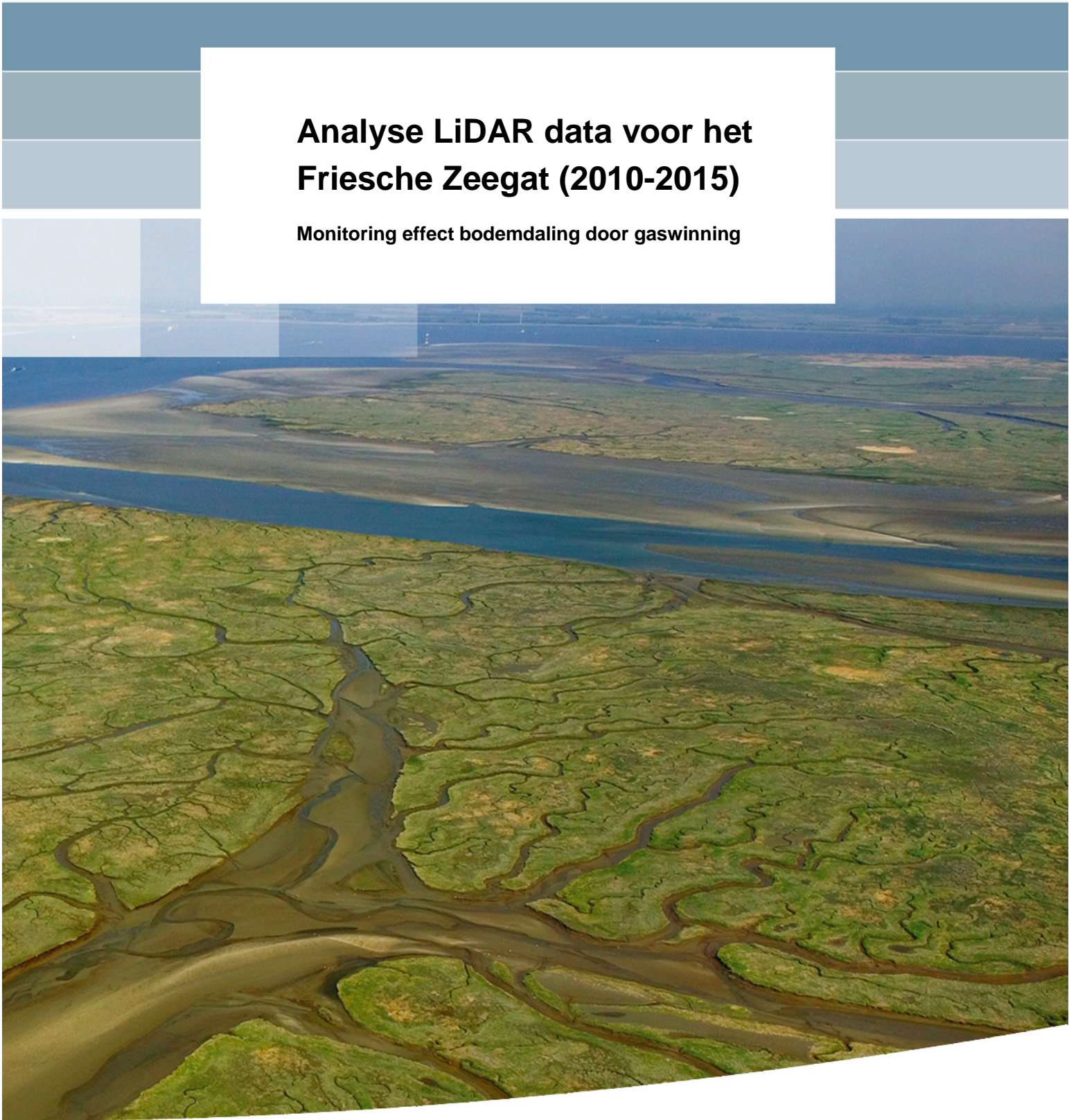


**Analyse LiDAR data voor het
Friesche Zeegat (2010-2015)**

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning



Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2015)

Monitoring effect bodemdaling door gaswinning

R.A. Schrijvershof, MSc.
ir. J. Vroom

1221249-000

Titel

Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2015)

Opdrachtgever	Project	Kenmerk	Pagina's
Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V.	1221249-000	1221249-000-ZKS-0004	41

Trefwoorden

LiDAR data, Waddenzee, bodemdaling, gaswinning, Pinkegat, Zoutkamperlaag, morfologie

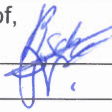
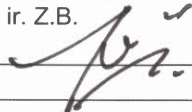

Samenvatting

In het kader van de monitoring van de effecten van bodemdaling in het Friesche Zeegat als gevolg van gaswinning wordt de wadplaathoogte en –oppervlakte gemonitord. Het doel hiervan is om vast te stellen of de gaswinning invloed heeft op de hoogteligging van de wadplaten. Voor de monitoring worden er sinds 2010 ieder jaar één of twee LiDAR survey 's uitgevoerd. De voorliggende rapportage beschrijft de analyse van de LiDAR opnamen van 2010 tot en met 2015.

De methode van verwerking is voor de huidige studie aangepast ten opzichte van de voorgaande analyses naar de wadplaathoogte. De data is geïnterpoleerd om tot een geheel dekkende bodemkaart te komen. Deze interpolatieslag heeft geleid tot een betere vergelijking van de hypsometrische curven tussen verschillende jaren.

De opvallendste constatering van de analyse is dat de bodemhoogte bij het Pinkegat in 2015 lager is dan voorgaande jaren. Er kan niet met zekerheid gezegd worden of deze waargenomen verlaging van de bodem in dit gebied te wijten is aan nauwkeurigheid van de LiDAR data, de natuurlijke morfologische dynamiek van de platen of door bodemdaling als gevolg van gaswinning.

Referenties

Versie	Datum	Auteur	Paraaf	Review	Paraaf	Goedkeuring	Paraaf
1	dec. 2015	R.A. Schrijvershof, MSc Ir. J. Vroom		Prof. dr. ir. Z.B. Wang		Drs. F.M.J. Hoozemans	

Inhoud

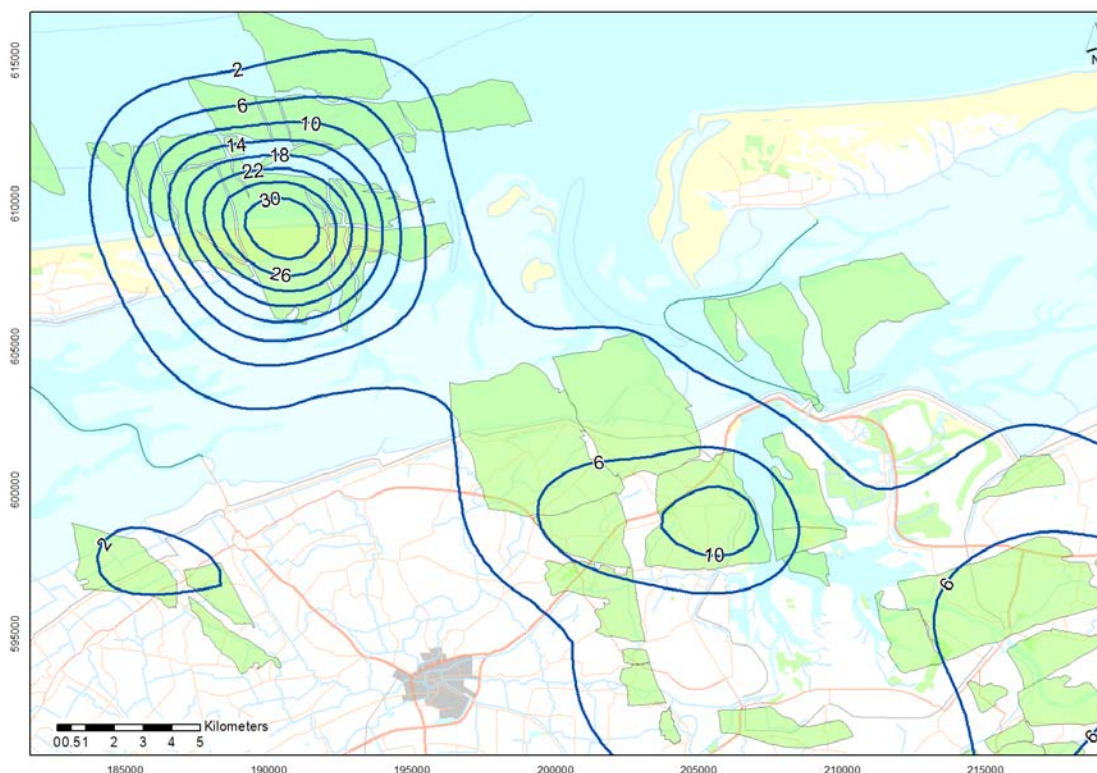
1 Inleiding	1
1.1 Achtergrond	1
1.2 Analyse LiDAR data	2
1.3 Doelstelling	2
1.4 Leeswijzer	3
2 Aanpak	5
3 Beschrijving en verwerking van de LiDAR data	7
3.1 Algemeen	7
3.2 Meetfout	8
3.3 Beschrijving	8
3.5 Levering	12
3.6 Verwerking	12
3.7 Bodemkaarten	14
4 Erosie en sedimentatie	17
4.1 Erosie/sedimentatiekaarten	17
4.2 Erosie/sedimentatiesnelheden	23
5 Analyse per deelgebied	27
5.1 Analyse kombergingsgebieden	27
5.2 Analyse deelgebieden	31
6 Conclusies en aanbevelingen	39
6.1 Conclusies	39
6.2 Aanbevelingen	40
7 Referenties	7-1
Bijlage(n)	
A Bodemkaarten	A-1

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

De Nederlandse Aardolie Maatschappij (NAM) exploiteert enkele aardgasvelden in het waddengebied. Gaswinning vindt plaats bij Ameland sinds 1986 en de drie gaswinningvelden in de Waddenzee (Moddergat, Lauwersoog en Vierhuizen) worden sinds 2007 geëxploiteerd. Het onttrekken van gas in deze velden kan bodemdaling tot gevolg hebben binnen het waddengebied. De bodemdaling is enkele millimeters per jaar, dit is aangegeven in Figuur 1.1.

De wadplaten in het waddengebied groeien mee met de relatieve zeespiegelstijging door middel van sedimentatie op de platen. Hier is relatieve zeespiegelstijging gedefinieerd als de stijging van de zeespiegel ten opzichte van de bodemhoogte. De grootte van de relatieve zeespiegelstijging wordt bepaald door het netto effect van absolute zeespiegelstijging en bodemdaling. Hier wordt met absolute zeespiegelstijging de zeespiegelstijging ten opzichte van een vast referentievlak bedoeld, en bodemdaling het zakken van het niveau van de bodem ten opzichte van dat referentievlak. Bodemdaling kan vervolgens onderverdeeld worden in bodemdaling door autonome processen en bodemdaling als gevolg van de gaswinning. Of de groei van de platen de relatieve zeespiegelstijging kan bijhouden is daarom onder meer afhankelijk van de grootte van bodemdaling als gevolg van de gaswinning.



Figuur 1.1 Ruimtelijke verdeling van de bodemdaling [in cm] op 1 januari 2014, sinds start productie, volgens de prognose in de Meet en Regelcyclus rapportage 2014 (Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., 2014a).

Om vast te stellen of de bodemdaling de hoogteligging van de wadplaten beïnvloedt is er bij de uitgifte van de vergunningen voor exploitatie van de aardgasvelden een monitoringsverplichting opgenomen. Deze verplichting wordt vervuld door middel van het monitoringprogramma van de NAM. Doel van dit programma is om vast te stellen of de gaswinning effect heeft op de abiotiek (morfologie) en de biotiek. In het voorliggende rapport wordt het effect op de abiotiek geëvalueerd aan de hand van morfologische veranderingen van de wadplaten in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag.

1.2 Analyse LiDAR data

Tot en met 2009 werd in opdracht van de NAM de morfologische ontwikkeling (verandering van de vorm) van de wadplaten in het Pinkegat en de Zoutkamperlaag gemonitord aan de hand van luchtfoto's. De oppervlakte droogvallende wadplaat werd geanalyseerd aan de hand van de luchtfoto's. Sinds 2010 worden er LiDAR survey 's uitgevoerd om ook de hoogte van de wadplaten te monitoren. Deze survey 's worden uitgevoerd door Fugro (Fugro Geospatial B.V. 2013; Fugro Geospatial B.V. 2014a; Fugro Geospatial B.V. 2014b; Fugro Geospatial B.V. 2015).

De hoogte van de wadplaten (de bandbreedte in hoogteligging van de wadplaten) is veranderlijk als gevolg van de natuurlijke cycli van erosie (slijtage en verplaatsing van sediment) en sedimentatie (ophoping van sediment) en als gevolg van geulmigratie (verplaatsing van geulen) en stormen. Deze processen die de bodemhoogte beïnvloeden vinden plaats op verschillende ruimtelijke en over verschillende tijdschalen. Om de bodemveranderingen die optreden als gevolg van deze processen te kunnen onderscheiden van bodemveranderingen die het gevolg zijn van niet autonome bodemdaling dient een lange tijdreeks beschouwd te worden. Dit is omdat de veranderingen in bodemhoogte anders gedomineerd worden door de natuurlijke processen.

De LiDAR opnames die door de Fugro worden uitgevoerd zijn ieder jaar geanalyseerd door Deltares (Vroom en Beekhuizen 2015; Arentz en Vroom 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang 2012; Wang et al., 2010). In deze voorgaande studies zijn de volgende bevindingen gedaan:

1. de gemeten veranderingen van de verschillende LiDAR opnames is in dezelfde orde van grootte als de meetfout (zie Paragraaf 3.2) in de LiDAR data
2. de geobserveerde morfologische veranderingen in wadplaathoogte worden gedomineerd door natuurlijke processen die een langere tijdschaal beslaan dan de tijdreeks die de LiDAR data beslaat.

Door de analyse van de LiDAR data door te zetten, en zo een langere tijdreeks te beschouwen, kunnen grotere veranderingen in wadplaathoogte ontdekt worden. Zo kunnen de veranderingen die groter zijn dan de meetfout herkend worden en kunnen de trends in wadplaathoogte die het gevolg zijn van natuurlijke processen onderscheiden worden van eventuele trends die het gevolg zijn van bodemdalingen.

1.3 Doelstelling

Het doel van de analyse beschreven in voorliggend rapport is het in kaart brengen van de verschillen tussen de LiDAR opnames van het Friesche Zeegat van 2010 tot en met 2015.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de werkwijze waarop de data behandeld is beschreven hoofdstuk 3 beschrijft vervolgens de LiDAR data en behandelt de verwerking van de data. Deze paragraaf sluit af met de resulterende bodemopnamen van de huidige en alle voorgaande LiDAR survey 's. Erosie en sedimentatiekaarten van het gebied worden weergegeven in hoofdstuk 4. In hoofdstuk 5 wordt voor de twee kombergingsgebieden en vijf eerder gedefinieerde deelgebieden (Vroom en Beekhuizen, 2015) hypsometrische curven en histogrammen weergegeven. Conclusies en aanbevelingen worden gegeven in hoofdstuk 6.

2 Aanpak

De morfologische ontwikkeling van de wadplaathoogte in het Friesche Zeegat wordt geanalyseerd aan de hand van de LiDAR opname van de zomer van 2015 en alle voorgaande LiDAR opnamen. Hier-toe wordt hoofdzakelijk dezelfde aanpak gehanteerd als in de voorgaande studies (Vroom en Beekhuizen 2015; Arentz en Vroom 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang 2012; Wang et al., 2010). Uitzondering hierop is het verwijderen van uitschieters in de data en interpolatie van de dataset ten behoeve van de hypsometrische curven.

De basis van de analyse van de morfologische ontwikkeling wordt gevormd door de 2010 – 2015 LiDAR data die door Fugro is vergrid naar 1x1 m ASCII data. In Hoofdstuk 3 zal een beschrijving worden gegeven van de uitgevoerde LiDAR survey (gebiedsdekking, vluchtschema en weersomstandigheden) en van het verwerken van de meest recente LiDAR data (zomer 2015). Daarnaast is in Vroom & Beekhuizen (2015) geconstateerd dat de aangeleverde LiDAR data van het jaar 2013 al zijn geïnterpoleerd door Fugro. Om ook de data van dit jaar goed te kunnen vergelijken met de andere jaren zal deze opnieuw verwerkt worden aan de hand van de nog niet geïnterpoleerde data.

De 1x1m ASCII datasets worden gemiddeld naar kaartbladen met een 10x10 m resolutie zodat het verwerken van de data minder computerrekenkracht nodig heeft. In Elias et al. (2013) is geconcludeerd dat het effect van verschillende gridgroottes (5 m, 10 m, 20 m) op het resultaat van de analyse verwaarloosbaar klein is. Tijdens de vergridding worden uitschieters uit de data verwijderd. Dit wordt gedaan door alle datapunten die een hoogteligging van +2 m NAP hebben te verwijderen.

De 10x10 m datasets worden gecorrigeerd voor water. Dit wordt gedaan door alle punten die lager liggen dan -0.5 m NAP weg te filteren. Doordat het inwinnen van de data alleen dient te gebeuren wanneer de waterstand lager is dan -0.7 m NAP bij de waterstandmeetstations Nes, Holwerd, Lauwersoog en Schiermonnikoog wordt er aangenomen dat de waterspiegel bij de wadplaten lager ligt dan -0.5 m NAP tijdens de opname. Een uitzondering hierop zijn de plassen die op de wadplaten aanwezig blijven maar deze hebben weinig invloed op de berekening van de plaatarealen.

Vervolgens worden er bodemkaarten van alle jaren geproduceerd. Zoals hierboven beschreven is de data van 2013 opnieuw verwerkt, de bodemkaart van dit jaar is daarom niet gelijk aan de bodemkaart zoals deze is gepresenteerd in de voorgaande studies (Vroom en Beekhuizen 2015; Arentz en Vroom 2014; Elias et al., 2013). Het vergelijken van de meest recente LiDAR opname met de voorgaande opnames wordt gedaan aan de hand van erosie/sedimentatiekaarten.

Omdat het tijdsverschil tussen de verschillende LiDAR survey's niet gelijk is worden er hierna kaarten met erosie/sedimentatiesnelheden (uitgedrukt in m/jaar) gemaakt zodat de veranderingen tussen de verschillende opnamen beter zijn te vergelijken.

Tot slot wordt de wadplaathoogte en het wadplaatareaal geanalyseerd aan de hand van hypsometrische curven en histogrammen. Dit wordt gedaan voor de twee kombergingen van het Pinkegat en de Zoutkamperlaag en voor vijf deelgebieden die gedefinieerd zijn in Vroom en Beekhuizen (2015). Voor het maken van de curven en histogrammen wordt de data

geïnterpoleerd door middel van driehoeksinterpolatie, zodat de gebieden die niet tot de waterspiegel worden gerekend een volledige gebiedsdekking hebben. Een nadeel van het interpoleren is dat de geïnterpoleerde bodem misschien niet overal exact overeen komt met de werkelijke bodem. Als de gaten in de dataset boven de wadplaten echter klein zijn, is dit effect beperkt. De interpolatieslag levert een aparte dataset met bodemkaarten op. De waterspiegel wordt vervolgens weer uit deze data verwijderd door alle punten met een hoogteligging die lager is dan -0.5 m NAP te verwijderen.

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 het uitzenden en ontvangen van een laserpuls
2. de hoek waaronder de laserpuls wordt uitgezonden
3. de absolute locatie van de sensor die laserpuls ontvangt.

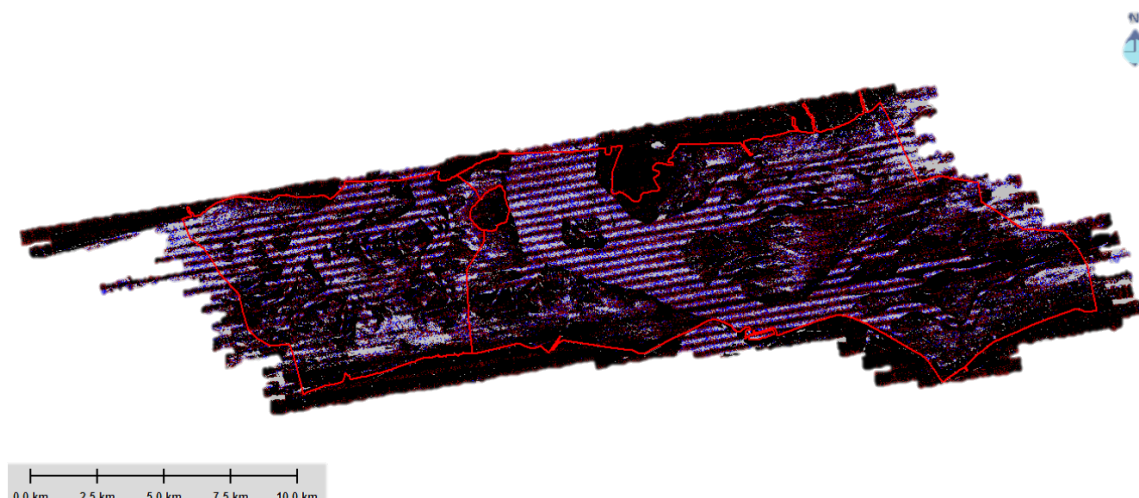
De mate waarin een oppervlak gedetecteerd kan worden hangt af van de reflectie van het te detecteren oppervlak. De reflectie kan beïnvloed worden door het oppervlak zelf, de weersomstandigheden en de positie van de lasersensor ten opzichte van het oppervlak. De kwaliteit van de LiDAR is daarom afhankelijk van meerdere factoren.

Het oppervlak beïnvloedt de mate van reflectie vanwege de ruwheid en de samenstelling van het oppervlak. De ruwheid bepaalt de mate van verstrooiing van een uitgezonden laserpuls. Zeer ruwe oppervlakken zorgen voor zo veel verstrooiing dat er minder reflectie door de sensor wordt opgevangen. Daarbij kunnen schaduw effecten er voor zorgen dat gedeelten van het oppervlak niet gedetecteerd worden. Aan de andere kant wordt een laserpuls door een spiegelglad oppervlak enkel onder een rechte hoek weerkaatst, waardoor het oppervlak alleen gedetecteerd kan worden wanneer de sensor zich recht boven het oppervlak bevindt. De samenstelling van het oppervlak beïnvloedt de reflectie doordat de mate van absorptie en reflectie verschilt voor verschillende materialen.

De weersomstandigheden beïnvloeden de reflectie doordat waterdruppels in de atmosfeer de laserpuls absorberen. De laserpuls die het oppervlak bereikt is daardoor minder sterk waardoor de reflectie ook minder sterk is. Het detecteren van de bodem wordt daardoor bemoeilijkt wanneer er regen, bewolking of mist aanwezig is.

De positie van de de sensor ten opzichte van het te detecteren oppervlak is van invloed op de reflectie door dat er meer reflectie van de uitgezonden laserpuls wordt ontvangen wanneer deze recht onder de sensor wordt uitgezonden dan wanneer dit onder een grotere hoek gebeurt.

De kwaliteit van de LiDAR data is afhankelijk van de puntendichtheid en de meetfout van het meetinstrument. De puntendichtheid is voor de opname van de zomer van 2015 weergegeven in Figuur 3.1. Hier zijn de vliegbanen te zien doordat de puntendichtheid reduceert wanneer een oppervlak onder een grotere hoek van de sensor gedetecteerd wordt dan wanneer het oppervlak zich recht onder de sensor bevindt.



Figuur 3.1 Puntendichtheid van de LiDAR opname van zomer 2015. Zwart: ≥ 4 punten per m^2 , rood: 2 of 3 punten per m^2 , blauw: één punt per m^2 , wit: geen data.

3.2 Meetfout

De meetfout is gedefinieerd als de (on)nauwkeurigheid van de LiDAR data en is van invloed op de kwaliteit van de data. In de vorige studies naar de analyse van de wadplaten in het Friesche Zeegat is gebleken dat de meetfout zoals beschreven door Fugro onvoldoende duidelijk gedefinieerd is voor de morfologische analyses van de wadplaten. In het verleden is de meetfout van de data daarom uitvoerig besproken tijdens een bijeenkomst met Deltares, NAM, Fugro en Rijkswaterstaat. Aan de hand van deze bijeenkomst is er een gezamenlijk memo opgesteld waar de nauwkeurigheid van de LiDAR data besproken wordt (NAM, 2014). Deltares interpreteert de meetfout van de LiDAR data als volgt:

1. de stochastische en systematische fout
De stochastische fout is de hoogfrequente ruis van het LiDAR meetsysteem. De systematische fout bestaat uit een laagfrequente navigatiefout en de systematische fout die over het gehele gebied gelijk is.
2. fout van een individueel punt na vergridding, deze is ongeveer 4 cm.
3. de gemiddelde fout van de verschilkaarten, deze is $\sqrt{2} * 4 = 5,7$ cm. Een maximale meetfout van 8 cm wordt gehanteerd voor een individuele verschilkaart.

De hypsometrische curven worden geproduceerd aan de hand van individuele kaarten. De individuele kaarten hebben een systematische fout met een langgolvig karakter, hier wordt daarom een maximale meetfout van 3,8 cm gehanteerd (Fugro Geospatial B.V., 2015).

3.3 Beschrijving

De meting die in de zomer van 2015 is uitgevoerd wordt in deze paragraaf beschreven. De metingen en analyses die in alle voorgaande jaren zijn uitgevoerd zijn beschreven in voorgaande studies. In Tabel 3.1 staan de verschillende LiDAR opnamen genoteerd, met de datering van de opname en de referentie van het analyse-onderzoek.

Tabel 3.1 Overzicht van de verschillende LiDAR opnames en analyses van het Friesche Zeegat.

LiDAR referentie	Data van opnamen	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)	24-9-2011, 25-9-2011, 26-9-2011, 27-9-2011	
2012 (najaar)	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	Vroom en Beekhuizen, 2015
2014 (najaar)	21-09-2014, 22-09-2014, 23-09-2014	
2015 (zomer)	30-06-2015, 1-7-2015	

In de zomer van 2015 is een nieuwe LiDAR survey uitgevoerd onder auspiciën van Fugro. Het inwinnen van de data is uitgevoerd door subcontractor Eurosense. In tegenstelling tot de voorgaande jaren is de survey niet in het voorjaar uitgevoerd maar in de zomer van 2015. In de winter van 2015 is er ook een LiDAR survey uitgevoerd. De verwerking en analyse van deze survey is niet opgenomen in dit rapport omdat dit niet mogelijk was gezien het moment van opname en oplevering van de rapportage.

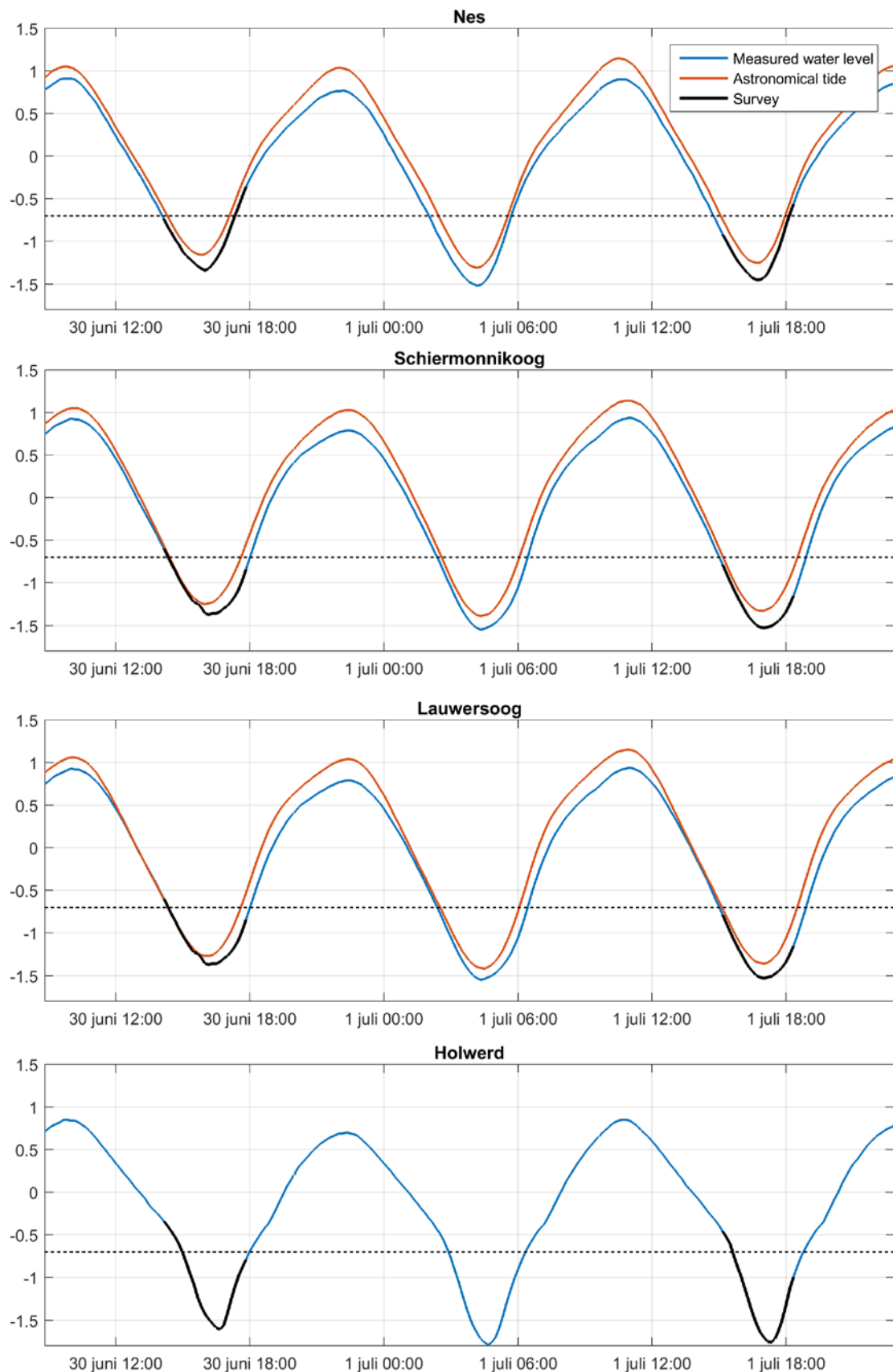
De survey van de zomer van 2015 werd uitgevoerd met één vlucht op 30 juni van 14.08 uur tot 17.45 uur en één vlucht op 1 juli van 15.10 tot 18.24 (Figuur 3.3). De dwarslijnen zijn beide dagen voorafgaand en afsluitend van de survey ingevlogen. Er werd gevlogen op een hoogte van 460 m met een snelheid van 240 km/h. De vlieglijnen liggen ongeveer 340 m van elkaar verwijderd en de theoretische overlap van de scanlijnen is 170 m, dit is echter afhankelijk van de bewegingen van het vliegtuig. De weersomstandigheden tijdens de vlucht op 30 juni waren erg goed en vrij goed op 1 juli, ondanks dat er deze dag iets meer wind was.

De survey 's dienen ingevlogen te worden tijdens een waterstand die lager is dan -0.7 m NAP om er zeker van te zijn dat de waterspiegel zich lager dan -0.5 m NAP bij de wadplaten bevindt. In Vroom en Beekhuizen (2015) is er een analyse uitgevoerd naar het verhang in waterstand in het bekken van het Friesche Zeegat. Hieruit is gebleken dat de waterstand bij Holwerd hoger dan -0.5 m NAP kan zijn wanneer de waterstand bij Nes lager is dan -0.7 m NAP en dat er daarom ook naar de waterstand bij andere meetstations gekeken moet worden. Voor de survey van zomer 2015 is daarom niet alleen gekeken naar de waterstand bij Nes maar is tevens de waterstand bij Holwerd, Schiermonnikoog en Lauwersoog geraadpleegd (Fugro Geospatial B.V., 2015).

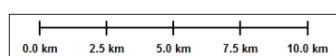
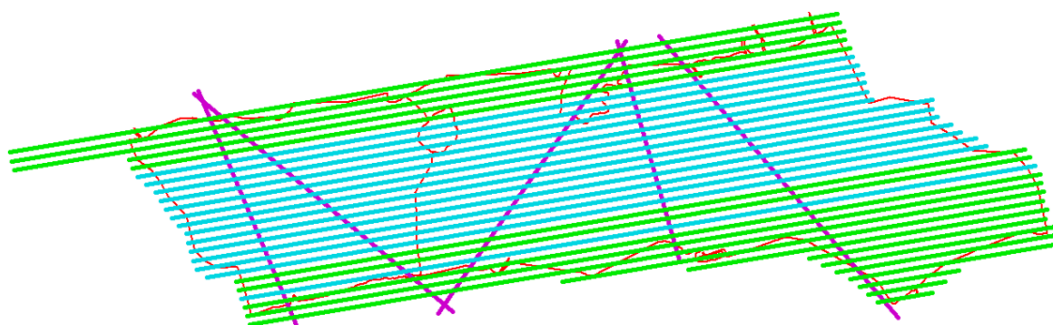
De astronomische en de gemeten waterstanden bij drie van de meetstations zijn weergegeven in Figuur 3.2. Voor het meetstation Holwerd is alleen de gemeten waterstand weergegeven. Daarbij is de tijd aangegeven dat de survey is uitgevoerd. In de figuren is te zien dat er op zowel de eerste als de tweede survey dag iets te lang doorgevlogen is met betrekking tot de waterstand bij Nes. De survey is juist te vroeg begonnen wanneer de waterstand bij Schiermonnikoog, Lauwersoog en Holwerd beschouwd wordt. Bij Schiermonnikoog en Lauwersoog was de waterstand alleen tijdens de eerste 10 minuten hoger dan -0.7 m NAP maar bij Holwerd was dit zeker het eerste half uur van de survey van 30 juni het geval.

De surveylijnen die ingevlogen zijn, zijn weergegeven in Figuur 3.3. De groene lijnen zijn ingevlogen op 30 juni, de zuidelijke lijnen zijn daarbij als eerste ingevlogen. De blauwe lijnen zijn ingevlogen op 1 juli. Omdat er op 30 juni te lang is doorgevlogen is de waterstand bij Nes aan het einde van de survey hoger dan -0.5 m NAP. Dit kan effect hebben op de analyses van de wadplaten. Hier moet rekening mee gehouden worden wanneer de wadplaathoogte beschouwd wordt.

Om de absolute nauwkeurigheid van de LiDAR data te controleren zijn er Ground Control Points (GCP's) gedefinieerd en ingemeten. Deze GCP's bevinden zich op het vaste land, op de uiteinden van de dwarslijnen in Figuur 3.3. In voorgaande survey 's zijn er ook GCP's op de wadplaten ingemeten, op aanwijzing van de NAM is dat dit jaar niet gebeurd (Fugro Geospatial B.V., 2015) maar zijn er wel peilmerkclusterroosters gewaterpast, welke gerelateerd worden aan de (absolute) GPS-metingen. De GCP's op het vaste land zijn tijdens de meetcampagne van oktober 2013 ingemeten. In Fugro (2015) wordt aangeduid dat voor de survey van zomer 2015 dezelfde controlepunten, en daarmee dezelfde data is gebruikt. Deze hoogtepunten zijn wel gecorrigeerd voor bodemdaling door middel van correctiewaarden die door de NAM op 8 juli 2015 zijn geleverd aan Fugro. Controle van de gemeten daling van GCP 2,3,4,5 en 6 voor 2015 toont aan dat de correctie minder dan één centimeter afwijkt.



Figuur 3.2 Waterstanden bij de meetstations Nes (a), Holwerd (b), Lauwersoog (c) en Schiermonnikoog (d).



Figuur 3.3 Vlieglijnen op de verschillende dagen van de survey: 30 juni (groen) en 1 juli (lichtblauw) en dwarslijnen (paars)

3.5 Levering

De LiDAR data van de meest recente opname is aangeleverd door Fugro in twee formaten:

1. als ASCII bestanden op een 1m x 1m grid (hier te noemen "ASCII 1x1m data"). De ASCII bestanden bevatten x-, y- en z-waarden. De x- en y-coördinaten 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.

3.6 Verwerking

De methode die wordt gehanteerd om de ASCII 1x1 m data te verwerken is vrijwel gelijk aan de methode van voorgaande jaren, die staat beschreven in Cronin en Wang (2012). Een belangrijke verandering is dat voor de hypsometrische curven en histogrammen de bodemkaarten worden geïnterpoleerd, zodat een volledige gebiedsdekking wordt verkregen. De data van het najaar van 2013 is opnieuw aangeleverd als niet geïnterpoleerde data, zodat alle kaarten op identieke wijze zijn aangeleverd en verwerkt.

Bij de interpolatie van de data ten behoeve van de hypsometrische curven bleek dat de data uitschieters bevat die tijdens de interpolatie problemen opleveren. De data van voorjaar 2010 en voorjaar 2011 bevatten de meeste uitschieters. Bij de in gebruik name van een nieuwe scanner door Fugro (vanaf 2013), is de kwaliteit van de data verbeterd en het aantal uitschieters sterk gereduceerd. Om geen last te hebben van deze uitschieters is er een extra stap toegevoegd aan de verwerking van de data. De verwerking kan worden samengevat in een aantal stappen:

1. De ASCII 1x1 m data wordt omgezet naar roostercellen met een resolutie van 10x10 m. Eerst worden uitschieters verwijderd door alle punten met een hoogteligging boven 2 m NAP te verwijderen. Daarna worden de ASCII 1x1 m datapunten gemiddeld naar

- 10x10 m roosterzellen. Er wordt bij deze stap geen data geïnterpoleerd dus roosterzellen zonder datapunten blijven leeg.
2. Gaten in de dataset worden opgevuld door middel van driehoeksinterpolatie. Deze stap levert een aparte dataset met geïnterpoleerde data.
 3. Data met een bodemhoogte lager -0.5 m NAP worden verwijderd, zodat de waterspiegel uit de data wordt gefilterd. Deze stap gebeurt zowel voor de data die niet geïnterpoleerd is (uit stap 1) als de data die dat wel is (uit stap 2).

Het percentage van de cellen die een waarde hebben (de dekking) binnen de polygoon van het Friesche Zeegat is weergegeven in Tabel 3.2. De polygoon van het Friesche Zeegat is te zien in Figuur 3.1. De dekking is in de tabel weergegeven voor de data waarbij de waterspiegel nog niet verwijderd is, data waarvoor dit wel is gebeurd en de geïnterpoleerde data waar de waterspiegel verwijderd is. Daarbij is het verschil tussen de dekking van de kaarten zonder waterspiegel met en zonder interpolatie weergegeven om de winst van de interpolatieslag aan te duiden. De dekking van de eerste twee kolommen is anders dan in voorgaande studies omdat de uitschieters zijn verwijderd, het verschil in dekking is maximaal 0,12%. De dekking van het jaar 2013 wijkt meer af dan in voorgaande studies (Vroom en Beekhuizen, 2015; Arentz en Vroom, 2014) omdat de 2013 data opnieuw aangeleverd is zonder dat deze geïnterpoleerd is door Fugro. Daarnaast is te zien dat de dekking vanaf 2013 is toegenomen, omdat sindsdien een nieuwe scanner is gebruikt. Daardoor hoeven er ook relatief minder punten geïnterpoleerd te worden met de driehoeksinterpolatie. Wat tevens opvalt is dat de dekking van de zomer 2015 opname van de gefilterde dataset kleiner is dan van najaar 2013 en voorjaar 2014, ondanks dat de dekking van de ongefilterde dataset groter is. Kennelijk zijn er voor deze opname meer punten beneden -0.5 m NAP.

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

LIDAR opname	Dekking in [%]			Vershil [%]
	In polygoon	In polygoon + filtering water	In polygoon + filtering water geïnterpoleerde datasets	Vershil geïnterpoleerd – niet geïnterpoleerd zonder waterspiegel
Voorjaar 2010	92,63	50,16	53,33	3,17
Voorjaar 2011	80,37	49,97	53,18	3,21
Najaar 2011	90,47	50,69	53,12	2,43
Najaar 2012	94,73	50,50	52,69	2,19
Najaar 2013	98,38	52,84	53,29	0,45
Voorjaar 2014	98,48	52,95	53,77	0,82
Najaar 2014	98,79	55,44	56,03	0,59
Zomer 2015	99,82	51,33	51,50	0,17

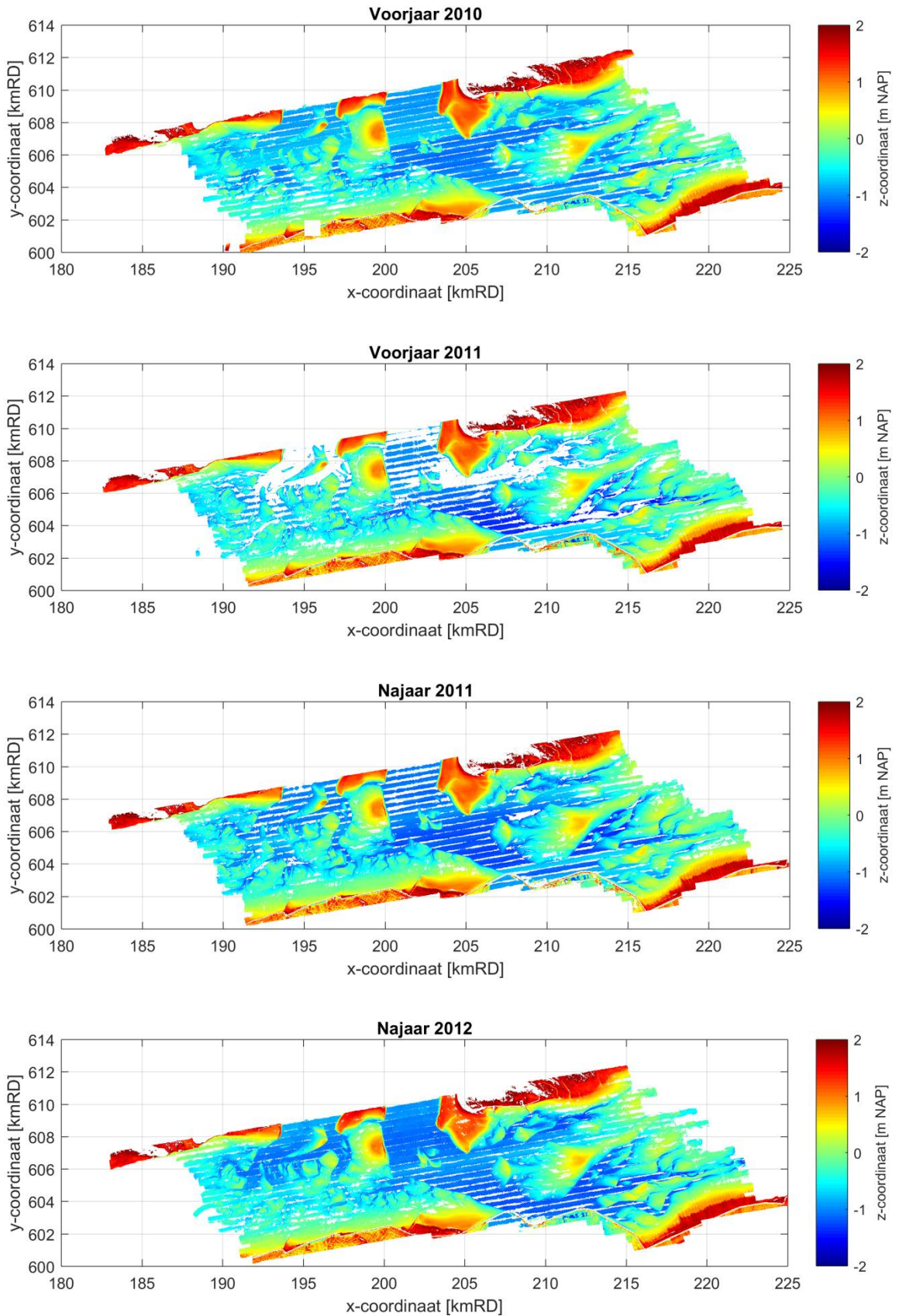
3.7 Bodemkaarten

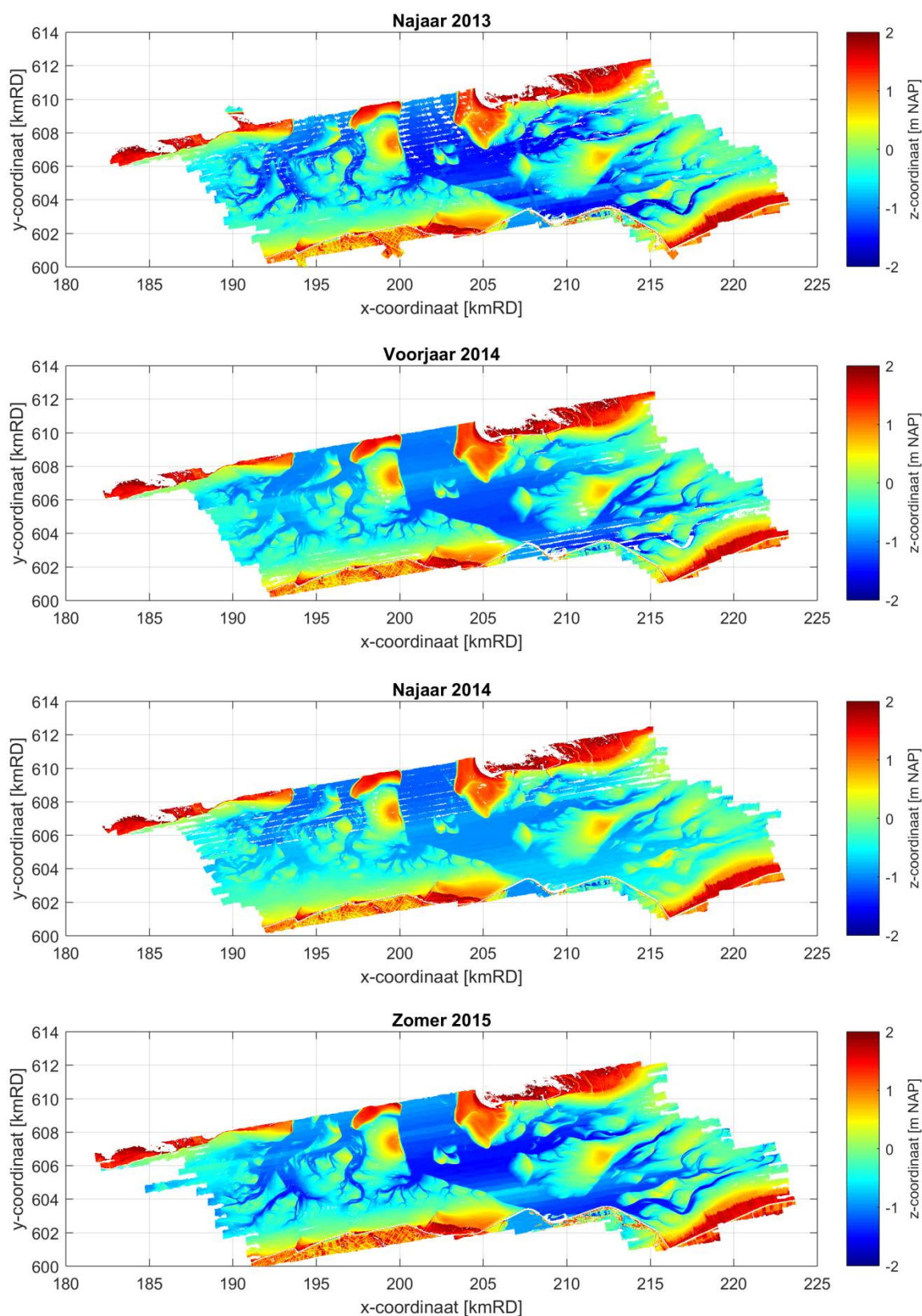
In Figuur 3.4 zijn de bodemkaarten weergegeven die ontstaan uit de vergriddde 10 x 10 m data. Lege roosterzellen in deze dataset zijn niet geïnterpoleerd. De bodemkaarten zijn weergegeven voor alle Fugro LiDAR opnamen van 2010 tot en met 2015. De bodemkaarten die resulteren uit de interpolatieslag zijn weergegeven in Bijlage A (Figuur A.1).

De verbeterde dekking vanaf 2013 die het gevolg is van de nieuwe scanner is duidelijk te zien in de bodemkaarten. Het streeppatroon dat ontstaat vanwege de vliegbanen wordt minder duidelijk zichtbaar in de jaren vanaf 2013. In het najaar van 2014 is de LiDAR survey gedeeltelijk uitgevoerd bij een waterstand die hoger was dan -0.7 m NAP bij Nes (Vroom en Beekhuizen, 2015). Hierdoor kan het zijn dat er op sommige locaties de waterspiegel is ingemeten in plaats van de bodemhoogte en er dus een hogere waarde voor de bodemhoogte verkregen wordt. De bodemkaart van najaar 2014 laat dan ook een duidelijk verschil met de andere kaarten zien doordat in het zuidwestelijke gedeelte bij Holwerd de waterspiegel en land oppervlak moeilijker te onderscheiden zijn en de kleur van de waterspiegel lichter blauw is. De geulen lopen hier dan ook minder ver door naar het zuiden toe dan bij de voorgaande en opvolgende opname het geval is. De nieuwste opname van zomer 2015 toont een bijna volledige dekking. De streeppatronen die het resultaat zijn van de vliegbanen zijn nog wel duidelijk zichtbaar in het gebied waar water is. Dit komt waarschijnlijk doordat de reflectie aan de randen van de vliegbanen een stuk minder sterk is boven water dan boven land. Daarnaast kan de waterspiegel variëren tussen de perioden dat de twee vliegbanen worden ingevlogen. De vliegbanen zijn wel minder sterk zichtbaar dan dat in voorgaande jaren het geval is.

De bodemkaarten die ontstaan nadat de waterspiegel uit de twee verschillende datasets is gefilterd zijn eveneens weergegeven in Bijlage A. De kaarten van de dataset die niet geïnterpoleerd zijn weergegeven in Figuur A.2 en de kaarten van de dataset die wel geïnterpoleerd is zijn weergegeven in Figuur A.3. De afkapgrens van de waterspiegel ligt op -0.5 m NAP. Deze grens wordt aangehouden omdat de LiDAR survey wordt uitgevoerd bij een astronomische waterstand van -0.7 m NAP bij Nes, Holwerd, Schiermonnikoog en Lauwersoog en de waterstand die werkelijk op kan treden kan verschillen van de astronomische waterstand (Figuur 3.2).

De analyse van de erosie en sedimentatie in het Friesche Zeegat (hoofdstuk 0) wordt uitgevoerd met de bodemkaarten uit Figuur A.2. De analyse van het wadplaatareaal door middel van hypsometrische curven (hoofdstuk 0) wordt uitgevoerd met de bodemkaarten zoals deze zijn weergegeven in Figuur A.3.





Figuur 3.4 Visualisatie van alle LiDAR opnames (april 2010 t/m juli 2015) op een 10m x 10m grid waarbij alle datapunten met een hoogteligging van meer dan 2 m NAP zijn verwijderd.

4 Erosie en sedimentatie

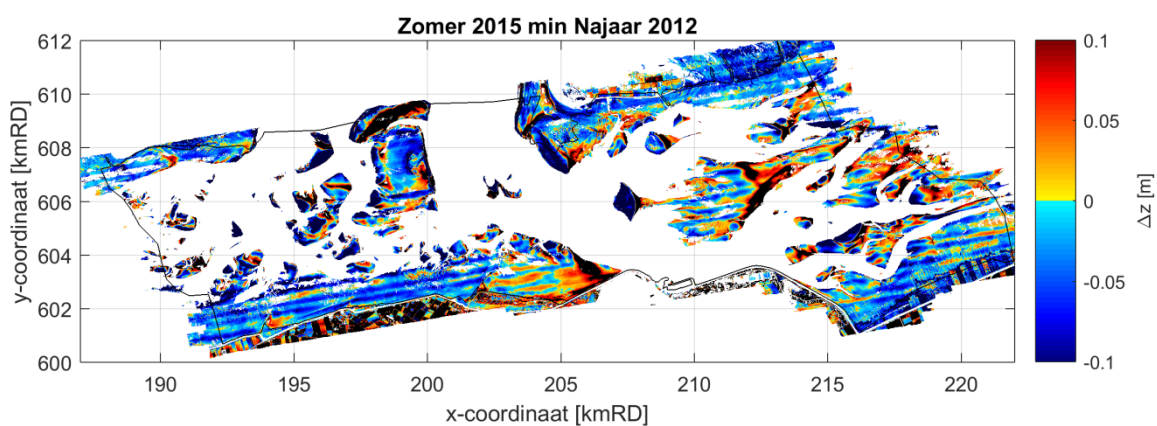
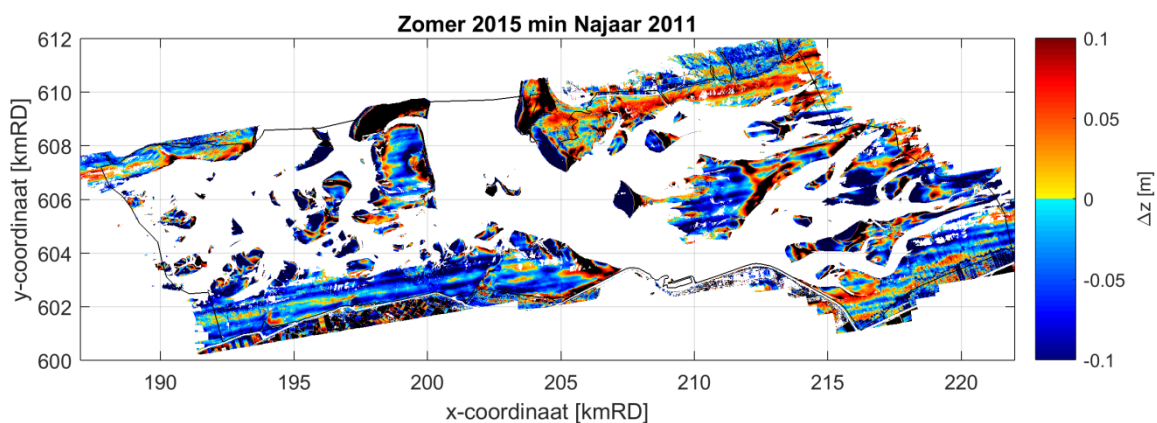
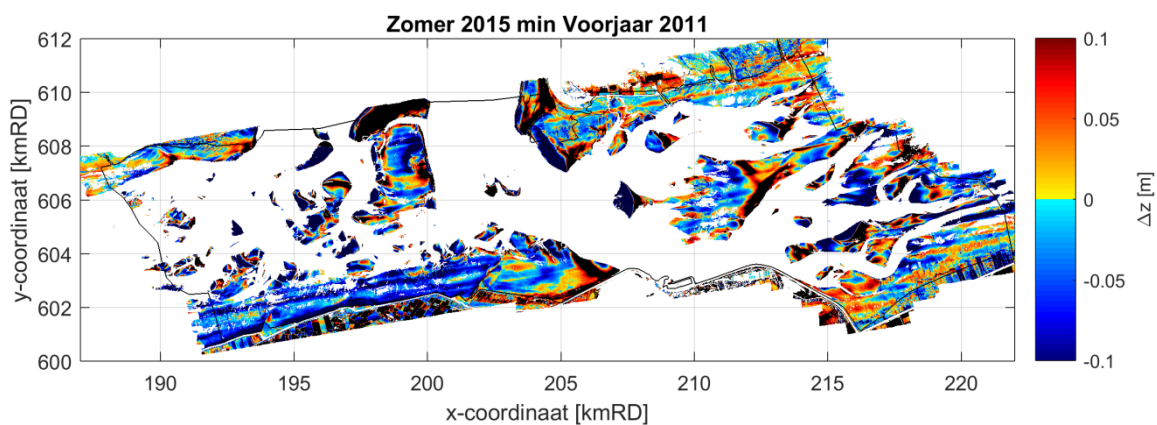
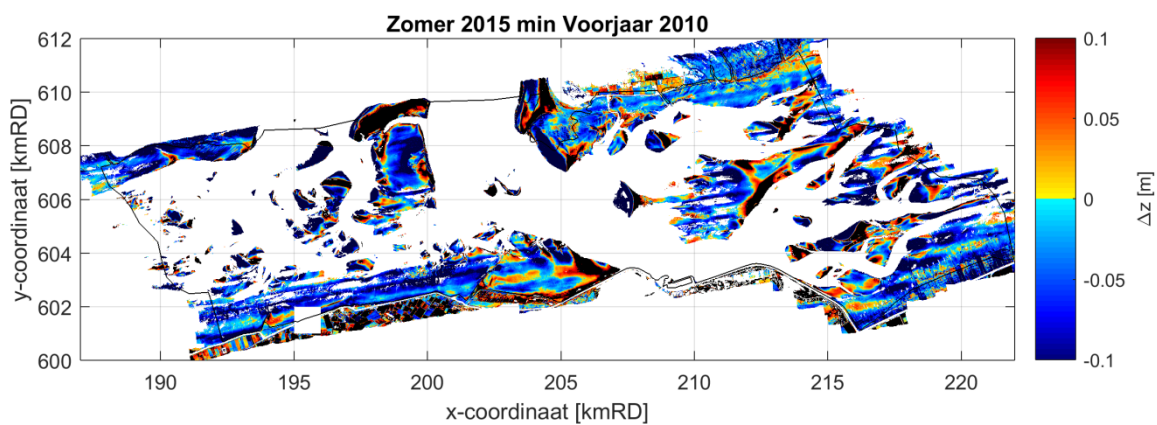
4.1 Erosie/sedimentatiekaarten

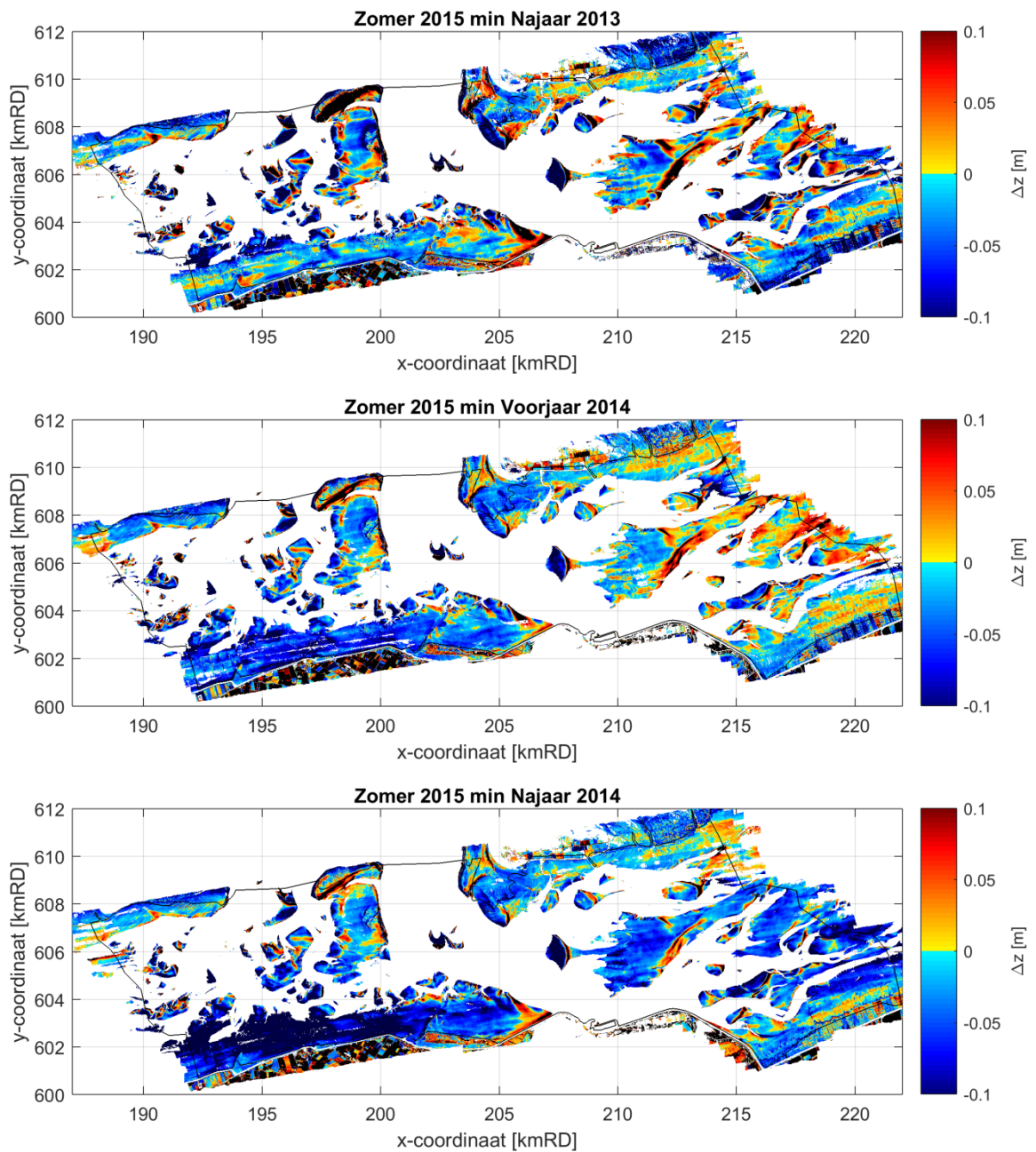
De bodem van de zomer van 2015 wordt vergeleken met alle voorgaande LiDAR opnamen. De erosie/sedimentatiekaarten die hieruit ontstaan zijn weergegeven in Figuur 4.1. Net zoals te zien is in de bodemkaarten van Figuur A.2 zijn de streep patronen die het gevolg zijn van de vliegbanen te onderscheiden in de verschilkaarten. Deze patronen zijn niet te verklaren in termen van erosie of sedimentatie. Wel is duidelijk te zien dat deze patronen steeds minder duidelijk te onderscheiden zijn voor de recentere opnamen. Dit komt waarschijnlijk door het gebruik van de nieuwe scanner.

De verschilkaart met de opname van het najaar van 2014 laat een zeer sterk erosiegebied zien in het zuidelijke gedeelte van het Friesche Zeegat. In Vroom en Beekhuizen (2015) is te zien dat de verschilkaarten van het najaar van 2014 een zeer sterk sedimentatiepatroon laten zien. Het is zeer onwaarschijnlijk dat er op een dergelijk korte tijdschaal zoveel sediment is gesedimenteerd en vervolgens weer geërodeerd. De bodemhoogte van de opname van het najaar van 2014 lijkt op deze locatie dan ook te hoog te liggen. Het is daarom waarschijnlijk dat er tijdens deze opname water op de wadplaten heeft gestaan tijdens het inmeten. Hier is dus niet de hoogte van de wadplaten maar de hoogte van de waterspiegel ingemeten. Dit sterke erosie/sedimentatiepatroon is vrij duidelijk aanwezig voor het gebied bij Holwerd maar ook het Brakzand en de wadplaten ten oosten daarvan vertonen dit patroon tussen de opname van najaar 2014 en zomer 2015.

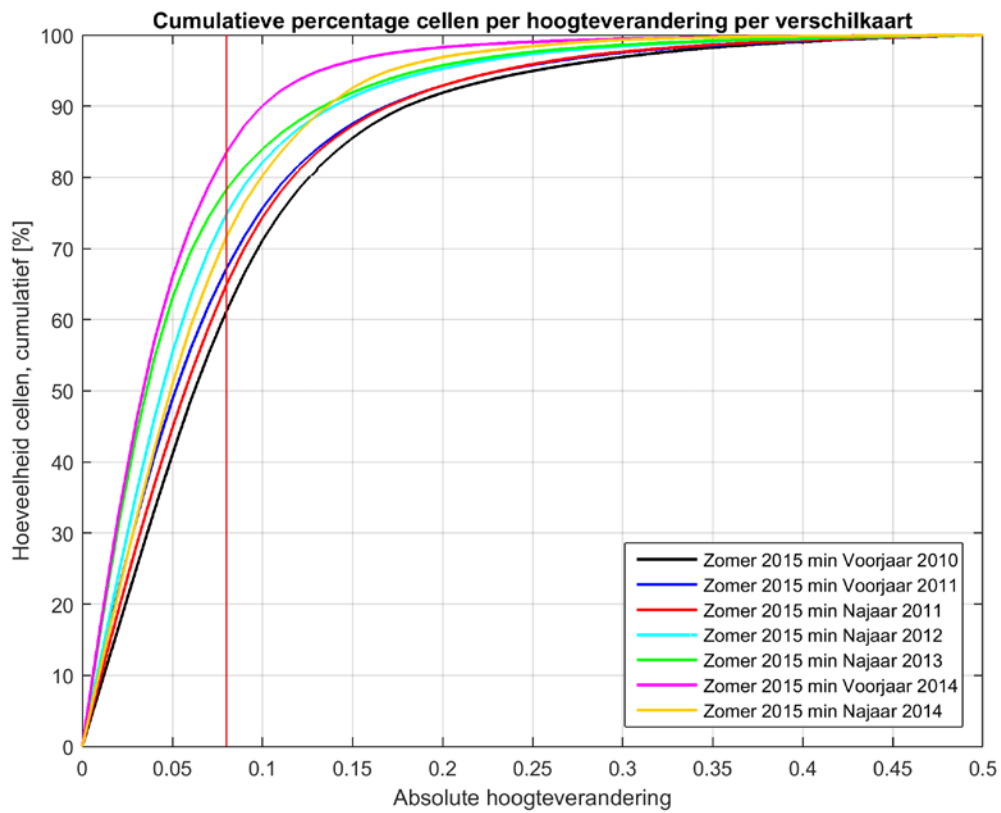
Een aanzienlijk gedeelte van de bodemhoogteveranderingen die te zien zijn in Figuur 4.1 zijn kleiner dan de meetfout van de LiDAR data. Het cumulatieve percentage van de cellen dat een bodemverandering laat zien dat kleiner is dan de meetfout is te zien in Figuur 4.2 voor iedere verschilkaart. Hier is te zien dat iets minder dan 60% van de hoogteveranderingen binnen de foutenmarge valt voor de verschilkaart met de eerste opname van 2010. Het aantal cellen dat buiten de foutenmarge valt is groter voor verschilkaarten met de oudere opnamen dan voor de verschilkaarten met de meer recentere opnamen doordat de morfologische veranderingen groter zijn over een langere tijdschaal. Voor de verschilkaarten met de oudere opnamen kan dus voor een groter gedeelte van de kaart aangegeven worden of de geobserveerde hoogteveranderingen het gevolg zijn van morfologische verandering en niet het gevolg van verschillen die ontstaan door de meetfout. Bij het percentage cellen dat buiten de meetfout valt voor de verschilkaart van zomer 2015 en najaar 2014 moet rekening worden gehouden met het feit dat een groot gedeelte van bodemhoogteveranderingen die groter zijn dan de meetfout zich in het gebied bij Holwerd bevinden, waar de bodemkaart een te hoge bodemligging heeft.

Door de kleurenschaal van de erosie- en sedimentatiekaarten aan te passen aan de meetfout van 8 cm blijven alleen de hoogteveranderingen over die significant zijn ten opzichte van de meetfout (en daarmee het gevolg zijn van de natuurlijke dynamiek van de wadplaten en/of bodemdaling). De kaarten waarbij de kleurenschaal is aangepast zijn weergegeven in Figuur 4.3. Aan de hand van deze kaarten valt het op dat er in de Zoutkamperlaag voornamelijk sedimentatie optreedt en dan er in Pinkegat voornamelijk erosie optreedt.

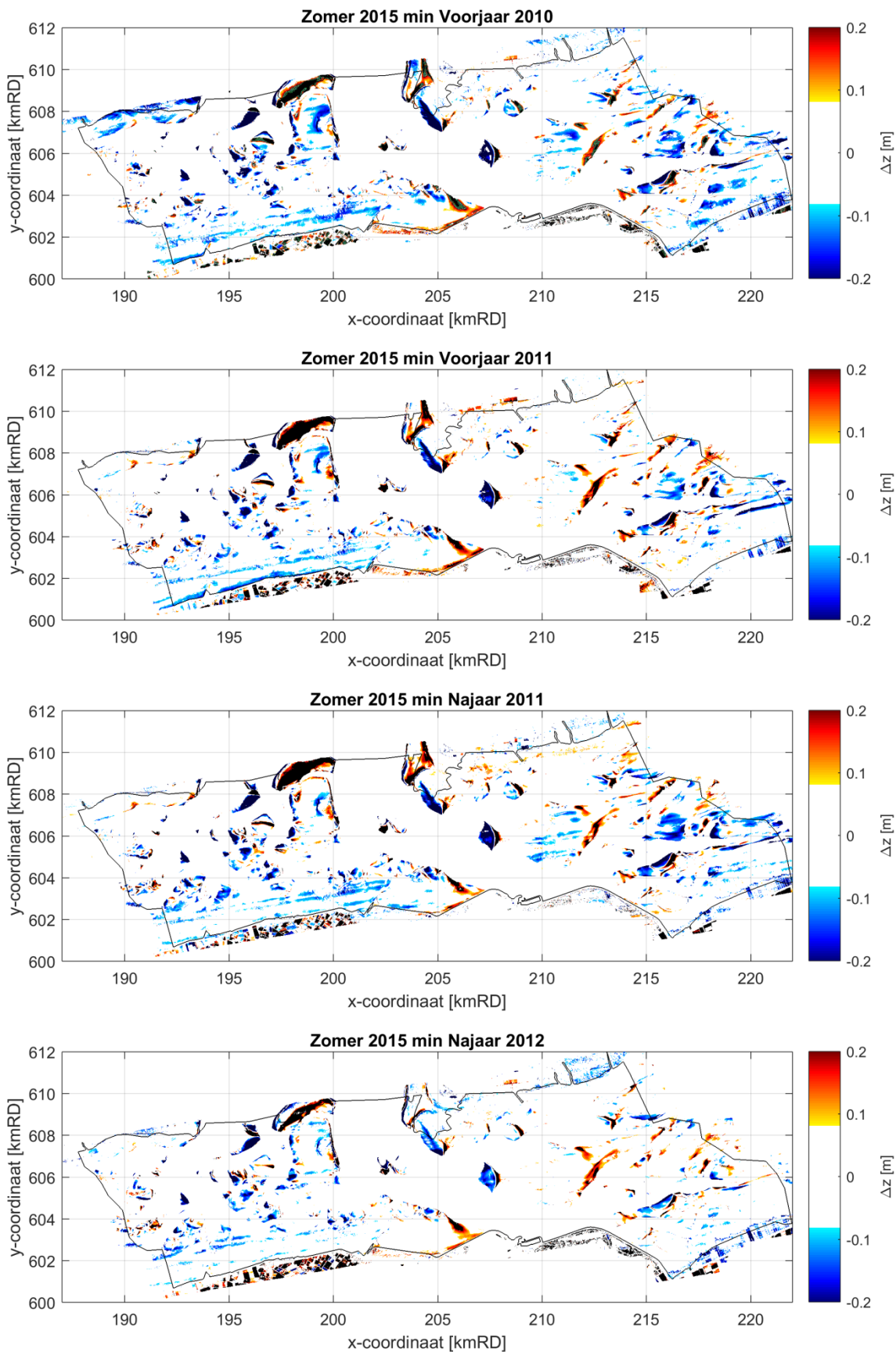


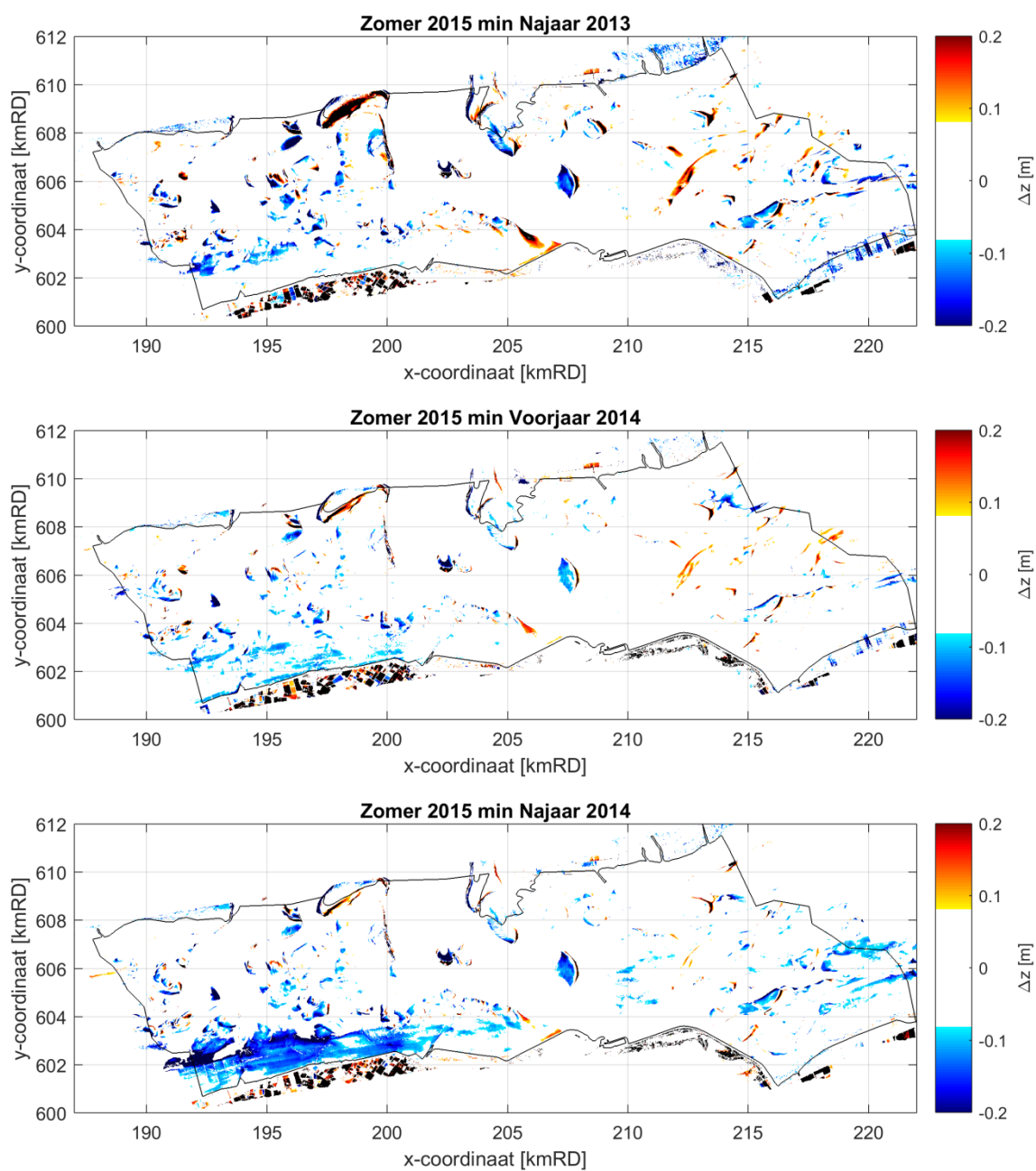


Figuur 4.1 Verschilkaarten van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m september 2014) ten opzichte van de LiDAR opname van juli 2015.



Figuur 4.2 Cumulatieve 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 4.3 Verschilkaarten van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m september 2014) ten opzichte van de LiDAR opname van juli 2015 met kleurbalk aangepast aan de meetfout.

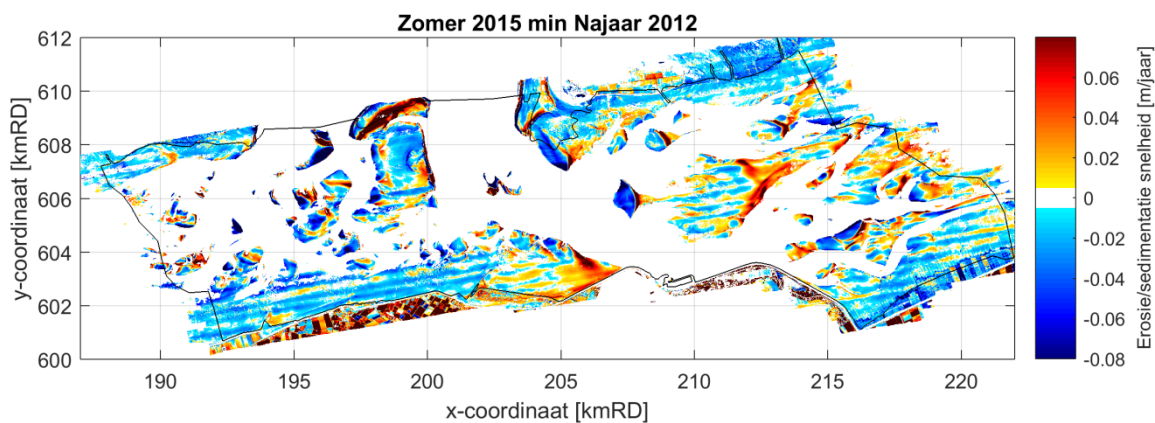
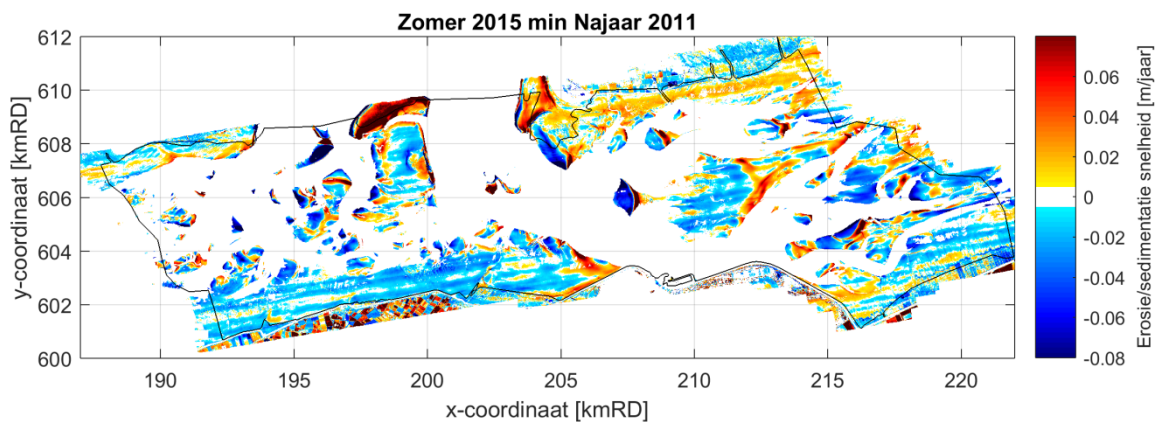
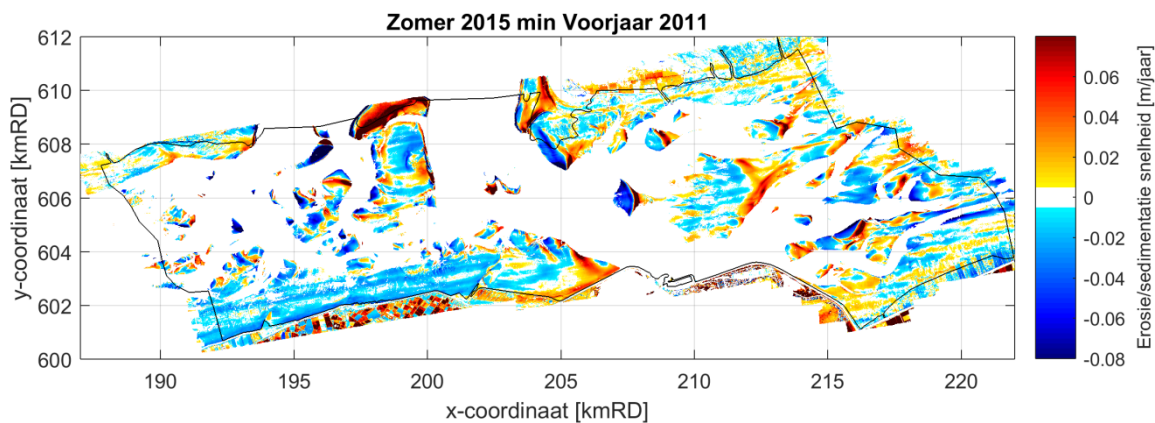
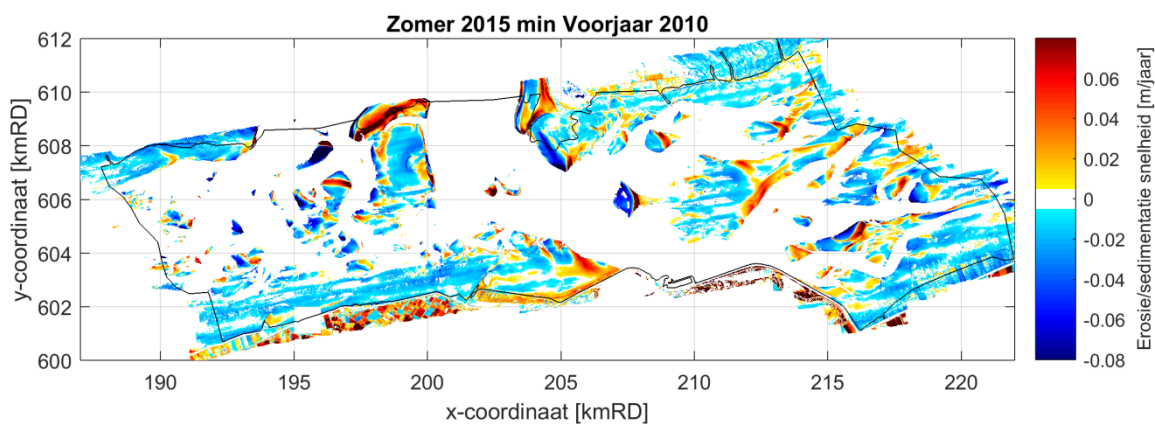
4.2 Erosie/sedimentatiesnelheden

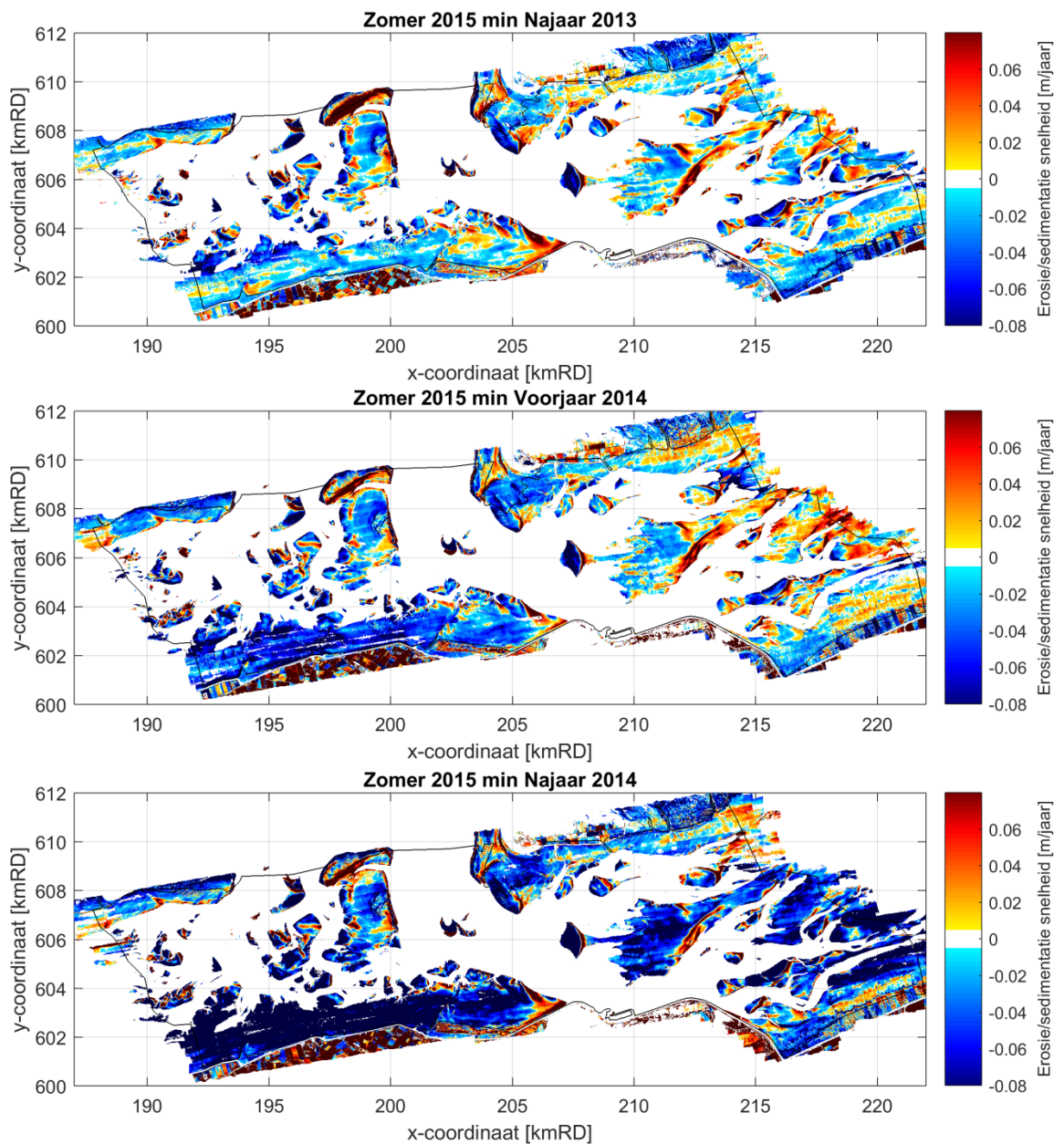
Wanneer de bodemhoogteveranderingen die in Paragraaf 4.1 zijn geobserveerd worden geïnterpoleerd of geëxtrapoleerd naar veranderingen per jaar wordt een beeld verkregen van de erosie en sedimentatiesnelheden. Door middel van deze figuren kunnen de veranderingen tussen de verschillende jaren beter met elkaar vergeleken worden. Daarnaast kunnen de erosie/sedimentatiesnelheden ook worden vergeleken met erosie/sedimentatiesnelheden die worden verkregen uit een lange-termijn meetreeks van vaklodingen van Rijkswaterstaat van 1987 tot 2012.

De erosie/sedimentatiesnelheidskaarten zijn weergegeven in Figuur 4.4. Wat opvalt, is dat de snelheden toenemen wanneer de tijdsperiode tussen twee opnamen afneemt. Dit komt door dat de meetfout dan minder wordt uitgemiddeld. De erosie/sedimentatiesnelheden die verkregen worden van de 2005 – 2012 RWS vaklodingen zijn weergegeven in Figuur 4.5. De verschillende kaarten zijn onderling lastig te vergelijken omdat de RWS vaklodingen op een andere manier zijn ingewonnen en verwerkt. Er zijn echter ook patronen zichtbaar die in beide kaarten te onderscheiden zijn:

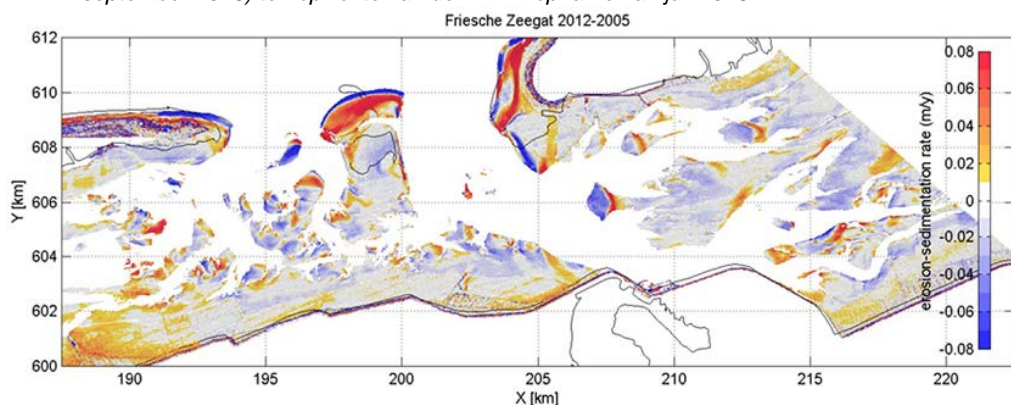
- de sedimentatie aan de oostkant van het Brakzand,
- sedimentatie op de kop van Schiermonnikoog,
- sedimentatie op het noordelijke gedeelte van de Engelsmanplaat,
- het opvullen van de voormalige getijdegeul die voorheen de toegang tot de Lauwerszee was.

De lange-termijn trends van de bodemveranderingen in het Friesche Zeegat zijn op basis van de RWS vaklodingen weergegeven in Figuur 4.6. De belangrijkste observatie aan de hand van deze data is dat er in deze periode geen significantie verschillen zijn waar te nemen in bodemveranderingen ter hoogte van de gaswinlocaties.

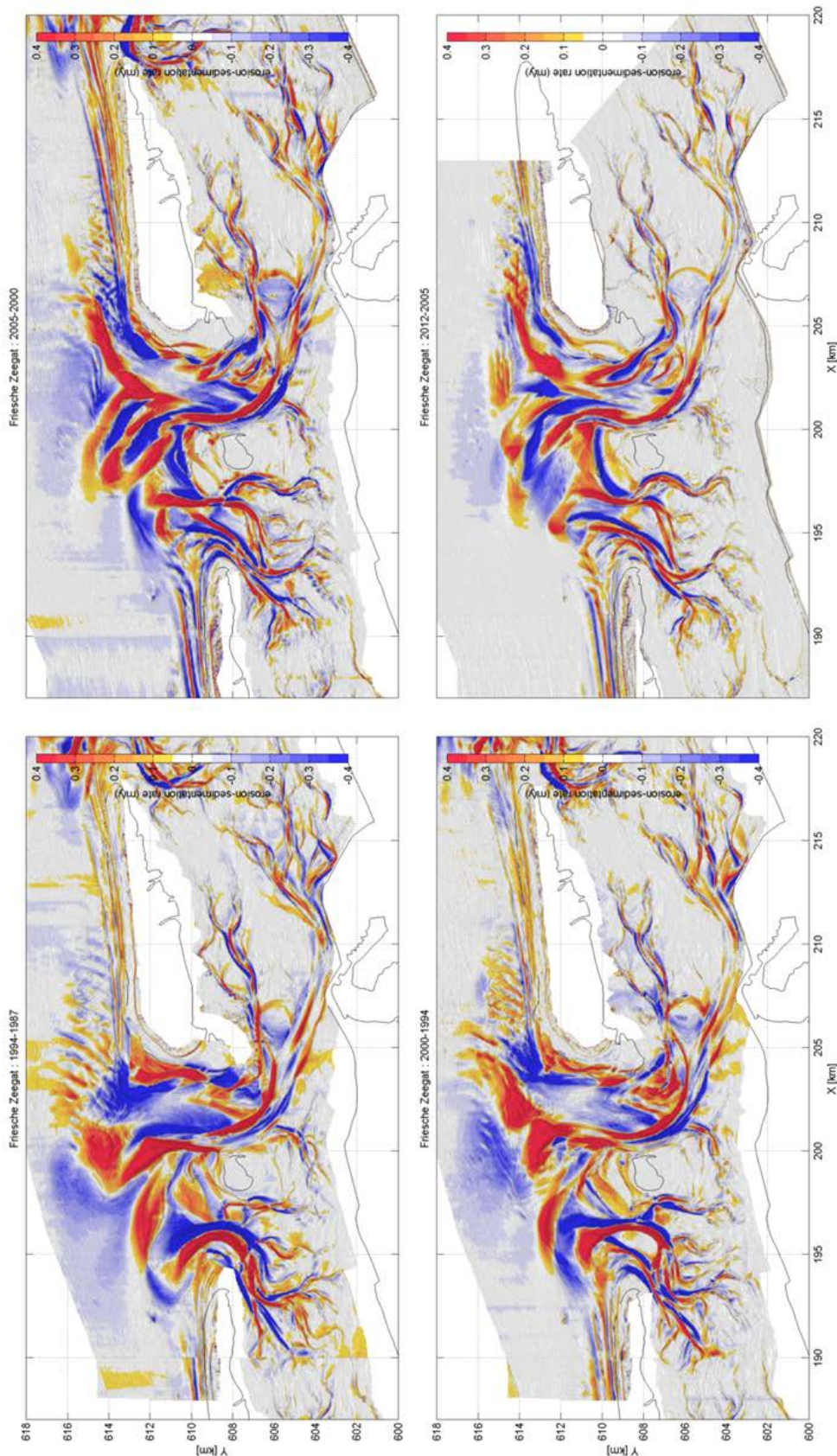




Figuur 4.4 Erosie/sedimentatiesnelheden in meter per jaar van alle eerdere LiDAR opnames (april 2010 t/m september 2015) ten opzichte van de LiDAR opname van juli 2015.



Figuur 4.5 Erosie/sedimentatiesnelheden in meter van de RWS vaklodingen data van 2012 ten opzichte van 2005.



Figuur 4.6 Gemeten sedimentatie-erosiesnelheden (m/jaar) gebaseerd op de vaklodgingen over de periode 1987-2012.

5 Analyse per deelgebied

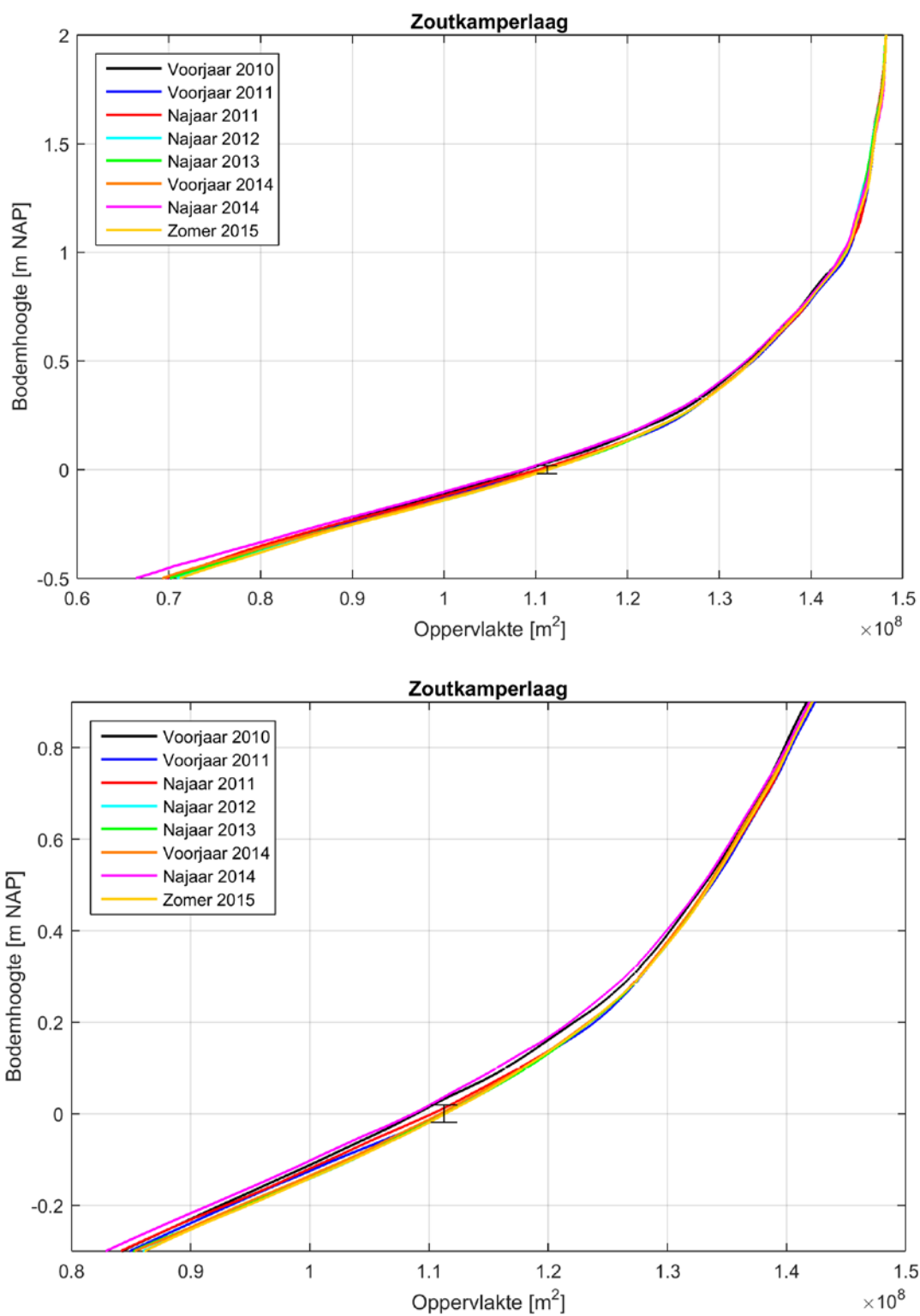
De morfologische veranderingen van de wadplaten worden in dit hoofdstuk geanalyseerd met behulp van hypsometrische curven en histogrammen van de bodemhoogte. Een hypsometrische curve geeft per bodemhoogte het totale oppervlak. Door de curven van verschillende jaren te vergelijken kan een beeld verkregen worden van de verandering van de morfologie van de wadplaten en tevens op welke hoogte deze verandering heeft plaatsgevonden. De histogrammen geven de bodemhoogte gediscrèteerd voor de hoogteklassen weer (zie Cronin en Wang (2012) voor details).

De hypsometrische curven en histogrammen zijn gemaakt voor de kombergingen het Pinkegat en de Zoutkamperlaag (Figuur 5.1 tot en met Figuur 5.4). Daarnaast zijn er curven en histogrammen gemaakt voor vijf deelgebieden die in Vroom en Beekhuizen (2015) zijn gedefinieerd (Figuur 5.6 en Figuur 5.7). Deze curven en histogrammen zijn gemaakt aan de hand van de geïnterpoleerde datasets. Er zijn dus geen gaten in de data boven -0.5 m NAP aanwezig en de dekking binnen de polygonen verschilt daardoor niet veel tussen verschillende jaren (zie Tabel 3.2).

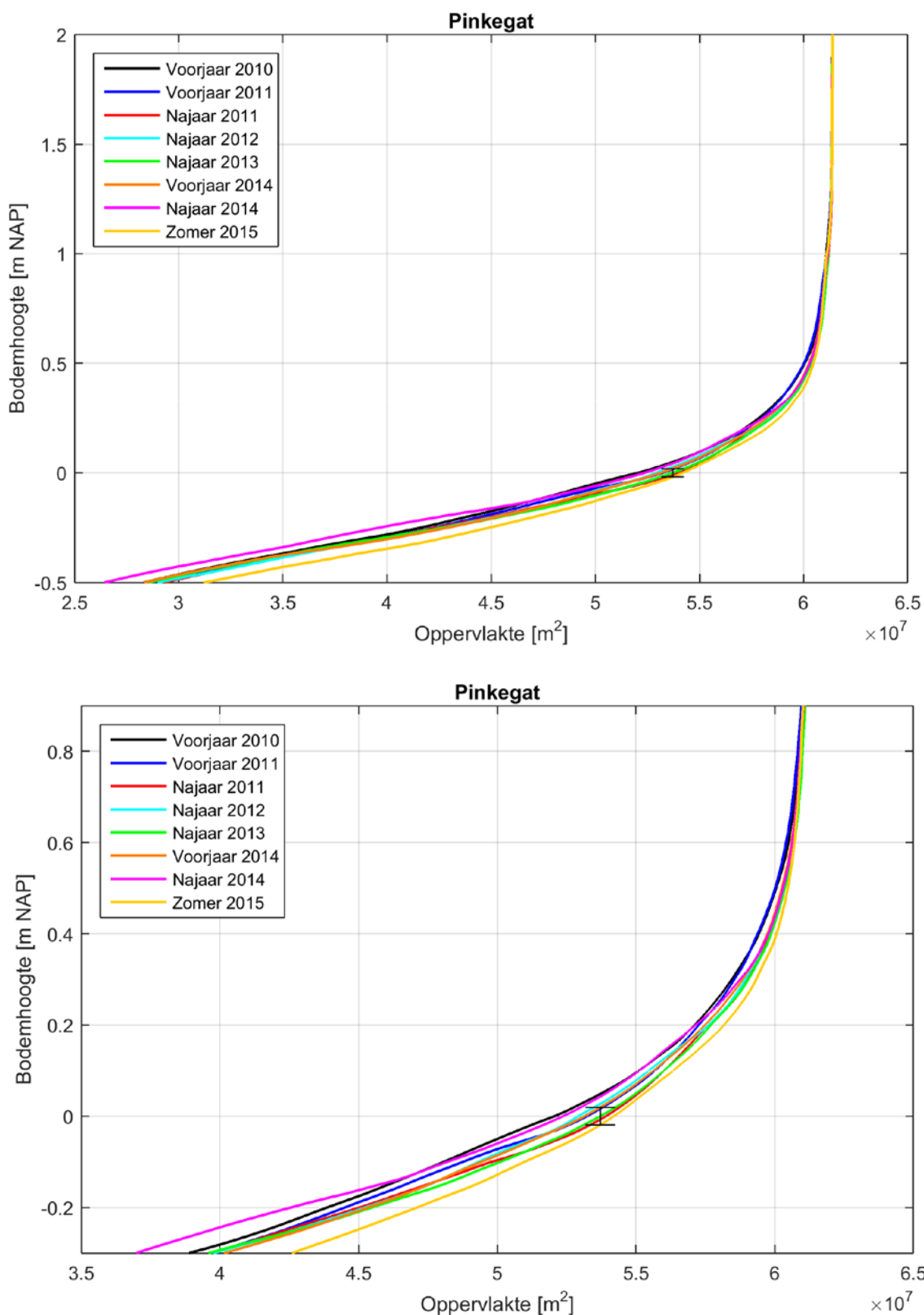
5.1 Analyse kombergingsgebieden

De hypsometrische curven voor de kombergingsgebieden Pinkegat en Zoutkamperlaag zijn weergegeven in Figuur 5.1 en Figuur 5.2. De verschillen tussen de curven van verschillende jaren zijn voor de Zoutkamperlaag (Figuur 5.1) erg klein. Uitzondering hierop is de curve voor het najaar van 2014, die een duidelijke afwijking toont voor het areaal dat tussen -0.5 m en -0.3 m NAP ligt. Dit verschil is mogelijk te verklaren aan de hand van de waterspiegel die tijdens deze opname is ingemeten. De rest van de veranderingen tussen twee opnamen zijn niet groter dan de meetfout en dus kunnen er nog geen conclusies getrokken worden over natuurlijke fluctuatie dan wel morfologische trends van de wadplaten in dit kombergingsgebied. De curven voor het kombergingsgebied Pinkegat (Figuur 5.2) laten grotere veranderingen zien, vooral voor het gebied tussen -0.5 m tot 0 m NAP. De hypsometrische curve van de opname van zomer 2015 laat een sterke afname zien van het areaal wadplaat dat tussen -0.5 m en 0.5 m NAP ligt. De maximale verschuiving van de curve is ongeveer 5 cm. Wanneer deze verandering wordt vergeleken met de curven van vorige jaren is duidelijk te zien dat deze groter is dan de meetfout (3,8 cm). Er moet daarom geconcludeerd worden dat de hoogteligging van de zomer 2015 opname een lagere bodemligging heeft binnen het polygoon van het Pinkegat dan de opnamen van voorgaande jaren. Deze afname kan meerdere oorzaken hebben:

- De LiDAR data zelf: de nauwkeurigheid van de LiDAR data zou een gedeelte van de geobserveerde verandering verklaren.
- De LiDAR survey van 2015 is in de zomer opgenomen terwijl de voorgaande survey 's in het voorjaar en het najaar zijn uitgevoerd. De natuurlijke jaarlijkse cycli van erosie en sedimentatie van de wadplaten kan een andere bodemligging in de zomer opleveren.
- De hoogte van de bodemligging is afgenomen als gevolg van bodemdaling. De bodemdaling als gevolg van gaswinning is echter voorspeld op enkele millimeters per jaar en de geobserveerde bodemverandering in het Pinkegat bedraagt tot maximaal 5 cm.



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.



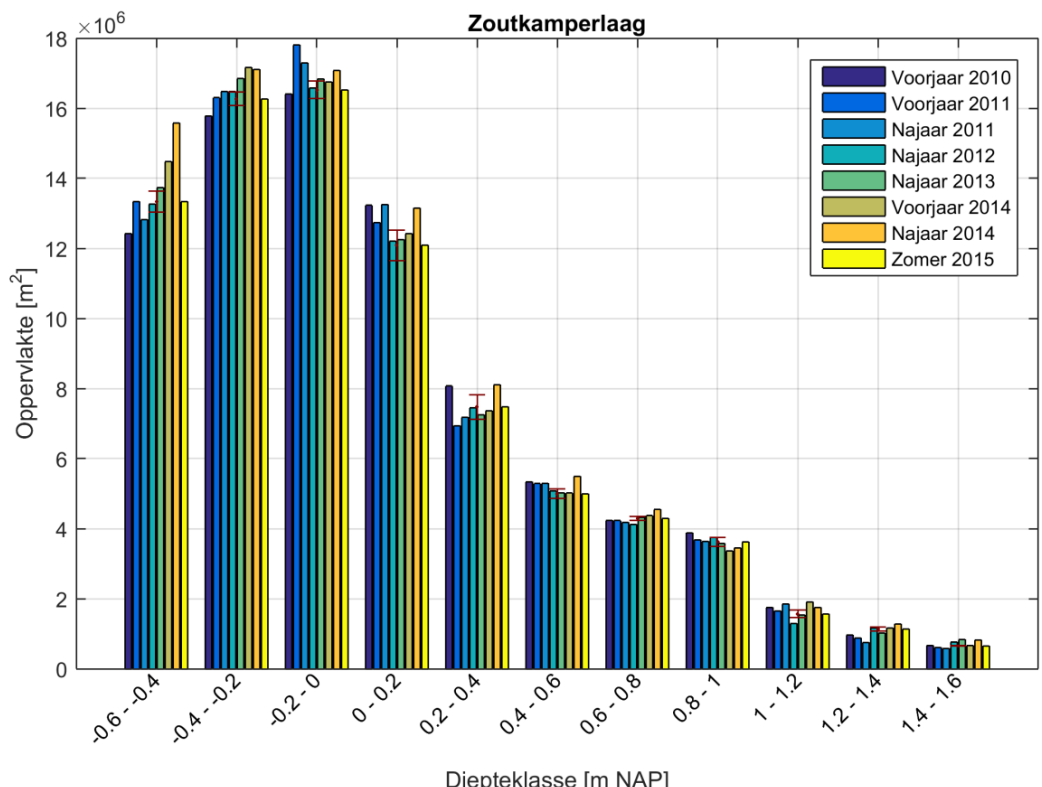
Figuur 5.2 Hypsometrische curves voor het kombergingsgebied Pinkegat voor alle LiDAR opnames voor het gehele hoogtebereik (boven) en ingezoomd (onder). De meetfout van 3,8 cm is weergegeven met een errorbar.

Het verschil in plaatareaal per bodemhoogte is als histogrammen weergegeven in Figuur 5.4 en Figuur 5.6. Omdat er een systematische fout zit in de hoogte van de LiDAR opnamen, werkt deze fout door in de berekening van de plaatarealen per hoogteklaas. Deze fout is berekend door de tweede afgeleid van de hypsometrische curve te vermenigvuldigen met de fout van 3,8 cm. In formulevorm geeft dit:

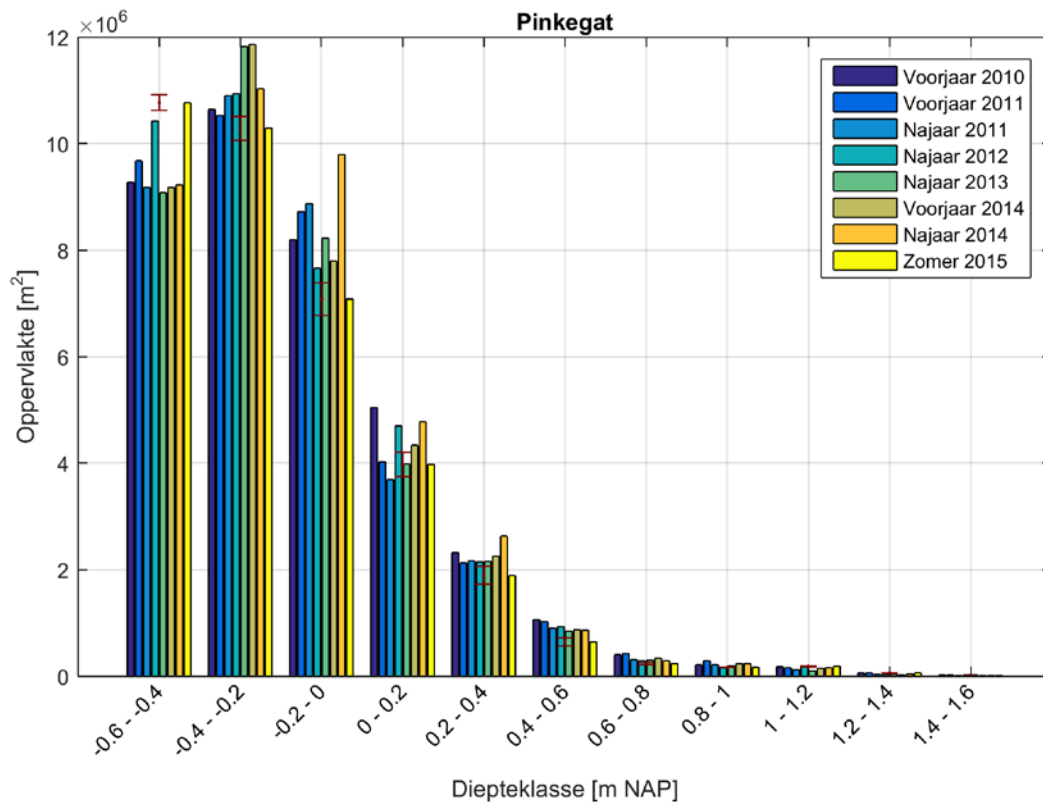
$$e_{\text{areaal}} = \left| \frac{d^2 A}{dz^2} \right| \cdot \Delta h \cdot e_{z,\text{sys}} \tag{1}$$

De berekende fout voor de opname van de zomer van 2015 is weergegeven als errorbar in de figuren.

Bij de Zoutkamperlaag zijn de verschillen met de drie voorgaande opnamen (najaar 2014 buiten beschouwing gelaten) klein. Het oppervlak neemt onder 0 m NAP iets af en daarboven iets toe, dit duidt op een verstijving van de helling van de wadplaten. De verschillen zijn groter dan de meetfout voor de diepteklassen die lager liggen dan -0.2 m NAP. De bodemligging is hier lager dan voorgaande metingen. De histogram van het Pinkegat laat een afname zien die groter is dan de meetfout voor die diepteklasse -0.4 m - -0.2 m NAP. Er is juist een zeer sterke toename van het areaal te zien dat zich tussen -0.6 - -0.4 m NAP bevindt.



Figuur 5.3 Histogram van de oppervlaktes per diepteklasse voor het kombergingsgebied Zoutkamperlaag. De bruine foutenbalk geeft de fout voor de zomer van 2015 aan.

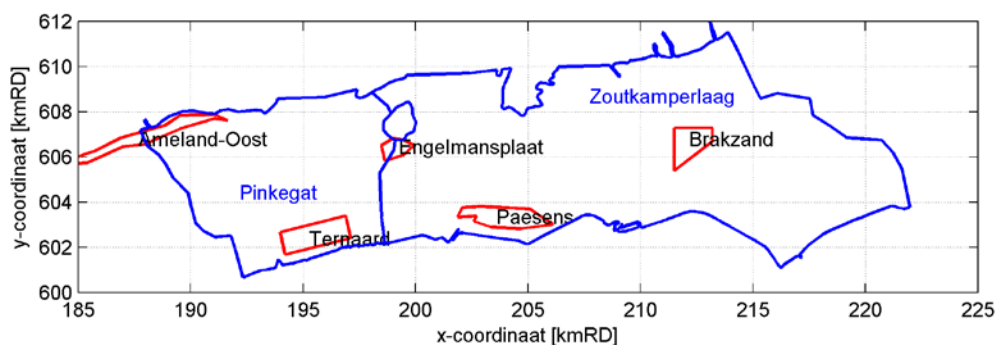


Figuur 5.4 Histogram van de oppervlaktes per diepteklasse voor het kombergingsgebied Pinkegat. De bruine foutenbalk geeft de fout voor de zomer van 2015 aan.

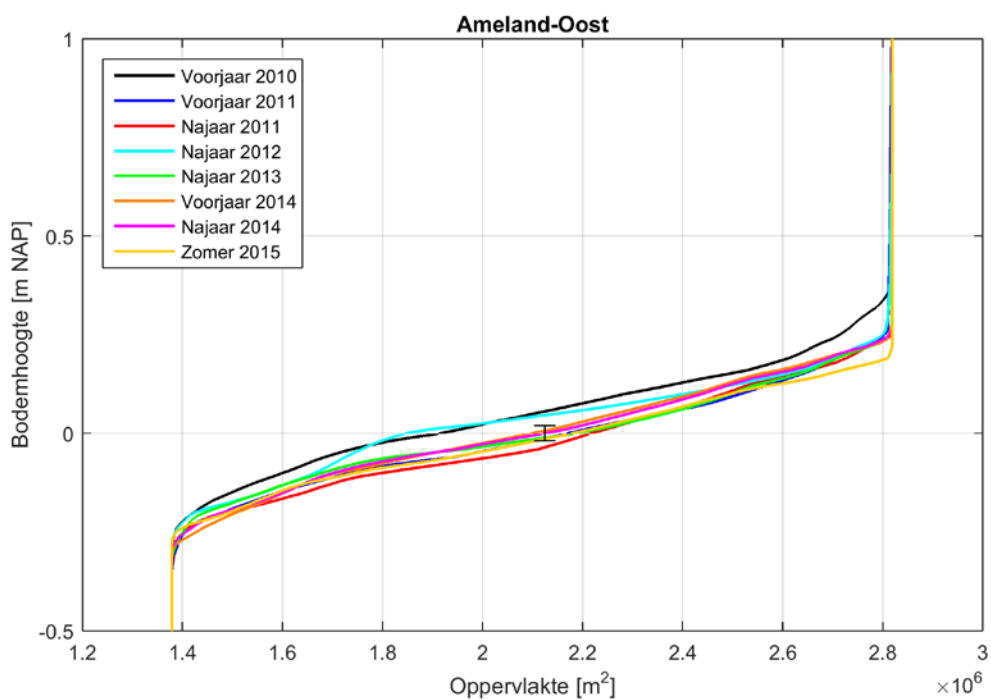
5.2 Analyse deelgebieden

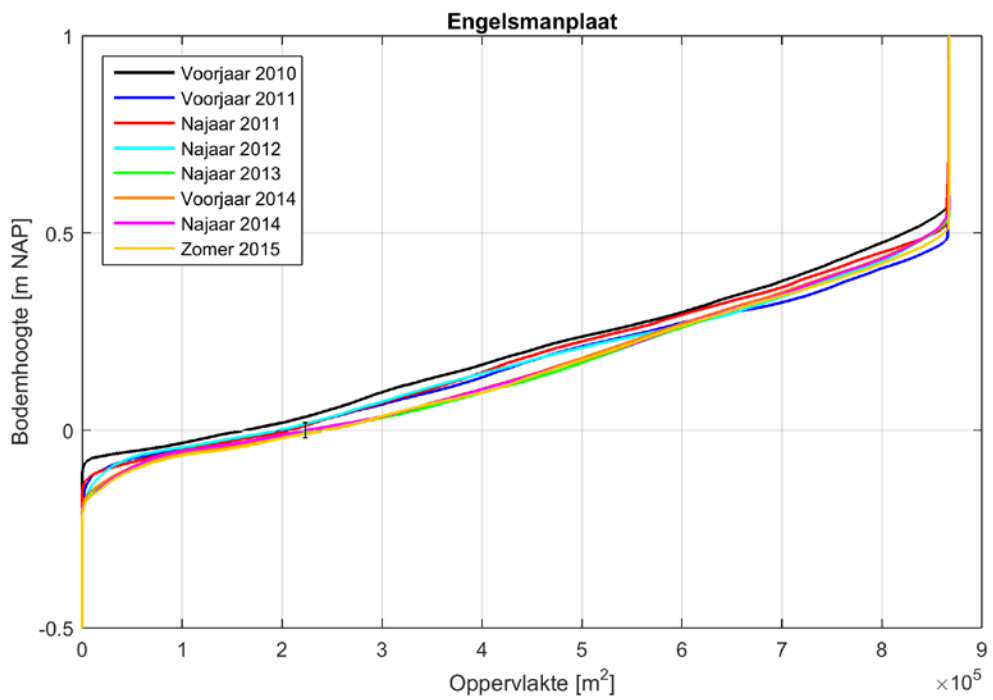
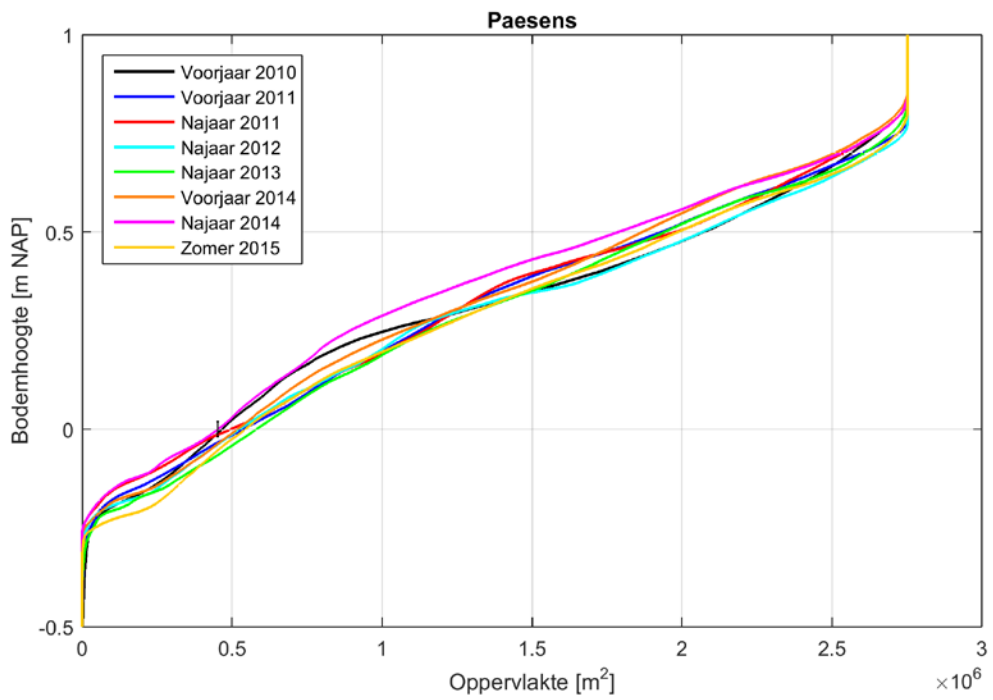
De ligging van de vijf verschillende deelgebieden is weergegeven in Figuur 5.5. De hypsometrische curven voor deze deelgebieden zijn weergegeven in Figuur 5.6 en de histogrammen per diepteklasse in Figuur 5.7.

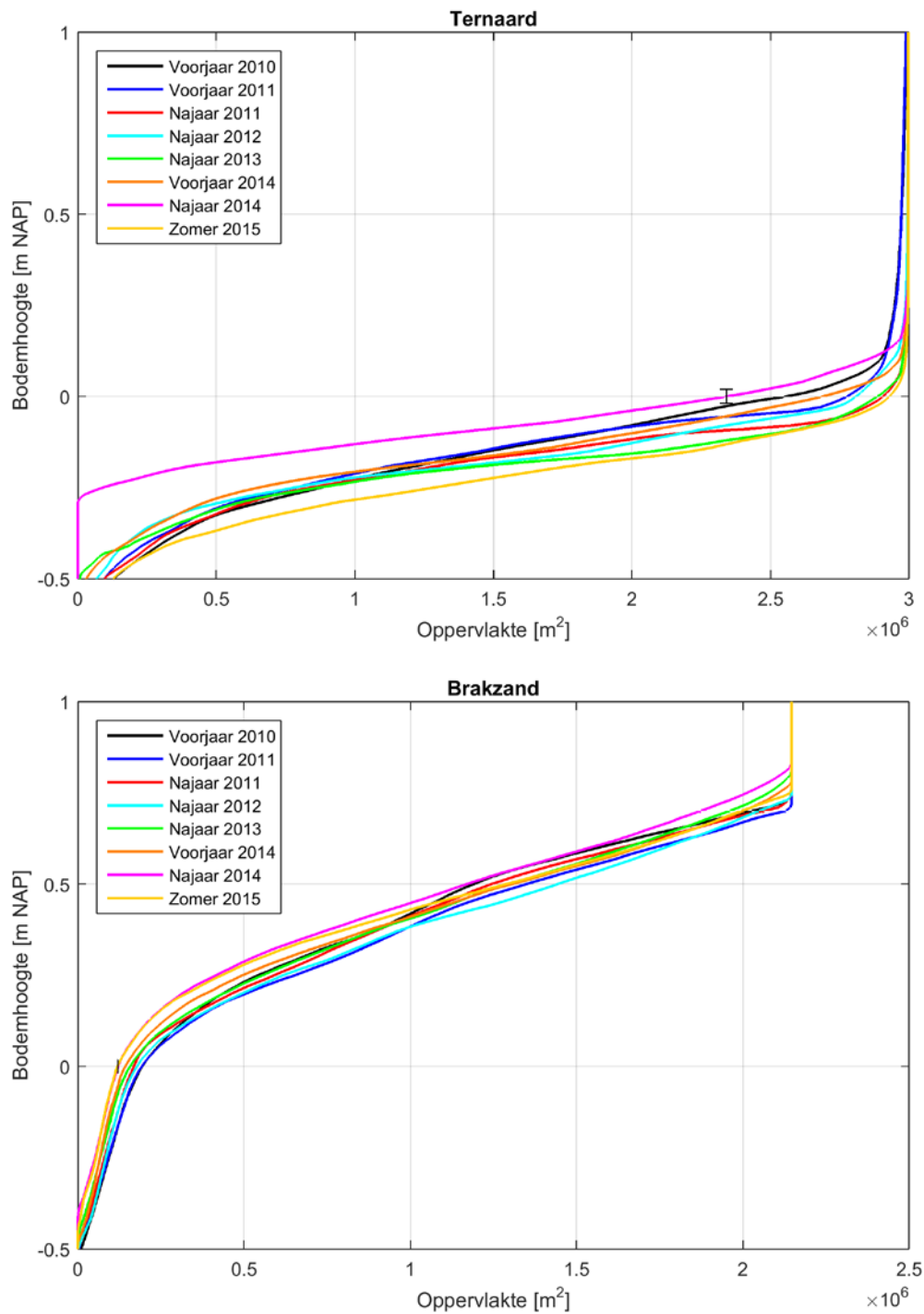
Voor de gebieden Ameland-Oost, Paesens en Engelsmanplaat lijken de verschillen in de hypsometrische curven niet groter te zijn dan de meetfout van 3,8 cm en kan er dus niet met zekerheid gezegd worden of de kleine verschillen het gevolg zijn van de morfologische veranderingen van het gebied. De hypsometrische curve van zomer 2015 in deelgebied Ternaard laat daarentegen een sterke afname zien van het areaal per hoogteklaas. De veranderingen zijn hier groter dan de meetfout van 3,8 cm en er kan daarom geconcludeerd worden dat de bodemligging in 2015 hier lager is dan in voorgaande jaren. Daarnaast is de foutieve bodemligging die het gevolg is van het inmeten van de waterspiegel in najaar 2014 (Figuur 4.1) ook zeer duidelijk waar te nemen in dit gebied. Bij de curven van het Brakzand is het tegenoversgestelde waar te nemen. Hier is het areaal per hoogteklaas juist toegenomen voor het areaal wat tussen -0.5 m en 0.5 m NAP ligt. In paragraaf 4.2 was geconstateerd dat er sterke sedimentatiepatronen zichtbaar zijn aan de oostzijde van het Brakzand. Deze sedimentatie is in de curve van het deelgebied terug te zien als een verhoging van de bodem.



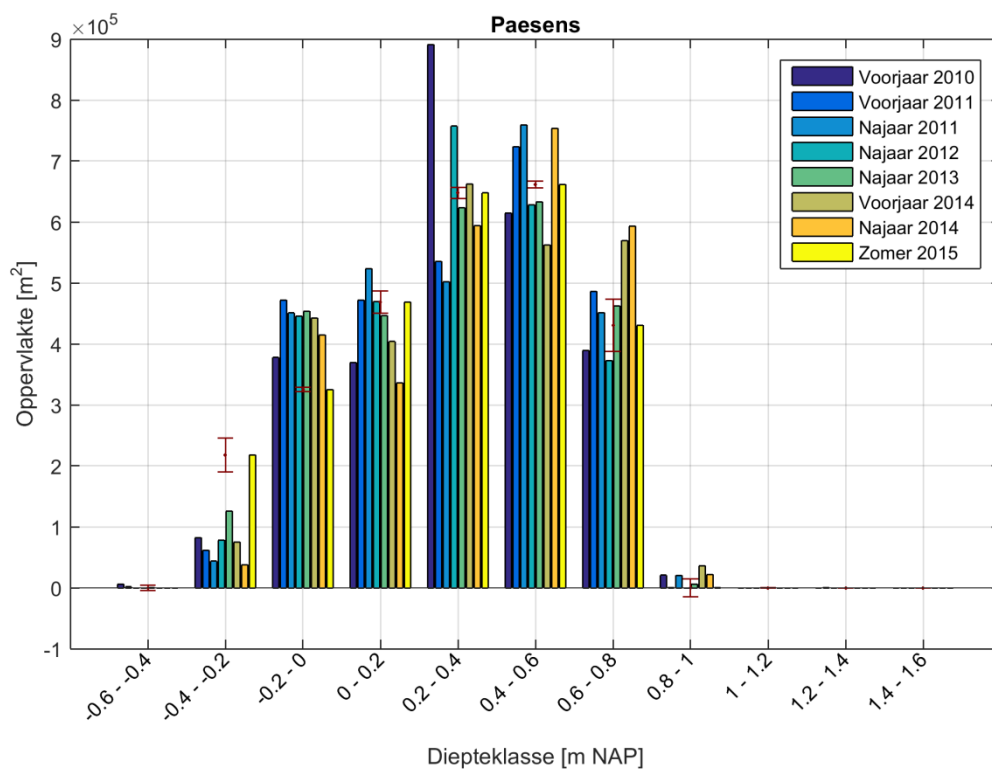
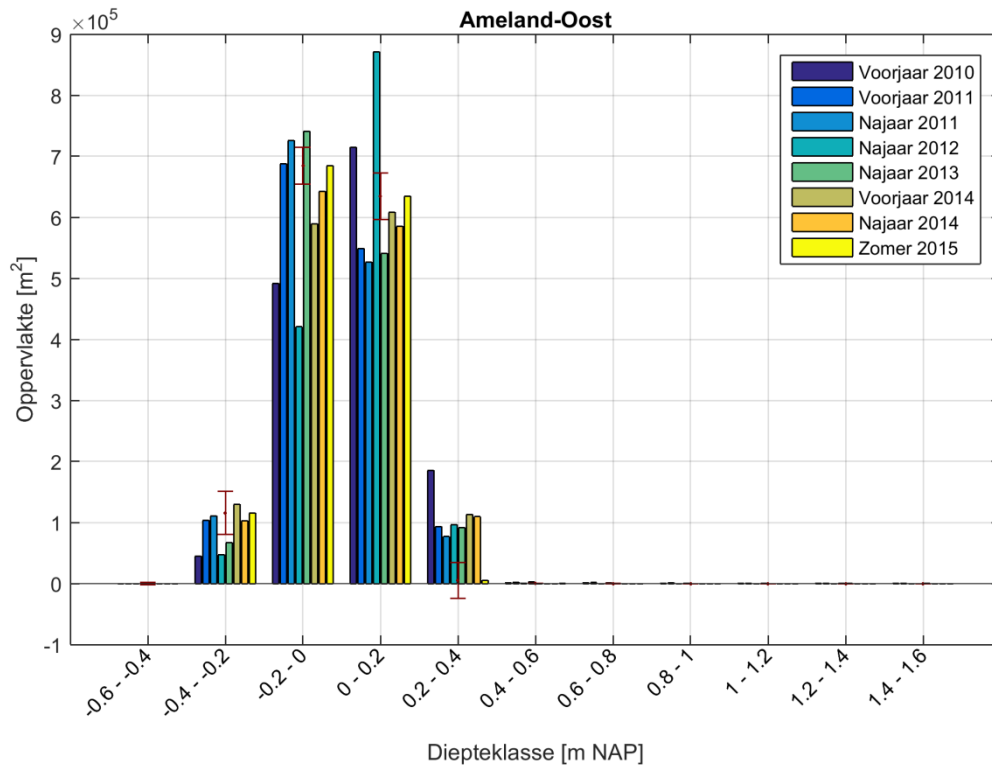
Figuur 5.5 Ligging van de vijf deelgebieden (rood) binnen de kombergingsgebieden van Pinkegat en Zoutkamperlaag (blauw).

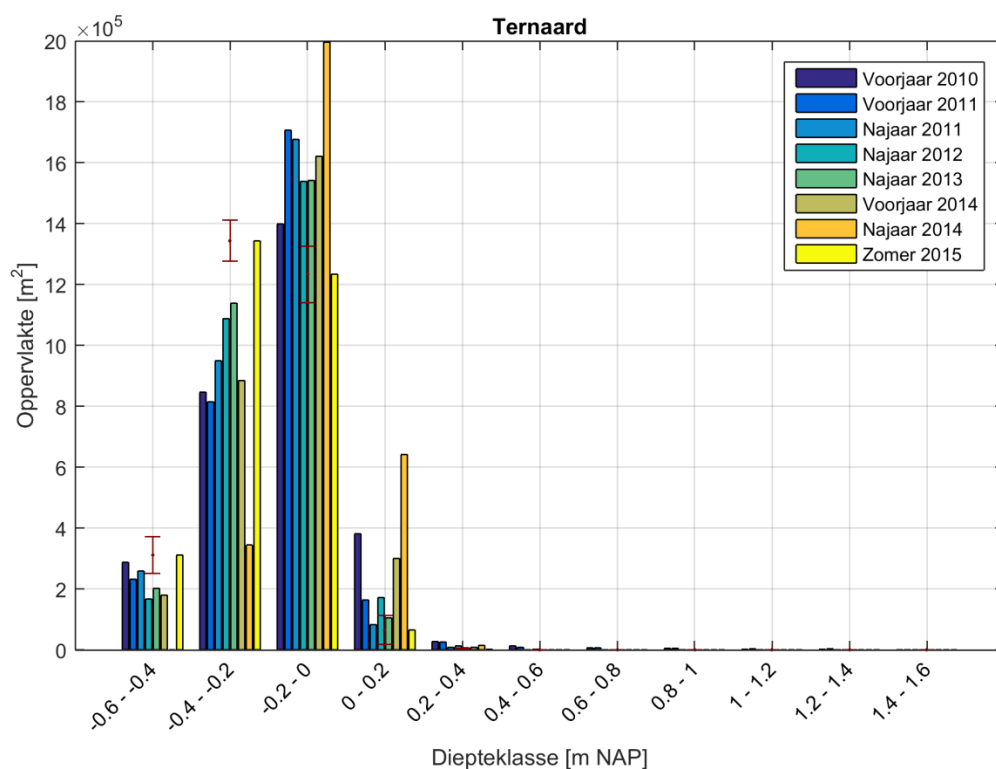
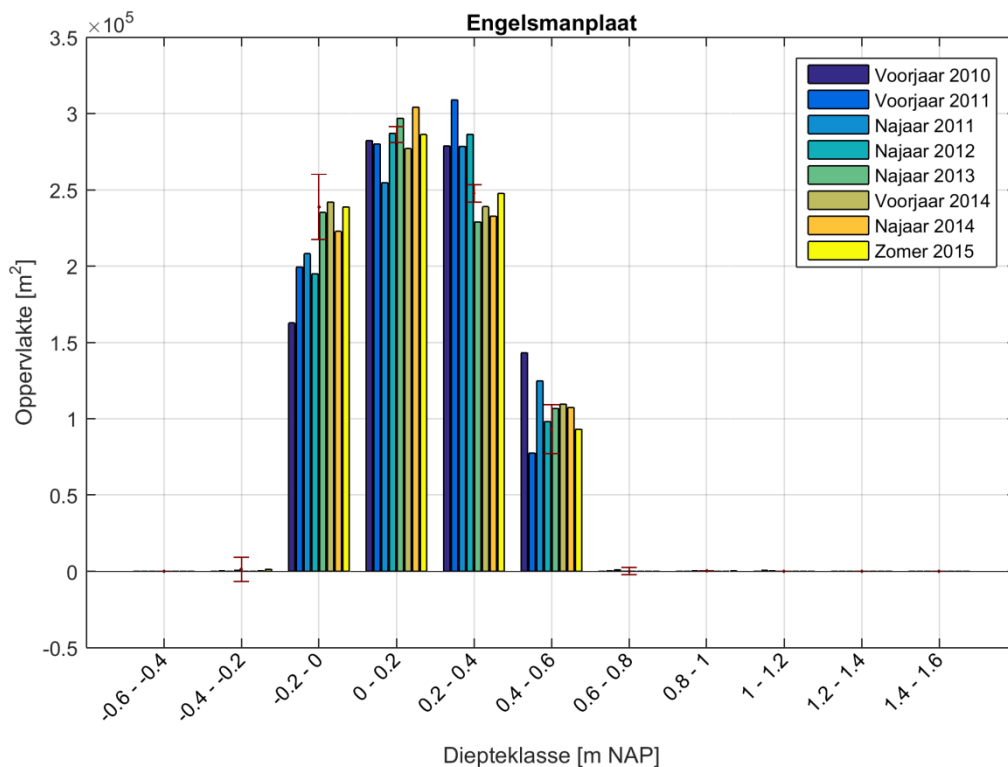


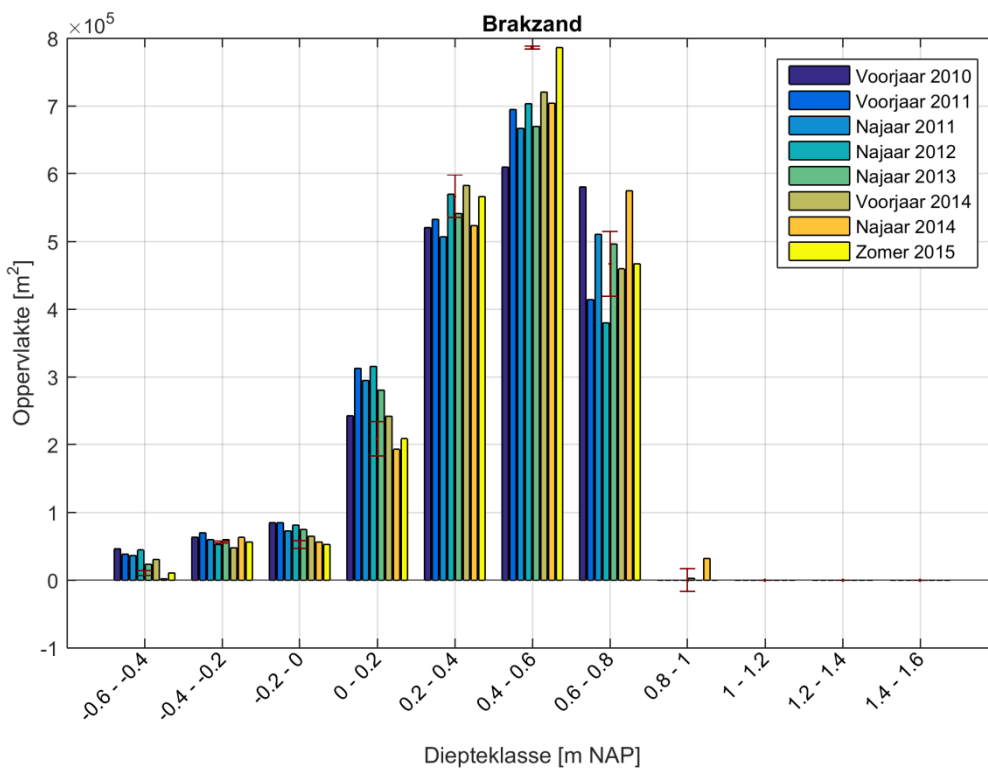




Figuur 5.6 Hypsometrische curves voor de vijf deelgebieden







Figuur 5.7 Histogrammen van de oppervlaktes per diepte klasse voor de vijf deelgebieden

6 Conclusies en aanbevelingen

6.1 Conclusies

De acht LiDAR opnames van het Friesche Zeegat die sinds 2010 zijn gemaakt zijn in deze rapportage vergeleken. Het doel is om trends te ontdekken in de verandering van de bodemhoogte die met de LiDAR opnamen is waargenomen en zo deze trends eventueel te kunnen koppelen aan de morfologische dynamiek en/of bodemdaling als gevolg van gaswinning.

Het overgrote deel van de bodemhoogteveranderingen die zijn waargenomen in de analyses zijn niet groter dan de meetfout. Dit betekent dat de kleine geobserveerde veranderingen daar nog niet gerelateerd kunnen worden aan morfologische veranderingen van de wadplaten. Er is op die locaties dus niet met zekerheid te zeggen of bodemdaling als gevolg van de gaswinning invloed heeft op de hoogteligging van de wadplaten. De bodemligging binnen het polygoon van het Pinkegat heeft echter een bodemligging die beduidend lager is dan tijdens vorige opnamen. De hypsometrische curve toont hier een afname van de bodemligging van ongeveer 5 cm ten opzichte van de curve voor het voorjaar van 2014 voor het areaal dat tussen de hoogteklassen -0,1 m en -0,3 m NAP ligt. Deze afname van de curve is ook duidelijk aanwezig voor het deelgebied Ternaard, dat binnen de polygoon van het Pinkegat ligt. Het is dus aannemelijk dat de afname van de bodemhoogte in het Pinkegat wordt veroorzaakt door dit gedeelte van het gebied. Omdat de veranderingen buiten de foutenmarge vallen moeten deze in principe toegekend worden aan een andere oorzaak. De nauwkeurigheid van de LiDAR kan wel een gedeelte van de geobserveerde verandering verklaren. Daarnaast kunnen de veranderingen het gevolg zijn van de morfologische dynamiek van de wadplaten mede onder invloed van bodemdaling als gevolg van gaswinning. De verandering is echter een orde groter dan de voorspelde bodemdaling als gevolg van gaswinning (enkele millimeters). De toename van de bodemhoogte binnen het deelpolygoon van het Brakzand valt eveneens buiten de foutenmarge. Deze toename van de bodemhoogte is toe te schrijven aan de sedimentatie die aan de oostkant van deze wadplaat optreedt.

De bodemhoogteveranderingen die optreden ter hoogte van Holwerd tussen de opnamen van voorjaar 2014, najaar 2014 en zomer 2015 zijn toe te schrijven aan bodemligging van de opname van het najaar van 2014, deze lijkt te hoog te zijn. Het inmeten van de waterspiegel op de locatie is waarschijnlijk de oorzaak van deze hoge bodemligging. Dit gedeelte van deze opname kan daardoor niet gebruikt worden ter vergelijking met de overige opnamen. Een klein gedeelte van de LiDAR survey van zomer 2015 is ook uitgevoerd tijdens een waterstand die hoger was dan -0.5 m NAP bij de meetstations Nes en Holwerd. Er zijn in de analyses echter geen opmerkelijke verschillen gevonden die er op duiden dat de waterspiegel hoger was dan -0.5 m NAP bij de wadplaten en dat de waterspiegel dus is ingemeten.

Om de hypsometrische curven van verschillende jaren beter te kunnen vergelijken is het benodigd dat de curve wordt gemaakt aan de hand van een geheel dekkende bodemkaart. Daarom is de verwerking van de 1x1 m ASCII data voor deze studie aangepast ten opzichte van de methode zoals deze is toegepast is in de voorgaande Deltares studies naar de wadplaathoogte (Vroom en Beekhuizen 2015; Arentz en Vroom 2014; Elias et al., 2013; Cronin en Wang 2012; Wang et al., 2010). Uitschieters van de data zijn verwijderd door alle punten met een bodemligging van meer dan 2 m NAP te verwijderen. Dit is gedaan omdat

deze punten anders effect hebben op de interpolatie van de bodemhoogtepunten. De gaten in de data die overblijven na vergridding naar een 10 m x 10 m rooster zijn opgevuld door middel van driehoeksinterpolatie. De interpolatie levert geheel dekkende bodemkaarten en de verschillen in dekking tussen de verschillende jaren is kleiner dan zonder de interpolatieslag. De interpolatie lijkt daardoor een goede methode om tot dekkende bodemkaarten te komen voor de hypsometrische curven. De hypsometrische curven van verschillende opnamen bieden zo een betere vergelijking voor de bodemligging van de opnamen dan wanneer de curven worden geproduceerd aan de hand van niet geheel dekkende bodemkaarten. Een verandering van de curve ten opzichte van een vorige opname is hierdoor beter te interpreteren.

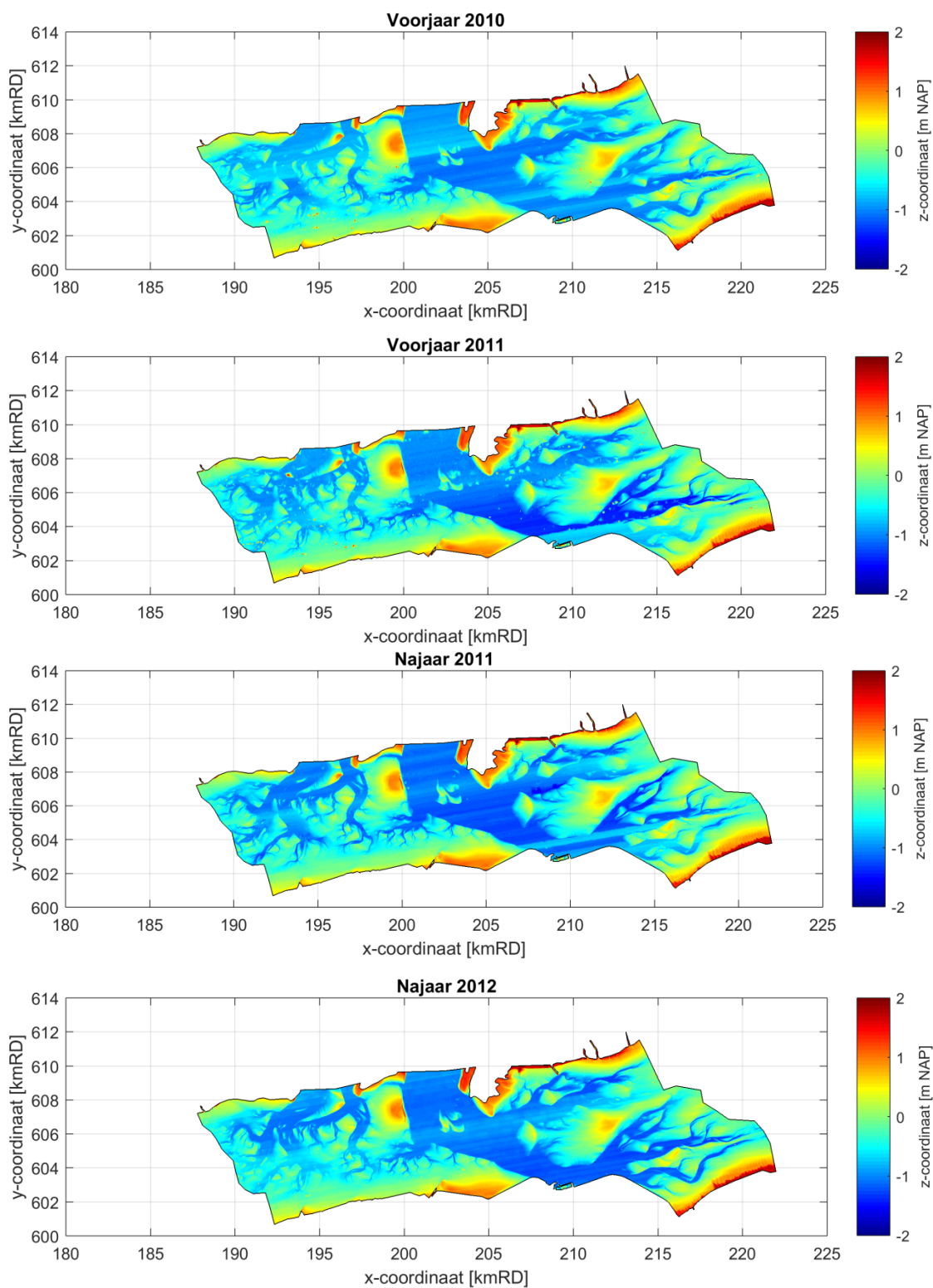
6.2 Aanbevelingen

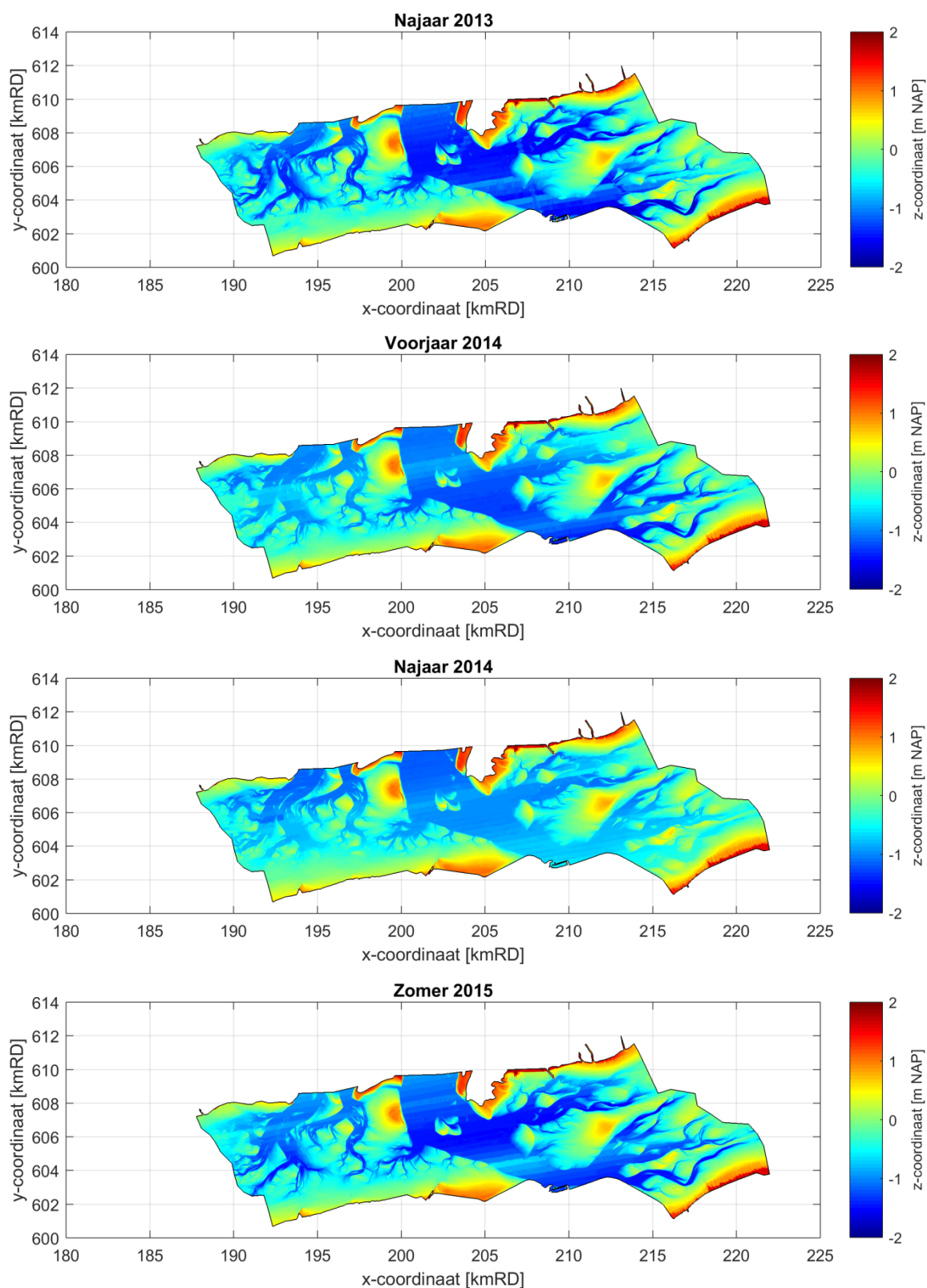
De 1x1 m ASCII data is gefilterd op uitschieters door alle bodemhoogtepunten met een hoogteligging van meer dan 2 m NAP te verwijderen. Tijdens de analyse is echter gebleken dat er ook uitschieters zijn die in de range van realistische waarden liggen (tussen -0.5 m en 2 m NAP). Deze uitschieters zijn lastiger om uit de data te filteren omdat er geen duidelijk verschil is met datapunten die wel juist zijn. Een verbetering van de filtering van de uitschieters kan worden verkregen wanneer tijdens de omzetting van LAS-punten naar 1x1 m ASCII de uitschieters worden verwijderd. In Fugro Geospatial B.V. (2015) is aangegeven dat een terreinfilteringmethode wordt toegepast op de LiDAR data. Hiermee wordt er een onderscheid gemaakt tussen oppervlaktepunten en niet-oppervlaktepunten (gebouwen en vegetatie). Deze filtering die uitgevoerd wordt door Fugro zou uitgebreid moeten worden door ook uitschieters in de data die wel binnen de realistische waarden vallen te beschouwen.

7 Referenties

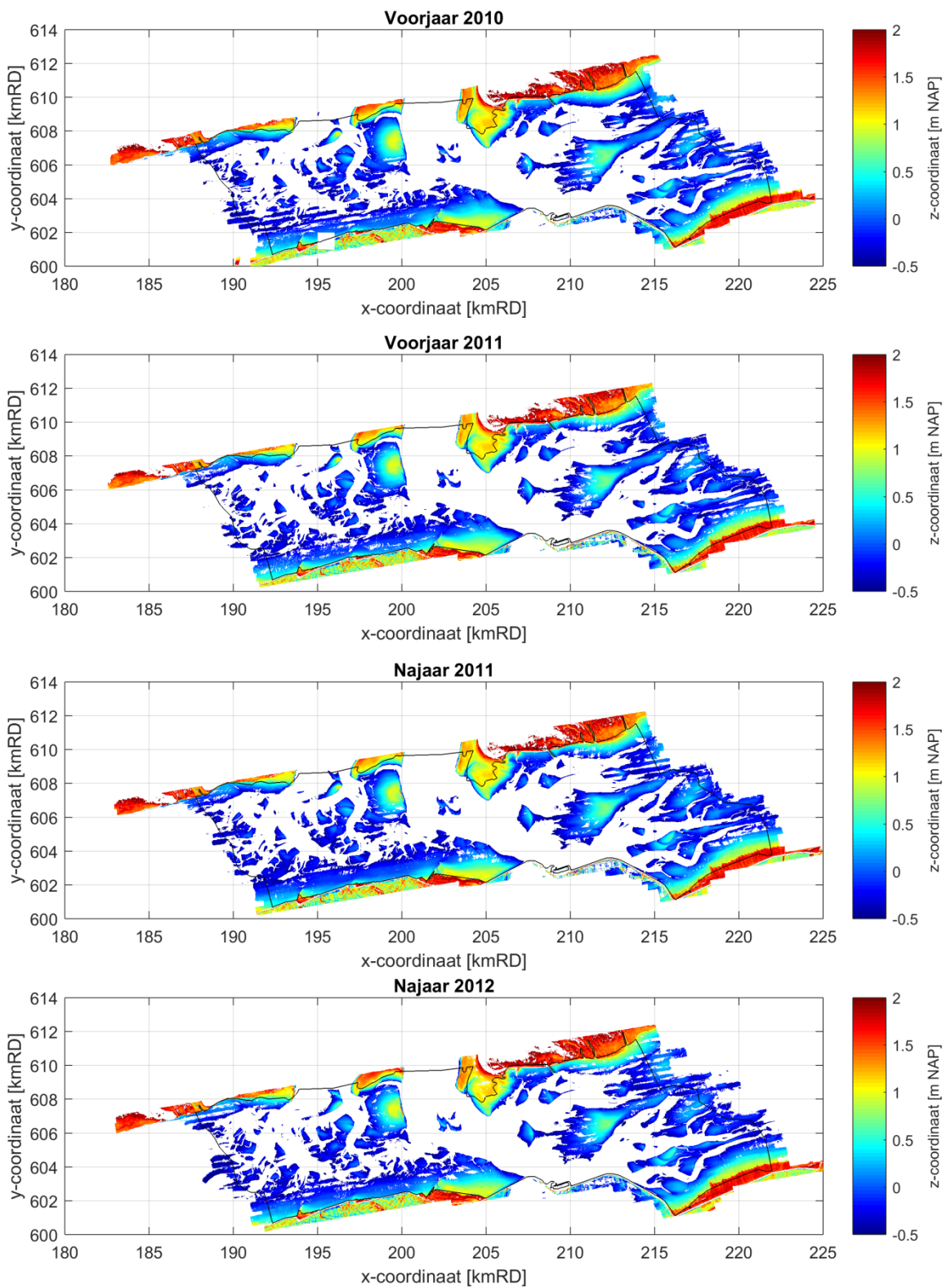
- Arentz, L. & Vroom, J., 2014. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2013): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1209136-000.
- Cronin, K. & Wang, Z.B., 2012. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1204654-000.
- Elias, E., Bing Wang, Z. & Cronin, K., 2013. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2012): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1206958-000.
- Fugro Geospatial B.V., 2015. Waddenzee LiDAR Survey July 2015. , (July).
- Fugro Geospatial B.V., 2014a. Waddenzee LiDAR Survey May 2014, Final report, version 1.
- Fugro Geospatial B.V., 2014b. Waddenzee LiDAR Survey September 2014, Final report, version 141121.
- Fugro Geospatial B.V., 2013. Waddenzee LiDAR Survey, Final report, version 1.
- Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., 2014. Gaswinning vanaf de locaties Moddergat , Lauwersoog en Vierhuizen. Resultaten uitvoering Meet- en regelcyclus 2014.
- Nederlandse Aardolie Maatschappij B.V., Meeting minutes LiDAR nauwkeurigheden, 1 april 2014.
- Vroom, J. & Beekhuizen, J., 2015. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat (2010-2014): Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1210543-000.
- Wang, Z.B., Cronin, K. & Ormondt, M., 2010. Analyse Lidar data voor Het Friesche Zeegat: Monitoring effect bodemdaling door gaswinning, Rapport 1202285-000.7-1

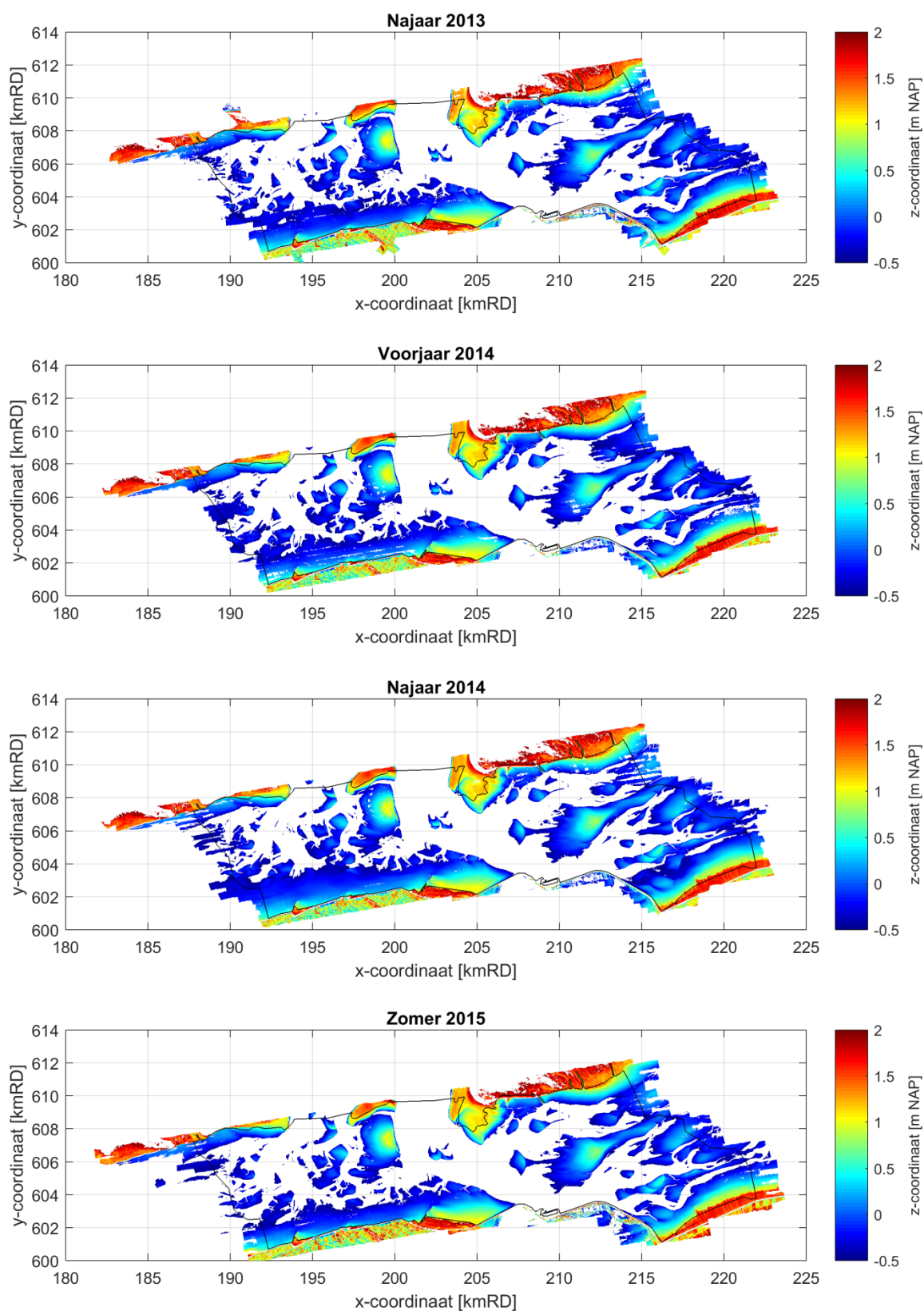
A Bodemkaarten



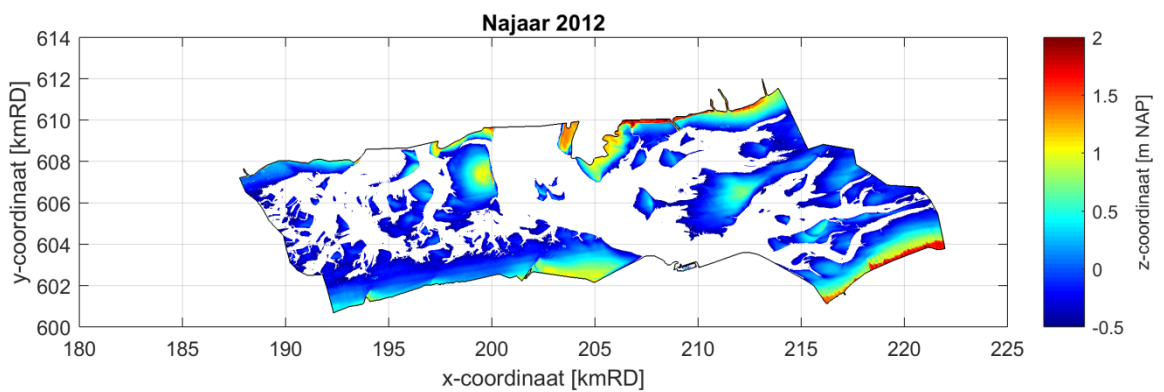
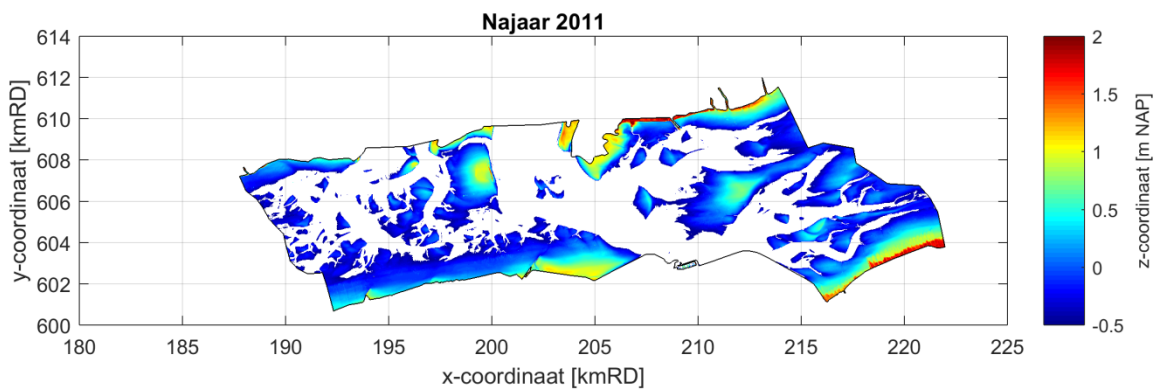
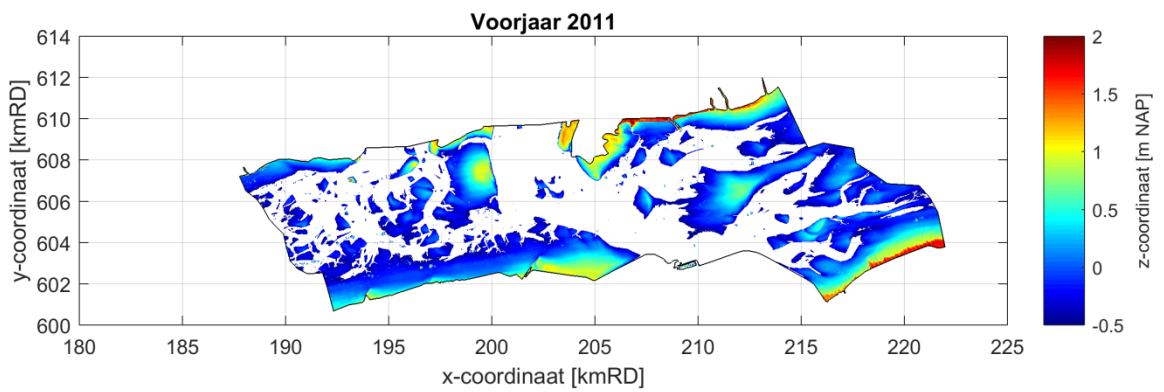
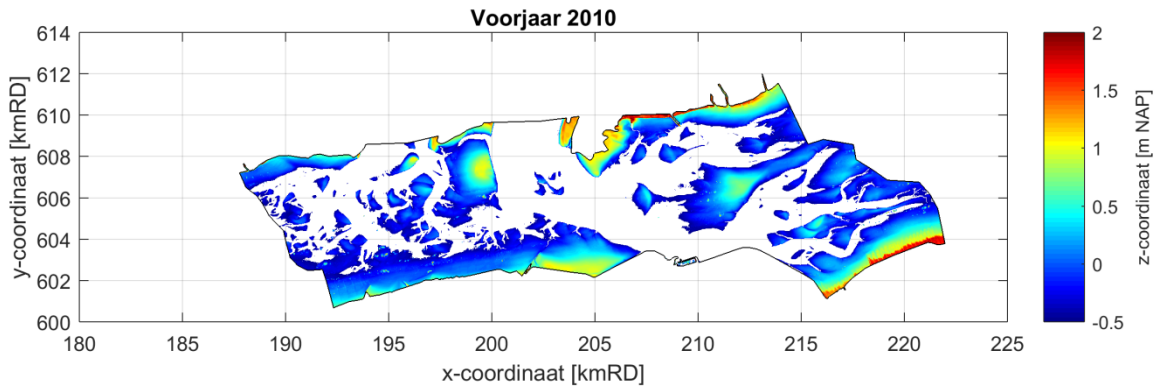


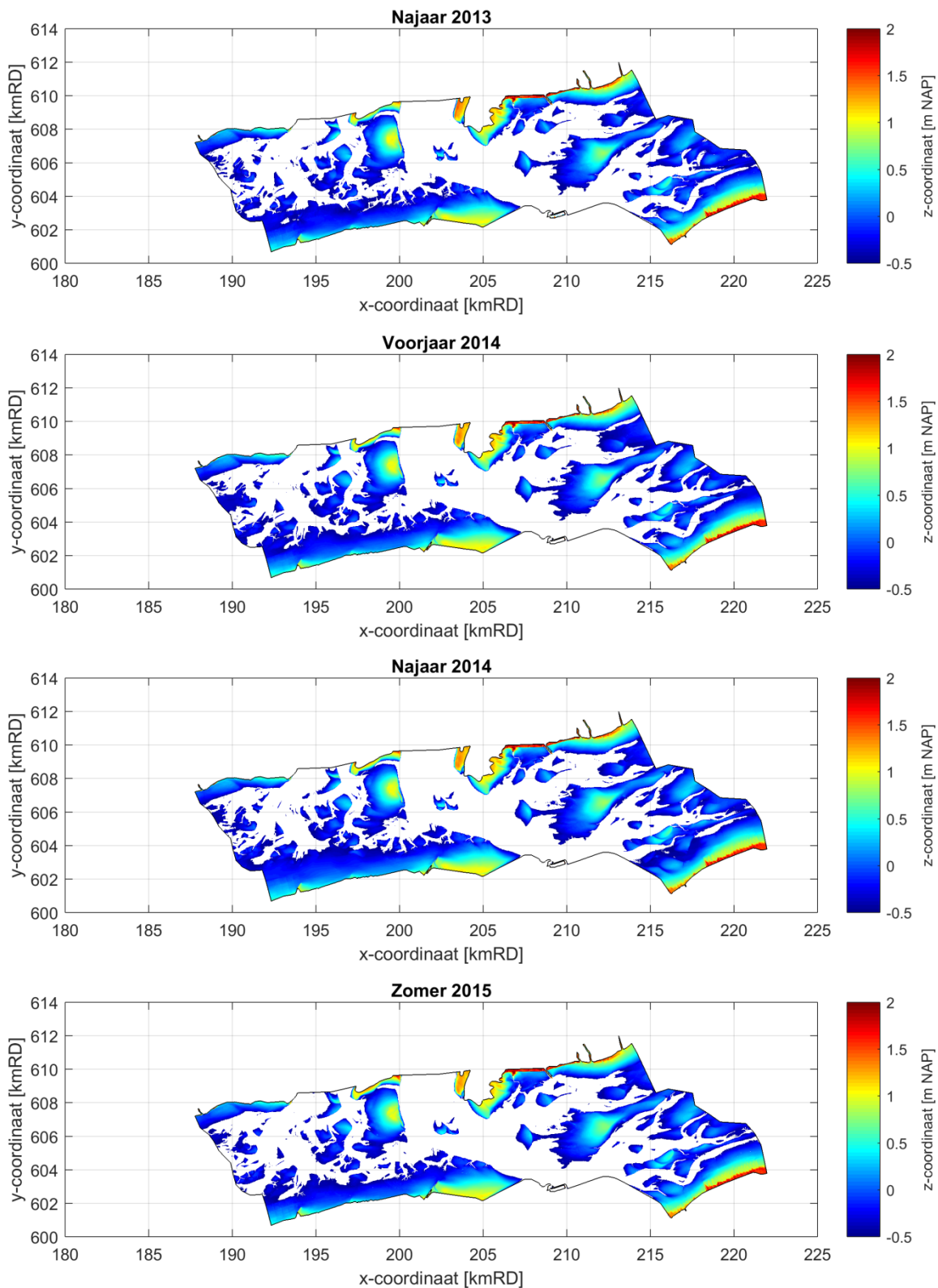
Figuur A.1 Visualisatie van alle LiDAR opnames (april 2010 t/m juli 2015) op een 10m x 10m waarbij alle datapunten met een hoogteligging van meer dan 2 m NAP zijn verwijderd en lege gridcellen zijn opgevuld door middel van driehoeksinterpolatie.





Figuur A.2 Visualisatie van alle LiDAR opnames (april 2010 t/m juli 2015) zonder waterspiegel op een 10m x 10m grid waarbij alle datapunten met een hoogteligging van meer dan 2 m NAP zijn verwijderd.





Figuur A.3 Visualisatie van alle LiDAR opnames (april 2010 t/m juli 2015) zonder waterspiegel op een 10m x 10m waarbij alle datapunten met een hoogteligging van meer dan 2 m NAP zijn verwijderd en lege gridcellen zijn opgevuld door middel van driehoeksinterpolatie.