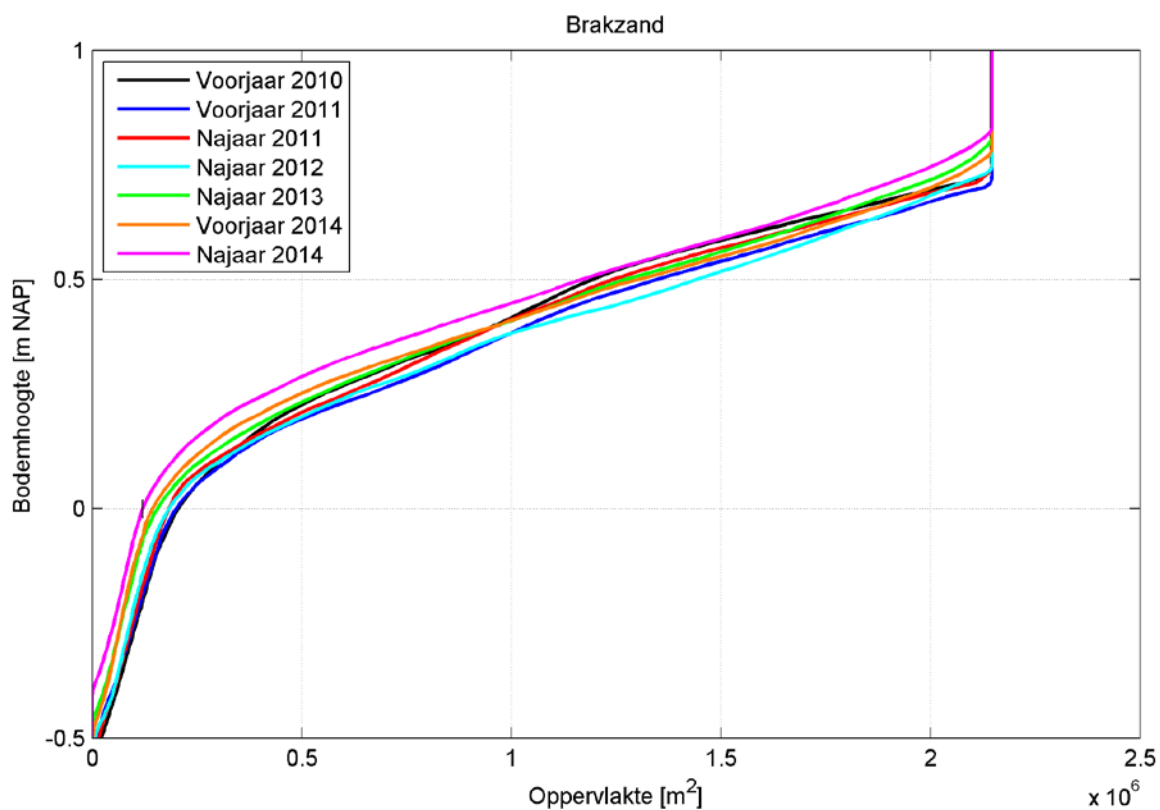
Tabel 5.1 Weergave van het percentage cellen met waarden na filtering water voor de verschillende deelgebieden.

jaar	Ameland-Oost	Paesens	Engelsmanplaat	Ternaard	Brakzand
voorjaar 2010	48,0	99,2	92,2	80,6	99,5
voorjaar 2011	43,1	99,2	95,1	80,8	99,6
najaar 2011	45,8	93,7	86,0	90,7	99,3
najaar 2012	41,7	90,7	95,8	87,8	99,7
najaar 2013	51,1	100,0	100,0	100,0	100,0
voorjaar 2014	50,7	99,3	95,4	97,4	99,9
najaar 2014	45,5	99,8	99,8	100,0	100,0

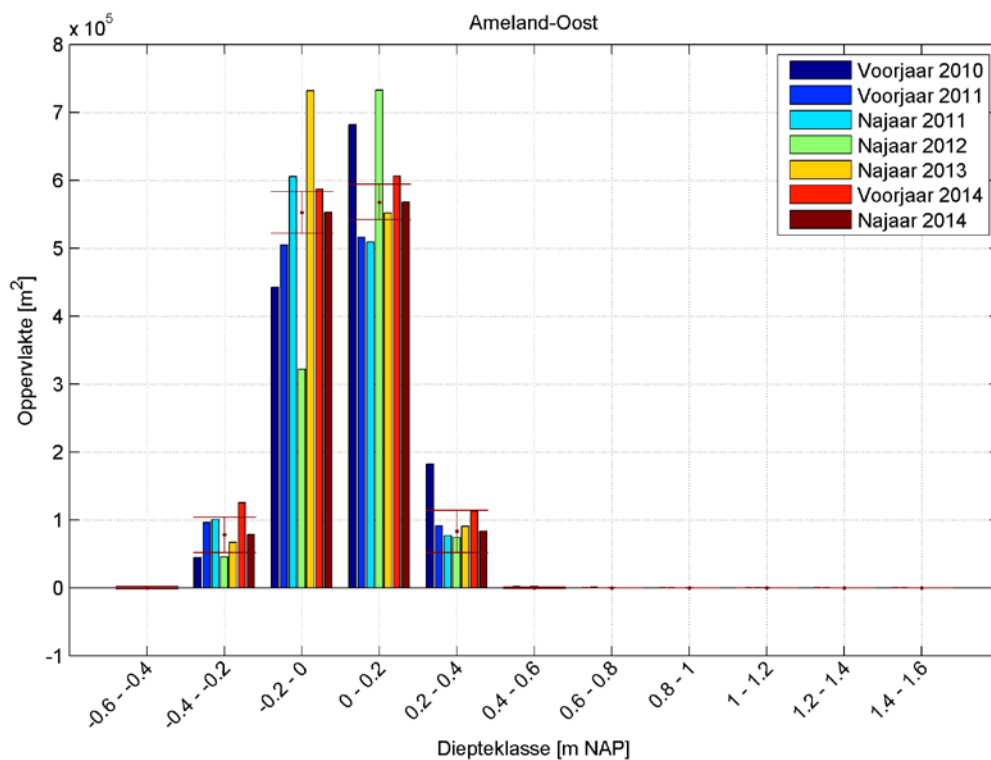
Uit de hypsometrische curves blijkt dat de bodemveranderingen groter zijn dan de meetfout van 3,8 cm, gegeven de aanname dat de missende gebieden lager zijn dan -0.5 m NAP (behalve voor Ameland-Oost, waar een deel van de polygoon buiten het Friesche Zeegat valt en dus niet is opgenomen met LiDAR data). Bij deelgebied Ameland-Oost zijn alle bodems lager dan de eerste bodem van het voorjaar van 2010. Tussen de jaren ligt de bodem soms hoger en soms lager. Dit is ook deels het gevolg van het verschil in dekking tussen de jaren. Bij Paesens lijkt een sedimenterende trend gaande, en ligt de bodem van het najaar van 2014 veel hoger dan de andere jaren. Voor een deel kan dit door de hogere dekking komen, en voor een deel doordat dit deel van het bekken is gevlogen bij een te hoge waterstand. Het najaar van 2013 heeft ook een hoge dekking en een lagere bodemligging. Voor een deel zal er dus ook sedimentatie zijn opgetreden bij Paesens. Bij Engelsmanplaat lijkt erosie op te treden, aangezien de bodem van het voorjaar van 2010 het hoogst ligt en de andere bodems lager. Wel zijn de verschillen klein ten opzichte van de meetfout en de verschillen die op basis van het verschil in dekking kunnen worden verklaard. Bij Ternaard ligt de bodem soms lager en soms hoger dan het jaar ervoor, maar de bodem van 2014 ligt buitengewoon veel hoger. Dit was eerder ook terug te zien in de verschilkaarten en daar aan de vluchtbanen gelinkt. Zowel de bodem van het najaar van 2013 als de bodem van het najaar van 2014 hebben een dekking van 100%. Deze twee hypsometrische curves hebben een vergelijkbare vorm, maar die van 2014 ligt veel hoger. Bij Brakzand ligt de bodem van 2014 eveneens hoog. In de voorgaande jaren wordt de bodem afwisselend hoger en lager, ook als gevolg van de meetfout (de verschillen tussen de jaren zijn dezelfde orde grootte als de meetfout), de verschillen in dekking zijn klein.



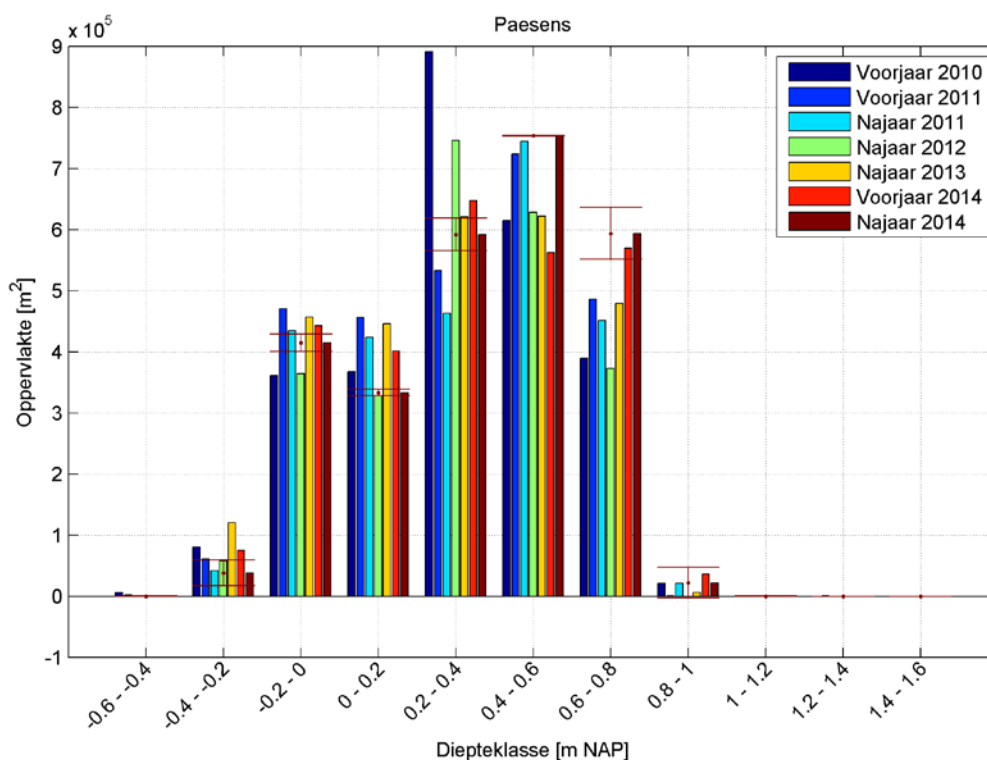




Figuur 5.7 Hypsometrische curves voor de vijf deelgebieden.

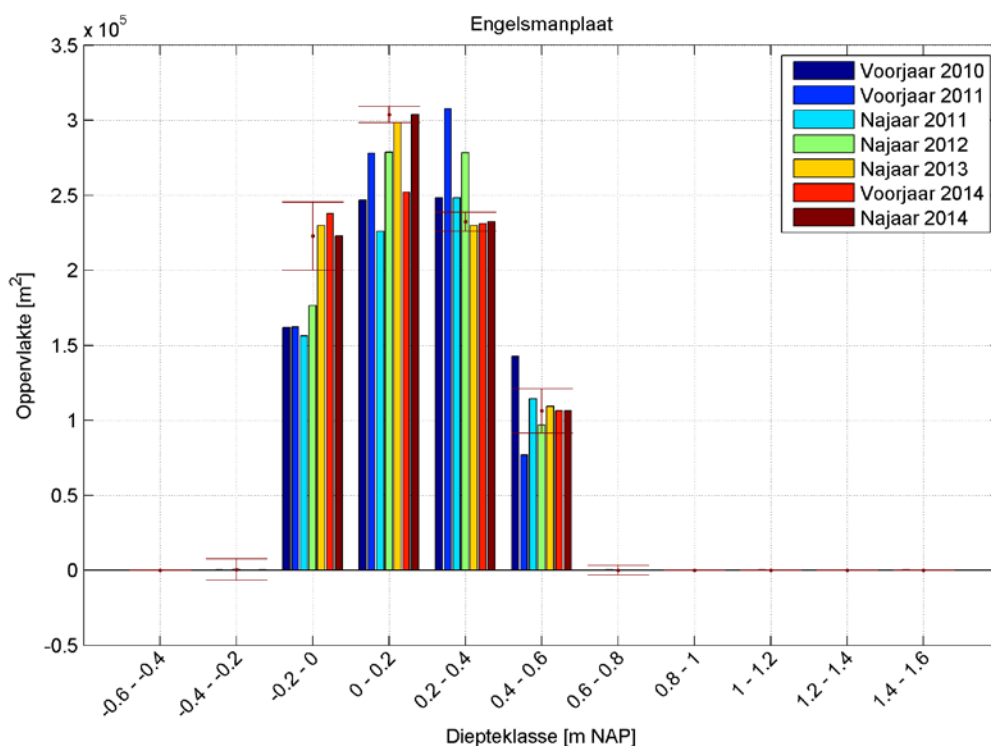


Figuur 5.8 Histogram voor deelgebied Ameland-Oost

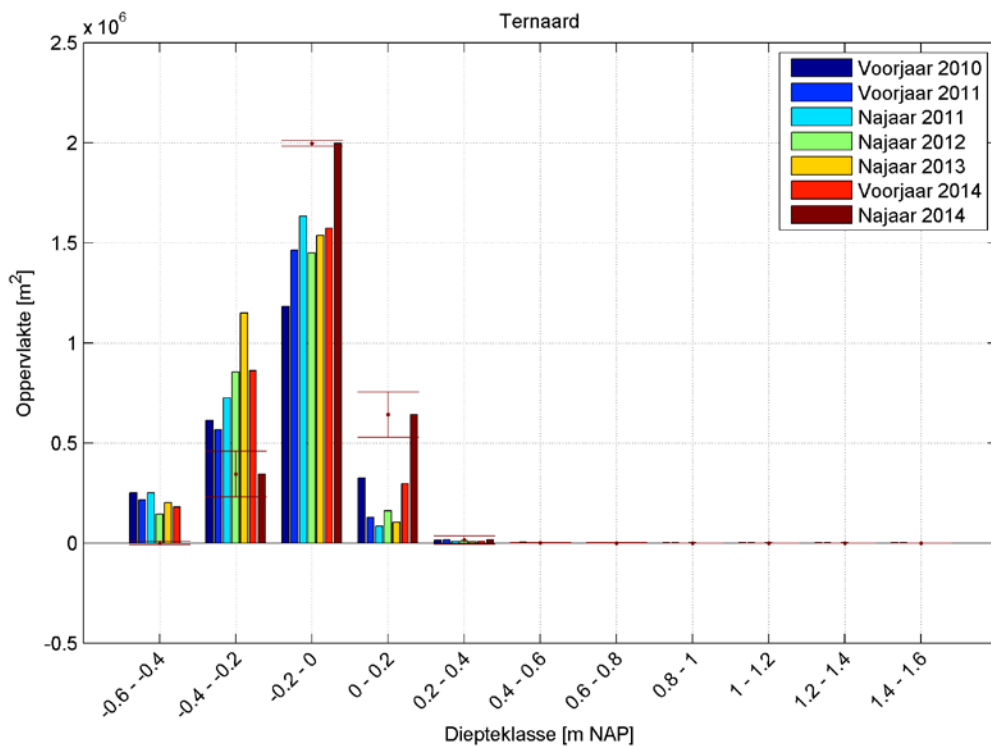


Figuur 5.9 Histogram voor deelgebied Paesens

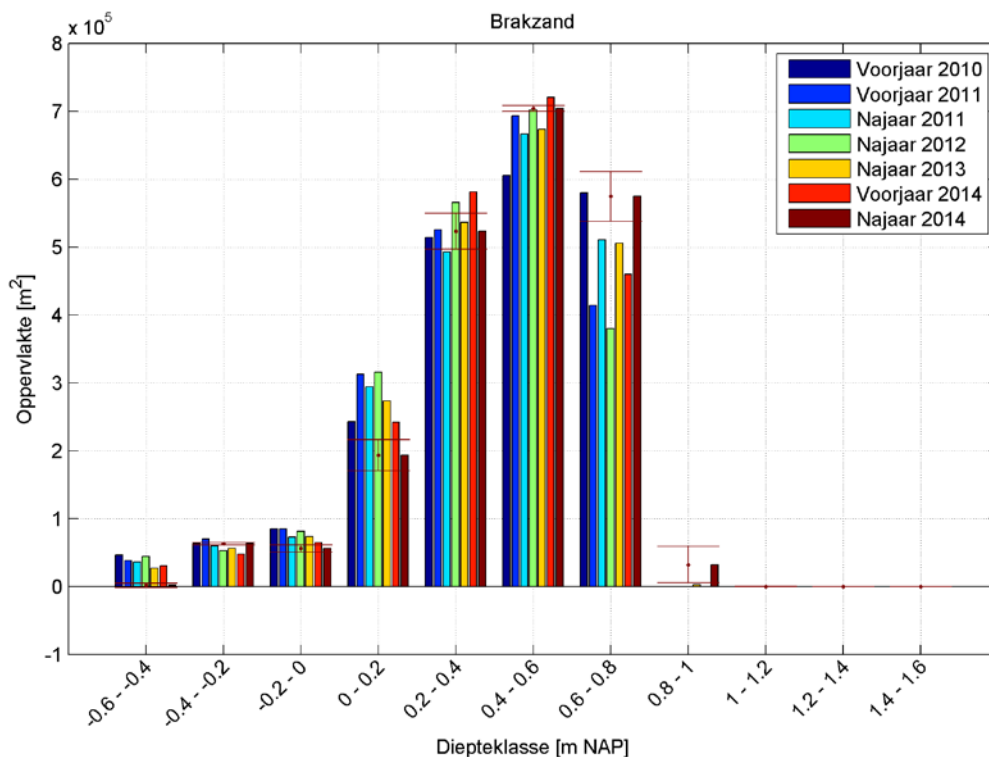
Het deelgebied Ameland-Oost heeft een bodemhoogte tussen -0,4 en +0,4 m NAP met het zwaartepunt rond NAP. In 2014 is het areaal in alle klassen afgenomen. Dit kan deels te verklaren zijn door de lagere dekking (zie Figuur 5.6). Het gebied Paesens is met een bereik tussen -0,4 m NAP en +1 m NAP minder vlak dan Ameland-Oost. Boven de 0,4 m NAP is het areaal toegenomen, daaronder afgenomen. De Engelsmanplaat ligt vrij hoog, tussen -0,2 en +0,6 m NAP. De grootste verandering heeft plaatsgevonden tussen de 0 en 0,2 m NAP, waar het areaal in het voorjaar van 2014 erg was afgenomen en in het najaar weer toegenomen.



Figuur 5.10 Histogram voor deelgebied Engelsmanplaat



Figuur 5.11 Histogram voor deelgebied Ternaard



Figuur 5.12 Histogram voor deelgebied Brakzand

Het gebied bij Ternaard ligt tussen de -0,6 en 0,4 m NAP, maar het merendeel van het deelgebied ligt onder NAP. Boven de -0,2 m NAP neemt het areaal toe en daar beneden neemt het af. Bij Brakzand is het areaal per klasse erg variërend in de tijd. Het grootste deel van het areaal ligt rond de 0,5 m NAP. Beneden de 0,5 m NAP neemt het areaal af, en daarboven toe.

6 Discussie, conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De LiDAR data vanaf het voorjaar van 2010 beslaan zeven opnames, die in deze rapportage zijn vergeleken om te kijken of er morfologische veranderingen optreden in het kombergingsgebied van het Friesche Zeegat. Het doel van de analyse is te kijken of er veranderingen in de wadplaathoogte en –oppervlakte waarneembaar zijn, die gerelateerd kunnen worden aan bodemdaling als gevolg van gaswinning.

Ondanks dat de periode tussen de eerste en de laatste LiDAR opname steeds groter wordt, valt het merendeel van de morfologische veranderingen nog binnen de foutenmarge. Dit is in lijn met alle voorgaande Deltares studies (Arentz en Vroom, 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang, 2012; Wang et al., 2010). Het betekent dat het merendeel van de veranderingen in bodemhoogte in het betreffende gebied in elk geval kleiner zijn dan de meetfout. Aangezien het doel van de analyse is te bestuderen of er bodemhoogteveranderingen zijn als gevolg van bodemdaling door gaswinning, en deze bodemdaling aan het aardoppervlak geschat wordt op maximaal enkele millimeters per jaar, kunnen de veranderingen waar de interesse naar uitgaat voorlopig nog niet worden waargenomen met de LiDAR opnames, gegeven de meetfout van de techniek. Dit betekent dat er tot op heden geen bodemveranderingen als gevolg van de gaswinning waargenomen zijn.

Voor een klein deel van de veranderingen in bodemhoogte geldt dat ze groter zijn dan de meetfout en deze zijn dan ook het gevolg van de morfologische dynamiek. Dit betreft vooral seizoensvariatie en geulmigratie, omdat hierbij relatief kleine horizontale verplaatsing kan leiden tot relatief grote verticale veranderingen, als gevolg van de sterke gradiënt in de bodemligging.

Er zijn ook veranderingen die groter zijn dan de meetfout en die niet met zekerheid aan de morfologie kunnen worden gelinkt. Dit roept vragen op over of de interpretatie van de grootte van de meetfout m.b.t. verschilkaarten. Een deel van de verschillen kan mogelijk verklaard worden door een verhang in het bekken. Mogelijk is de waterstand in het zuidwestelijk deel van het bekken soms hoger dan -0,5 m NAP als de waterstand bij Nes lager is dan -0,7 m NAP. Dit is het gevolg van de variatie in getijvoortplanting in het bekken, door vervorming van de waterbeweging als gevolg van het ondiepe bekken met geulen en platen. Hieruit kan de conclusie worden getrokken dat de waterstand bij Nes geen goede indicator is voor de waterstand in het Friesche Zeegat, vooral als het laagwaterstanden betreft.

Het uifilteren van water zou met behulp van de classificatie op basis van RGB-waarden (kleurwaardes uit luchtfoto's) kunnen worden gedaan. Een eerste verkenning hiernaar heeft laten zien dat classificatie op basis van de alleen RGB-waarden problemen geeft op de randen van de luchtfoto's, omdat deze vaak vrij donker zijn. Wordt ook de hoogte-informatie meegenomen bij de classificatie, dan wordt de classificatie op deze grensgebieden beter. Gezien het verhang wat mogelijk optreedt in het bekken, moet wellicht wel een andere grenswaarde voor de filtering m.b.t. de hoogte-informatie worden aangehouden. Ook moet eerst goed worden gekeken naar de betrouwbaarheid en de validatie van de classificatie, voordat deze techniek voor alle LiDAR opnames kan worden toegepast. Mocht de techniek in de toekomst gebruikt gaan worden, dan neemt de hoeveelheid gebied met classificatie wad toe. In het beschouwde gebied besloeg de toename 30%, maar dit hangt natuurlijk af van de oppervlakte die tussen de huidige afkapgrens en de waterspiegel valt. Hoewel de classificatie ertoe kan leiden dat er per kaart meer oppervlakte beschikbaar is voor de analyse, moet hier wel een kanttekening worden geplaatst. Men moet zich realiseren dat het gebied wat tijdens

de ene opname boven water uitsteekt en als wad kan worden geclassificeerd, tijdens de volgende opname best eens onder de waterspiegel zou kunnen liggen, omdat de waterstand per opname varieert. Dit gebied kan dan voor verschilkaarten of hypsometrische curves alsnog niet meegenomen worden in de analyse. De winst voor de analyses die in deze rapportage zijn beschreven zal daarom beperkt zijn.

Bij de hypsometrische curves zijn ook kleinere deelgebieden beschouwd. Bij de deelgebieden Ameland-Oost en Engelsmanplaat lijkt erosie op te treden, hoewel tussen de jaren de hypsometrische curve soms hoger en soms lager ligt. Bij Paesens lijkt sedimentatie op treden. Bij Ternaard en Brakzand zijn de trends minder duidelijk. Een deel van de veranderingen is ook kleiner dan de meetfout.

6.2 Aanbevelingen

Vergelijking van de LiDAR opnames met de RWS vaklodingen (een combinatie van lodingen en LiDAR) laat zien dat er bij de RWS vaklodingen geen streeppatronen zichtbaar zijn in de verschilkaarten. Er moet dus verschil zitten tussen de verwerking van de beide datasets. Het zou goed zijn de inwinnings- en verwerkingsmethodes van de LiDAR opnames en de RWS opnames te vergelijken en waar mogelijk gelijk te trekken. Als dit gebeurt, kunnen deze datasets ook onderling vergeleken worden. Voor de data van het najaar van 2013 heeft al een interpolatieslag plaatsgevonden door Fugro. Voor consistentie moet dit voor alle jaren worden gedaan. Een bijkomend voordeel hiervan is dat de hypsometrische curves dan precies even grote gebieden vergelijken. Een nadeel is dat wordt aangenomen dat de omliggende punten voor de cel(len) waarvoor de interpolatie wordt uitgevoerd, goede informatie geeft over de bodemligging in de betreffende cel(len).

Omdat het merendeel van het bekken nu morfologische veranderingen laat zien die binnen de meetfout vallen, zou het inzichtelijk zijn eens meer in detail te kijken naar het verschil in bodemhoogte van individuele cellen in opeenvolgende jaren. Zo kan er bijvoorbeeld gekeken worden of er trends in bodemligging zijn waar te nemen.

Analyse van de waterstanden laat zien dat voorafgaand aan laagwater de waterstand bij Holwerd hoger is dan bij Nes. Als wordt aangenomen dat de waterstand bij Holwerd representatief is voor het zuidwestelijk deel van het bekken, betekent dit dat dit deel van het bekken soms gevlogen wordt bij waterstanden hoger dan -0,5 m NAP. Hier kan rekening mee worden gehouden bij het plannen van de vluchten, bijvoorbeeld door te kijken of het zuidwestelijk deel van het bekken na laagwater kan worden opgevlogen.

Als wordt besloten te werken met een classificatie van wad en water op basis van RGB-waardes, moet eerst een validatie en betrouwbaarheidsanalyse uitgevoerd worden. Omdat het onderscheid tussen wad en water op basis van de drie RGB-kleuren nog onbetrouwbare gebieden laat zien, is het de moeite waard te kijken of het mogelijk is om multi-spectrale informatie met meer dan drie banden in te winnen. Vooral de toevoeging van een band in het nabij-infrarood deel van het spectrum (golflengte tussen de 700 en 1000 nm) zou de classificatie sterk kunnen verbeteren. Aangezien nabij-infrarood licht sterk geabsorbeerd wordt door water, maar relatief sterk reflecteert op land, wordt het onderscheid tussen wad en water groter en daarmee de classificatie betrouwbaarder. Een potentieel probleem kunnen natte wadplaten vormen, welke wellicht ook het meeste nabij-infrarode licht absorberen.

7 Referenties

Arentz, L., 2014, Bijdrage Deltares aan gezamenlijk foutenmemo met Fugro, 18 april 2014.

Arentz, L. en Vroom, J., 2014, Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2013): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1209136-000.

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

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

Fugro Geospatial B.V., 2013, Waddenzee LiDAR Survey, Final Report, version 1.

Fugro Geospatial B.V., 2014a, Rapportage onderzoek LiDAR metingen Waddenzee, ref BV/2014, 15 mei 2014.

Fugro Geospatial B.V., 2014b, Waddenzee LiDAR Survey May 2014, Final Report, version 1.

Fugro Geospatial B.V., 2014c, Waddenzee LiDAR Survey September 2014, Final Report, version 141121.

Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., 2014, Meeting minutes Lidar nauwkeurigheden, 1 april 2014.

Piening, H., 2014, Memo Lidar nauwkeurigheid, concept. Met input van Z.B. Wang.

Wang, Z.B., 2013, Herberekening behoefte aan zandsuppletie in verband met bodemdaling door gaswinning uit Waddenzee velden op basis van winningsplan Moddergat, Lauwersoog, Vierhuizen 2011 en Meet- en regelcyclus 2012.

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

A Classificatie van wad en water met behulp van kleurinformatie LiDAR

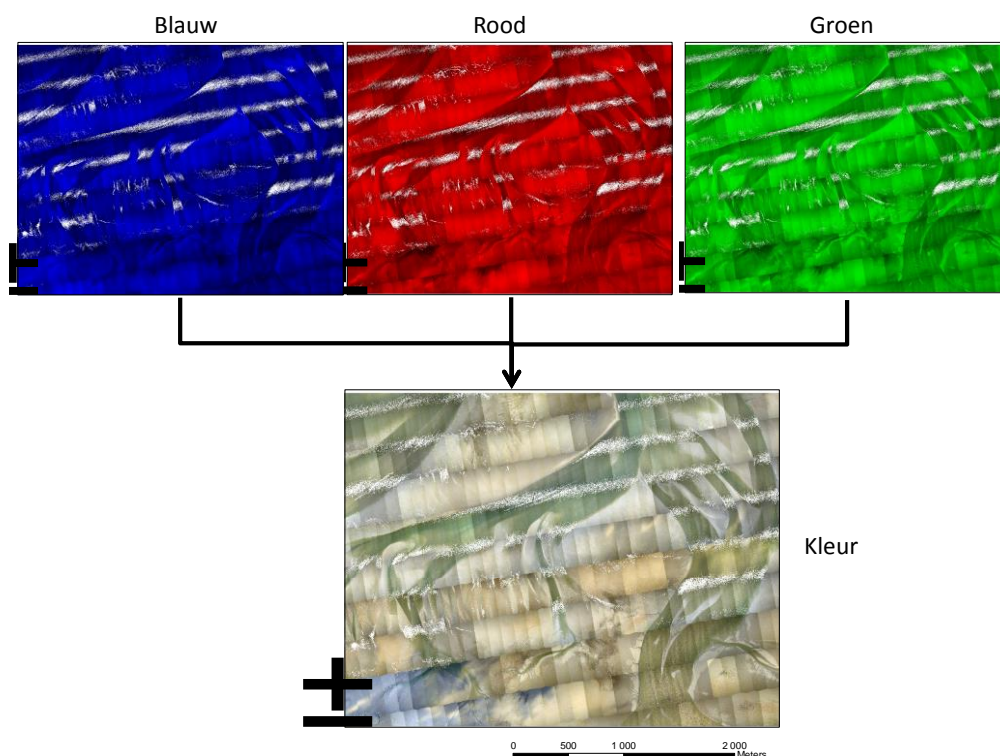
A.1 Introductie

Het onderscheiden van wad en water enkel op basis van LiDAR hoogtegegevens heeft beperkingen door het optredende waterstandsverhang binnen het bekken. Hierdoor wordt tot nog toe gewerkt met een grove filtering van -0,5 m NAP. Onder dit niveau worden alle punten als water beschouwd. Deze afkapgrens is gebaseerd op het feit dat de waterstand bij Nes tijdens het uitvoeren van de vluchten lager dan -0,7 m NAP is en er een mogelijk verhang binnen het bekken optreedt.

Tijdens de LiDAR-vluchten worden ook luchtfoto's gemaakt, welke als RGB-waarden in de *.LAS-uitvoerbestanden worden opgeslagen. Voor elke hoogtemeting is dan ook een kleurwaarde beschikbaar. De vraag is of op basis van kleur een beter onderscheid tussen wad en water gemaakt kan worden.

A.2 Methode

De kleurinformatie die beschikbaar is bestaat uit drie verschillende databronnen ('banden'), die samen de kleur bepalen: de blauwe, rode en groene band (zie Figuur A.1).



Figuur A.1 Informatie in de kleurfoto

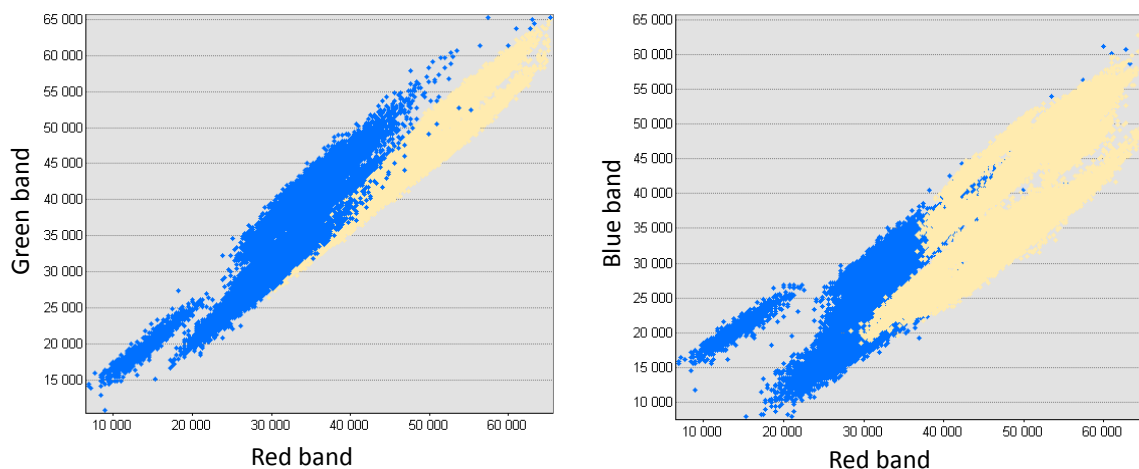
De classificatiemethode waarvoor is gekozen om het onderscheid tussen wad en water te maken heet Maximum Likelihood Classification (MLC). MLC is onderdeel van de

Classification Tool in ArcGIS 10.2 (ESRI) en is een veelgebruikte techniek om satellietbeelden te classificeren. Voor een MLC moet de gebruiker eerst handmatig de computer 'trainen' om vervolgens automatisch elke locatie te kunnen classificeren. Deze training bestaat uit het selecteren van kleine gebieden van de te onderscheiden klassen. In dit geval zijn er twee klassen (wad en water). Figuur A.2 laat met blauw de trainingsgebieden voor water zien, en met geel de gebieden voor wad.



Figuur A.2 Voorbeelden van trainingsgebieden voor wad (geel) en water (blauw)

Op basis van deze trainingsgebieden worden de waarden van de verschillende banden (rood, groen en blauw) voor wad en water bepaald. Figuur A.3 geeft twee scatterplots weer van de kleurwaarden van de trainingsgebieden in de groene en rode banden (links) en de blauwe en rode banden (rechts). De blauwe punten zijn afkomstig van water trainingsgebieden en de gele van wad. Er is te zien dat water gemiddeld lagere kleurwaarden heeft. Daarnaast heeft wad een relatief hogere roodwaarde dan groen in vergelijking met water. Er is wel een grote overlap tussen wad en water, wat een indicatie is dat het in veel gevallen moeilijk zal zijn om deze twee klassen te onderscheiden.

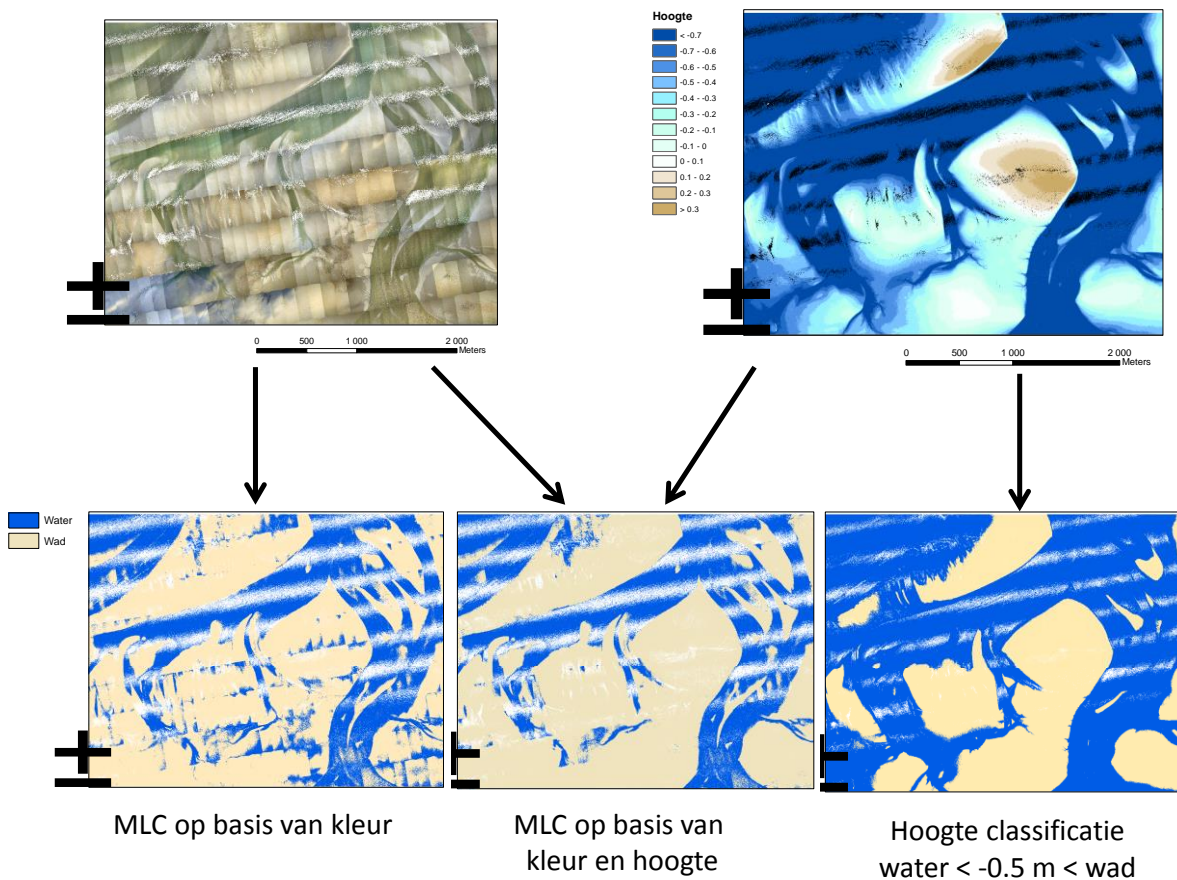


Figuur A.3 Scatterplots van de kleurwaardes van wad en water trainingsgebieden in de groene/rode band (links) en de blauwe/rode band (rechts)

Voor de automatische classificatie van het hele gebied wordt vervolgens voor elke gridcel bepaald of het dichterbij de wad-klasse of de water-klasse hoort. Elke gridcel heeft een kleurwaarde voor rood, groen en blauw, en de gridcel wordt geïclassificeerd op basis van gelijkenis van deze drie banden met de trainingsgebieden. Naast kleurwaardes kan ook andere informatie meegenomen worden als een additionele band in MLC. Een belangrijke informatiebron van LiDAR datasets is natuurlijk de hoogte. De hoogte kan helpen in het onderscheiden van wad en water, aangezien water gemiddeld lager ligt dan wad. Merk op dat hierbij waterplassen op de wadplaten wel als wad worden geïclassificeerd, indien er geen water-trainingsgebieden in deze waterplassen liggen. Als dit wel het geval is dan biedt de hoogte-informatie tegenstrijdige informatie; hogere gebieden kunnen dan zowel wad als water zijn.

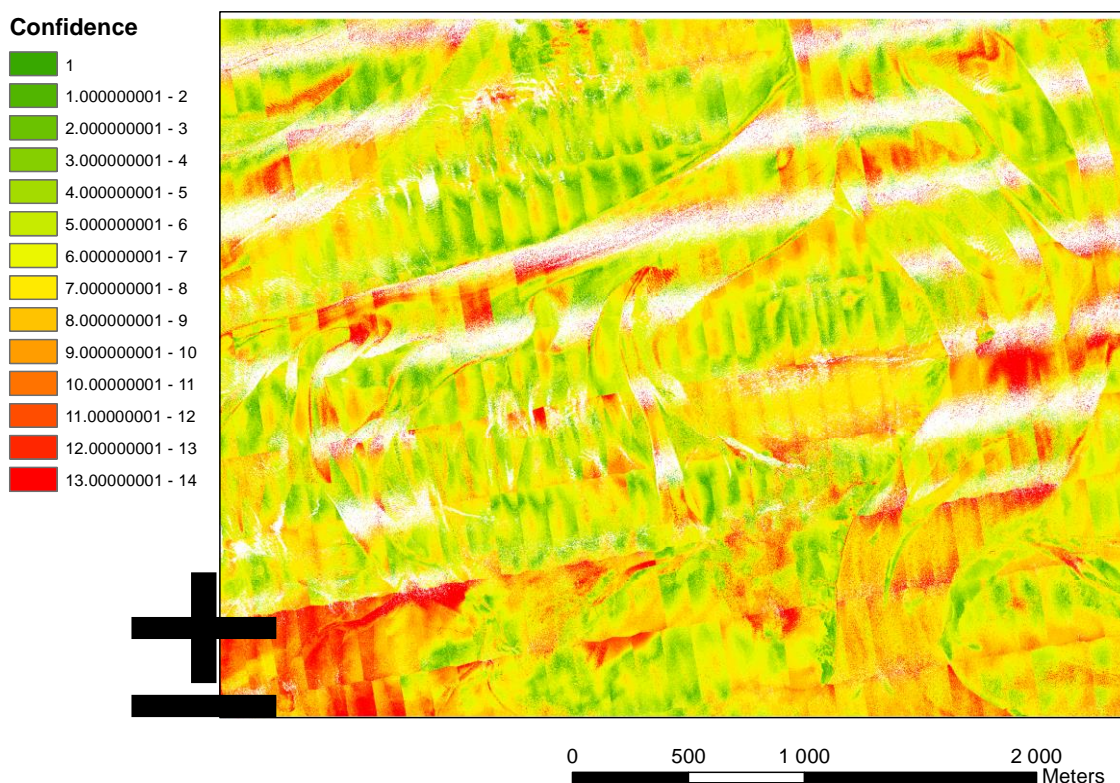
A.3 Resultaten

Figuur A.4 geeft de resultaten van drie classificaties weer. Linksonder zien we een MLC classificatie op basis van de drie kleurbanden. Opvallend is dat de donkere plekken aan de randen van de vluchtbanen vaak verkeerd worden geïclassificeerd tot water. Als de hoogte wordt meegenomen (MLC middenonder) dan wordt deze fout minder vaak gemaakt. Het figuur rechtsonder laat de oorspronkelijke classificatie enkel op basis van de hoogte zien, waarbij gridcellen met een hoogte onder de -0,5 m NAP tot water worden geïclassificeerd, en boven de -0,5 m NAP tot wad. Dit levert een onderschatting van het wadgebied op.



Figuur A.4 Overzicht van drie classificatiemethodes: Maximum Likelihood Classification (MLC) op basis van enkel de luchtfoto (linksonder), MLC op basis van zowel de luchtfoto als de hoogte informatie (middenonder) en de oorspronkelijke classificatie op basis van hoogte, waarbij een hoogte lager dan $-0,5$ m NAP als water wordt geclassificeerd en anders wad (rechtsonder).

De MLC levert ook informatie over de zekerheid van de classificatie op. Figuur A.5 toont de zekerheid in de MLC-classificatie op basis van de kleurinformatie: rood is onzeker, groen is zeker. Aan de randen van de vluchtpaden en de overgangen van wad en water is de classificatie onzeker en zal het MLC-algoritme dan ook eerder de fout in gaan. Op deze plekken is er veel overlap in de kleurwaarden van de trainingsgebieden voor wad en water.



Figuur A.5 Waarschijnlijk van juiste classificatie

Tabel A.1 laat de oppervlaktes van wad en water tussen verschillende classificaties zien voor het beschouwde deelgebied. Bij filtering tussen wad en water op basis van de hoogte alleen wordt een relatief groot gebied als water geclassificeerd, terwijl de MLC een grotere oppervlakte aan wad oplevert. Uiteraard levert het gebruik van een lagere grenswaarde voor de hoogte (-0,7 m NAP in plaats van -0,5 m NAP) een groter oppervlakte aan wad op, maar beide MLC classificaties resulteren nog steeds in meer wad.

Tabel A.1 Vergelijking oppervlaktes tussen verschillende methodes

Methode	Opp. Wad (ha)	Opp. Water (ha)	Opp. Wad (%)	Opp. Water (%)
-0.5 m watergrens	434	596	42	58
-0.7 m watergrens	572	458	56	44
MLC-kleur	678	351	66	34
MLC-hoogte en kleur	713	317	69	31

A.4 Discussie

Het MLC-classificatie algoritme geeft een duidelijk verschil in oppervlakte wad en water ten opzichte van de classificatie op basis van de hoogte. Op het grensgebied tussen wad en water (dus beneden -0,5 m NAP) wordt meer gebied als wad geclassificeerd. De juistheid van de classificatie is nog niet gevalideerd. Er is als eerste test voor een tweede deelgebied een classificatie op basis van de trainingsgebieden gemaakt. De classificatie lijkt redelijk goed te zijn voor zowel het kalibratiegebied als het onafhankelijke tweede gebied. Maar als deze methode grootschalig toegepast gaat worden moet er een validatie gedaan worden. Dit kan

door gridcellen te selecteren waarvan de klasse (wad of water) zeker is, en op deze locaties met MLC een voorspelling te maken. Deze locaties vormen een validatiedataset, welke uit minimaal 20 verschillende punten moet bestaan om een indicatie te krijgen van de nauwkeurigheid. Het aantal juist geclassificeerde gridcellen is een indicator voor de betrouwbaarheid.

Om de classificatie te verbeteren kan er gebruik gemaakt worden van de 'Confidence' map (zie Figuur A.5). Gridcellen waarvan de betrouwbaarheid laag is kunnen eruit gefilterd worden. Dit levert een incomplete classificatie op, waar de betrouwbaarheid wel hoger van is. Op de onbetrouwbare plekken kan een andere classificatiemethode gebruikt worden (of enkel met de grove filtering van -0,5 m NAP gewerkt worden). Daarnaast kan de validatie inzicht geven in de locaties waar het MLC-algoritme de fout in gaat en kunnen aan de hand daarvan de trainingsgebieden beter ingesteld worden om de betrouwbaarheid te vergroten.

Een opvallend artefact van de MLC is dat er meer 'No data' gridcellen (witte pixels) zijn in de classificatie-uitkomsten in vergelijking met de classificatie op basis van de hoogte (zie Figuur A.4). Hier is nog geen verklaring voor gevonden.

Voor deze eerste verkenning is een gebied van 3 bij 4 km geclassificeerd. De MLC-classificatieberekening duurt voor dit gebied enkele seconden, dus kan zonder problemen voor een veel groter gebied gebruikt worden.

A.5 Conclusie en aanbevelingen

De Maximum Likelihood Classification (MLC) is in staat om kleur- en hoogte-informatie te combineren om wad en water te onderscheiden. Hierdoor kan een veel groter gebied worden meegenomen in de morfologische analyse van de wadplaten. Voor het gebied waarvoor de verkenning is uitgevoerd leidt dit tot een toename van bijna 30%. De eerste resultaten zien er redelijk goed uit, maar de betrouwbaarheid moet nog gevalideerd worden. De methode is geschikt om voor een groot gebied toe te passen.

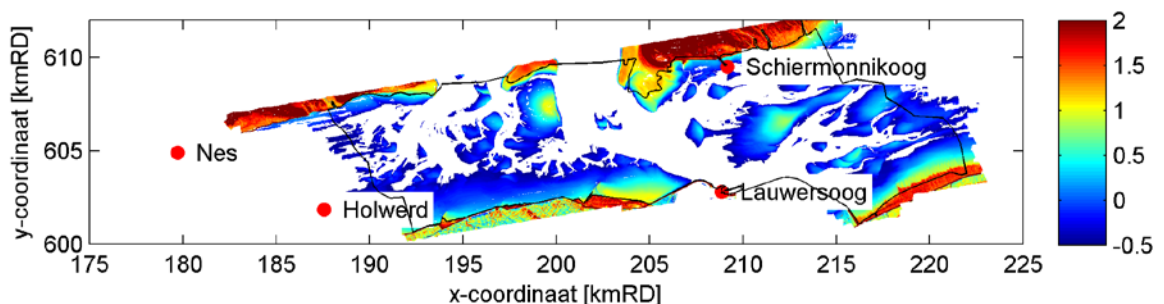
Het inwinnen van de kleurinformatie met meer banden (bijv. incl. infrarood) kan leiden tot een duidelijker onderscheid tussen wad en water.

Feit dat de analyse leidt tot een groter gebied wat gebruikt kan worden voor een morfologische analyse is op zich nuttig. Het is alleen minder nuttig om de veranderingen tussen verschillende metingen te bekijken omdat het gebied wat dankzij deze filtering wordt toegevoegd lager dan -0,5 m NAP ligt, en daarom de ene keer boven water en de andere keer onder water zal zijn. De waterstand varieert immers tussen de verschillende opnames.

B Waterstandsverhang in het Friesche Zeegat

Het waterstandsverhang binnen het Friesche Zeegat is van belang voor de filtering van water uit de LiDAR data. In deze bijlage is het waterstandsverschil geanalyseerd op basis van gemeten waterstanden. Beschikbare numerieke modellen van het Friesche Zeegat hebben als nadeel dat de berekende waterstand bij laagwater vrij veel afwijkt van de gemeten waterstand. Aangezien de interesse hier specifiek op de laagwaterstanden ligt, is besloten de analyse uit te voeren met de beschikbare waterstandsstations.

Bij het Friesche Zeegat bevinden zich vier waterstandsstations die onderling vergeleken kunnen worden om inzicht te krijgen in het waterstandsverschil over het bekken, zie de locaties in Figuur B.1. Nes is het waterstandsstation op basis waarvan het vluchtenschema wordt gemaakt. Schiermonnikoog en Lauwersoog liggen beide in het Friesche Zeegat. Holwerd ligt in een ander bekken (Amelander Zeegat), maar kan toch waardevolle informatie over de waterstandsvariatie geven. De reden hiervoor is dat kan worden aangenomen dat de astronomische waterstanden gerelateerd zijn aan de afstand tot de keel van het zeegat: achterin het bekken is de getijslag meestal groter dan in de keel van het zeegat. Ook zijn tijdens hoogwater de waterstanden bij Holwerd vergelijkbaar met het omliggende gebied omdat het wantij dan onder water ligt.

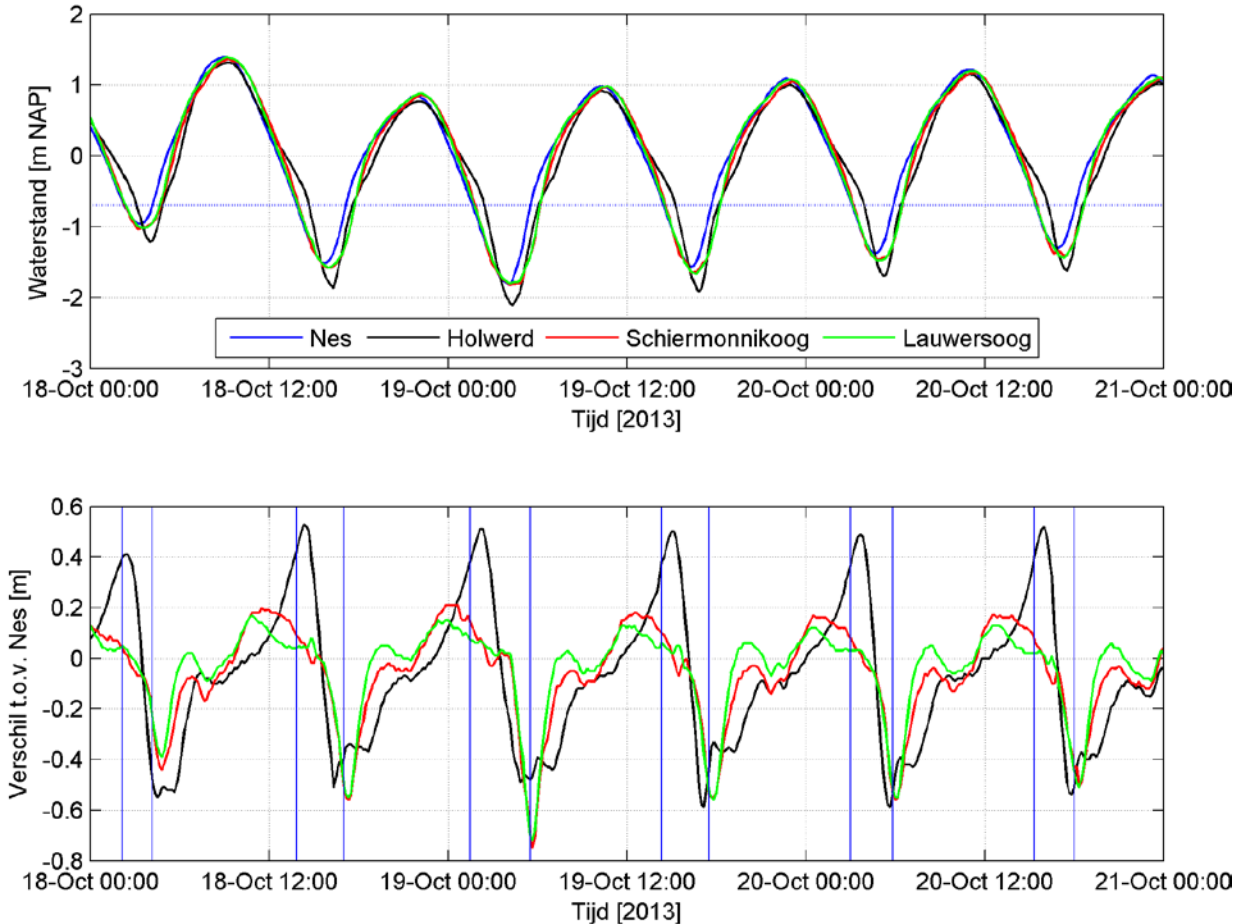


Figuur B.1 Locatie van waterstandsstations in 2013 met de LiDAR opname van het najaar van 2014 aangegeven in kleur.

In Figuur B.2 is in het bovenste figuur de gemeten waterstand van de vier stations weergegeven voor de drie opnamedagen in het najaar van 2013. Als het waterpeil zakt (dalend tij), is te zien dat de waterstand bij Holwerd hoger is dan bij de andere stations. Dit kan invloed hebben op de metingen in het zuidoostelijk deel van het Friesche Zeegat, nabij Holwerd, als daar wordt gemeten als de waterstand bij Nes pas net onder $-0,7$ m NAP is gezakt (aangegeven met de horizontale blauwe lijn). Tijdens laagwater is het waterpeil bij Holwerd wel lager dan bij de andere drie stations. Vlak na laagwater, bij stijgend tij, is de waterstand bij Nes iets hoger dan bij de andere stations. Met betrekking tot de LiDAR opnames is dit gunstig: als het bij Nes nog lager is dan $-0,7$ m NAP dan is dat op de andere stations zeker het geval.

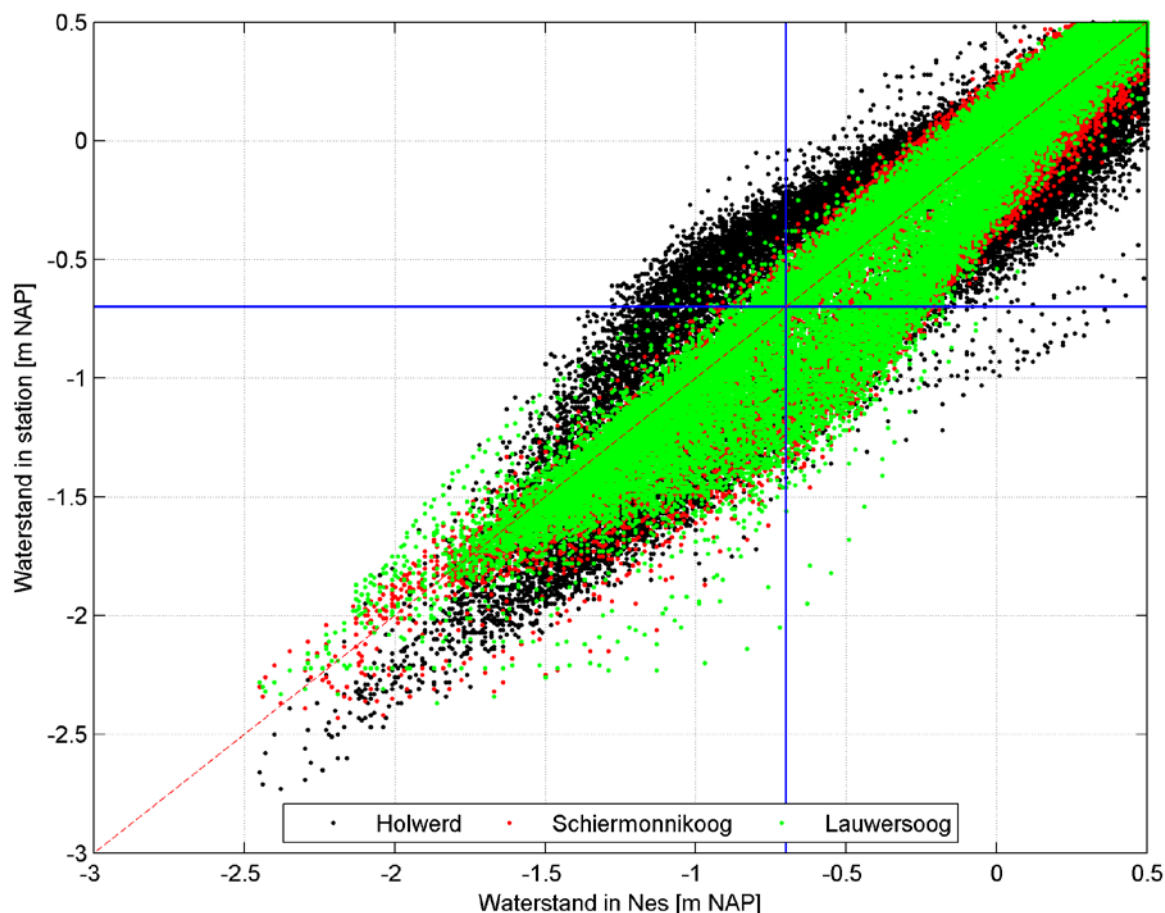
In het onderste figuur van Figuur B.2 is voor Holwerd, Schiermonnikoog en Lauwersoog het verschil in waterstand t.o.v. Nes gegeven. Met blauwe verticale lijnen is het moment aangegeven dat de waterstand bij Nes $-0,7$ m NAP is. Hieruit blijkt dat de waterstand bij Holwerd bij dalend tij tot een halve meter hoger kan zijn dan bij Nes gedurende deze drie dagen. Bij Schiermonnikoog en Lauwersoog is de waterstand maximaal 20 cm hoger, maar dit verschil treedt op als de waterstand bij Nes nog hoger is dan $-0,7$ m NAP. Als de

waterstand bij Nes lager is dan -0,7 m NAP is de waterstand bij Schiermonnikoog en Lauwersoog maximaal 10 cm hoger.



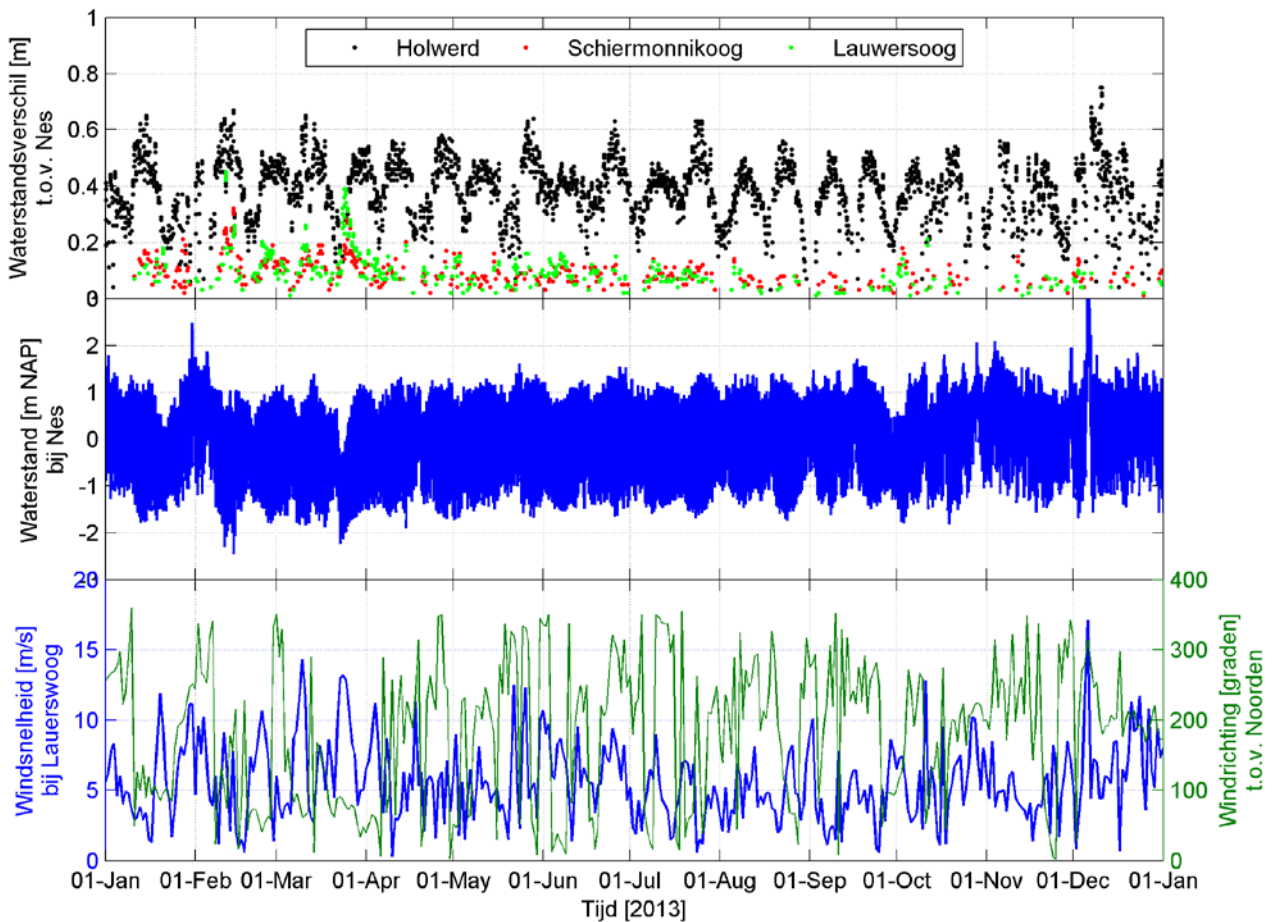
Figuur B.2 Gemeten waterstanden (boven) en verschil in waterstand t.o.v. Nes (onder) voor de drie opnamedagen in het najaar van 2013. Met de verticale blauwe lijnen wordt het moment aangegeven waarop de waterstand bij Nes -0,7 m NAP is.

Bovenstaande analyse betreft enkel de waterstanden tijdens de drie opnamedagen in het najaar van 2013. In Figuur B.3 zijn alle gemeten waterstanden in 2013 meegenomen in de analyse. Hierbij zijn de waterstanden bij Nes uitgezet tegen de waterstand in de andere stations. Er is te zien dat als de waterstand bij Nes lager is dan -0,7 m NAP (links van de verticale blauwe lijn), de waterstand bij Holwerd tot -0,2 m NAP kan oplopen. Voor de waterstanden bij Schiermonnikoog en Lauwersoog komt de waterstand zelden boven het -0,5 m NAP niveau (de huidige afkapgrens).



Figuur B.3 Gemeten waterstand bij Nes op de horizontale as uitgezet tegen de gemeten waterstand in de andere stations (zie kleur in legenda) op de verticale as voor heel 2013.

Nu rijst de vraag wanneer het waterstandsverschil tussen Nes en de andere stations het grootst is. Dit is uitgezet in Figuur B.4. In het bovenste figuur is het verschil tussen de waterstand in een bepaald station en de waterstand bij Nes uitgezet, maar alleen voor de momenten waarop de waterstand bij Nes lager is dan -0,7 m NAP en de waterstand bij het betreffende station hoger is dan -0,7 m NAP. Dit zijn de punten in het eerste kwadrant van Figuur B.3. Vooral de resultaten bij Holwerd laten zien dat er een sterke springtij-doodtij cyclus in het waterstandsverschil zit. Tijdens springtij is de getijslag groter en de laagwaters zijn dan ook lager. Hierdoor wordt het verschil over het bekken groter, omdat de getijslag varieert over het bekken. Stel dat in alle stations de laagwaterstand tijdens springtij 20% lager wordt, dan wordt het absolute verschil groter, gegeven dat de laagwaterstand niet in alle stations even laag is. Bij Schiermonnikoog en Lauwersoog zit ook een springtij-doodtij variatie in het waterstandsverschil, maar deze is minder sterk dan bij Holwerd. Voor het uitvoeren van de LiDAR-vluchten betekent dit aan de ene kant dat het het beste is bij doortij te vliegen, zodat het verhang over het bekken klein is. Er zijn dan weinig locaties in het bekken waar de waterstand hoger is dan -0,7 m NAP. Aan de andere kant is de periode dat de waterstand lager is dan -0,7 m NAP langer tijdens springtij en kan er meer wadplaat worden opgenomen omdat de waterstand lager is. Het voordeel van de langere periode met lage waterstand tijdens springtij is veel groter dan het voordeel van het kleinere verhang tijdens doortij, daarom kan toch het beste tijdens springtij gevlogen worden.



Figuur B.4 Waterstandsverschil tussen de stations en Nes op momenten dat de waterstand bij Nes lager is dan 0,7 m NAP en bij de andere stations hoger dan -0,7 m NAP (bovenste figuur), waterstand bij Nes (middelste figuur) en windsnelheid en windrichting bij Lauwersoog (onderste figuur).

In Figuur B.4 is ook te zien dat het waterstandsverschil bij Schiermonnikoog en Lauwersoog t.o.v. Nes soms veel groter dan 10 cm, bijvoorbeeld half februari en eind maart. Men zou verwachten dat dit een effect is van wind. Voor de piek eind maart lijkt dit inderdaad gekoppeld zijn, maar bij halverwege februari is dit effect minder. De LiDAR vluchten worden uitgevoerd tijdens rustige weersomstandigheden, dit is dus wanneer een extra verhang over het bekken ten gevolge van wind niet verwacht wordt.

Uit deze analyse blijkt het verhang in een bekken groter kan zijn dan de 20 cm die nu als veilige marge voor de afkapgrens wordt aangehouden. Bij Holwerd treedt laagwater iets later op dan bij Nes, waardoor tijdens dalend tij de waterstand hoger dan -0,5 m NAP kan zijn als de waterstand bij Nes al beneden -0.7 m NAP staat. Hier zou bij de volgende meetcampagne rekening mee gehouden kunnen worden.