

## MEMO Analyse van de a.d.h.v. LiDAR gemeten verandering in wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag

Versie 2; 30-3-2017, aanvulling op versie 1 (30-12-2016) met meer profielen en vergelijk controlegrids.

### 1.1 Inhoud

MEMO Analyse van de a.d.h.v. LiDAR gemeten verandering in wadplaathoogte in Pinkegat en Zoutkamperlaag .....	1
1.1 Inhoud .....	1
1.2 Inleiding en probleemstelling .....	2
1.3 Meettechnieken.....	2
1.3.1 Lidar.....	2
1.3.2 GPS meting.....	3
1.3.3 Wadplaat gridmeting (sedimentgrids).....	4
1.3.4 Spijkermetingen .....	5
1.4 Resultaten metingen.....	6
1.4.1 Lidar.....	6
1.4.2 GPS campagne metingen .....	7
1.4.3 Wadplaat gridmetingen .....	8
1.4.4 Spijkermetingen .....	10
1.5 Vergelijk van verschillende meetresultaten .....	11
1.5.1 Vergelijk Lidar met sediment grids .....	11
1.5.2 Vergelijk Lidar opnames in profielen .....	16
1.5.3 Vergelijk spijkermetingen met sedimentgrid meting .....	23
1.5.4 Vergelijk Sediment grid met GPS .....	24
1.5.5 Vergelijk Controlegrids met Lidar data .....	28
Conclusies .....	34
1.6 Referenties.....	35

## 1.2 Inleiding en probleemstelling

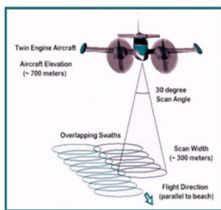
De auditcommissie voor de m.e.r. adviseert jaarlijks aan de minister van Economische Zaken over de resultaten van de monitoring die plaatsvindt ter controle op de mogelijke effecten van de gaswinning onder de Waddenzee. In haar advies van oktober 2016 legt de auditcommissie nadruk op de resultaten uit de met LiDAR bepaalde hoogtemetingen voor het Pinkegat en de Zoutkamperlaag. Ze concludeert dat een deel van het wad in 2015 lager lijkt te liggen dan in 2014 en sluit niet uit dat het hier een meetfout betreft. Het Ministerie van Economische zaken heeft de NAM gevraagd dit nader te analyseren.

Met als doel de ontwikkeling van het wadoppervlak zo goed mogelijk te volgen en te begrijpen, voert NAM een aantal verschillende metingen uit. Daarnaast wordt de diepe bodemdaling die als gevolg van de gaswinning onder een deel van de Waddenzee plaatsvindt bepaald op sets van stalen palen. Deze palen zijn meters diep in de ondergrond verankerd en dalen dus mee met de diepe bodemdaling die lokaal enkele millimeters per jaar kan bedragen. Omdat het allerlei verschillende metingen betreft, te weten Lidar metingen, GPS metingen van de diepe bodemdaling, gridmetingen op de wadplaat (sedimentgrids) en spijkermetingen, gaat deze memo eerst in op deze meettechnieken. Vervolgens worden de resultaten van de afzonderlijke technieken gepresenteerd, en met elkaar vergeleken.

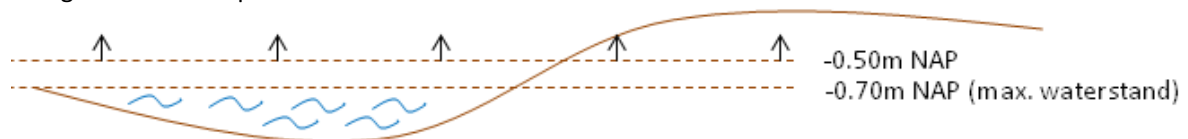
## 1.3 Meettechnieken

### 1.3.1 Lidar

Laseraltimetrie of LIDAR staat voor Laser Imaging Detection and Ranging en is een technologie die de afstand tot een bepaald object of oppervlak bepaalt door middel van het gebruik van laserpulsen (vergelijkbaar met radar, dat echter radiogolven gebruikt in plaats van licht). Voor hoogtemetingen wordt veelal vanuit een vliegtuig of helikopter gemeten. Met deze techniek zijn opnames gemaakt van de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag. Tevens gebruikt Rijkswaterstaat deze techniek naast lodingen om eens in de 6 jaren de hoogte van de gehele Waddenzee te bepalen.



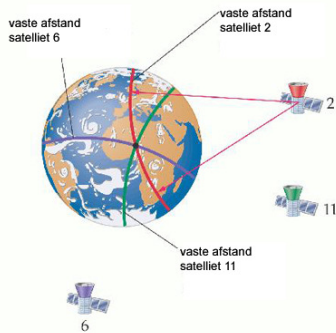
Aangezien de topografische laserpuls niet door water penetreert, zal ook het wateroppervlak reflecteren (voor zover er geen speculaire reflectie optreedt, ofwel daar waar geen reflectie naar de ontvanger optreedt in die delen van de scan, die een scherpe hoek maken met het water) en als meetpunt meegenomen worden. Opnames dienen dan ook zoveel mogelijk tijdens laagwater plaats te vinden. Voor de NAM opnames van de betreffende kombergingen is als eis gesteld, dat de maximale waterhoogte niet meer dan -0.70m NAP mag bedragen. Door tijdens de analyse een grens te stellen aan de minimale gemeten hoogte van -0.50m NAP zal de overblijvende data altijd het droogvallend wad representeren.



De Lidar data van 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 en 2015 (voorjaar) (Referentie 1) is door Deltares geanalyseerd en gerapporteerd.

### 1.3.2 GPS meting

GPS is een techniek voor 3D positiebepaling, welke in principe overal op aarde en onder alle weersomstandigheden werkt. GPS-toepassingen die de allerhoogst haalbare precisie vereisen, zijn gebaseerd op relatieve metingen. Relatief wil hier zeggen dat simultaan met minimaal twee ontvangers naar dezelfde satellieten wordt gemeten. De precisie (standaardafwijking) van deze metingen ligt op mm-niveau.



Onderscheid wordt gemaakt tussen campagne GPS en permanente GPS.

Campagne GPS betekent, dat er tijdelijk wordt opgesteld op een bekend peilmerk en daarvan de positie in X,Y,Z wordt bepaald. Voor de meting in de Waddenzee wordt

per GPS opstelling 5 dagen continue gemeten. De data wordt tezamen met data van omliggende GPS referentiestations verwerkt, zodat een plaatsbepaling met een nauwkeurigheid van 1-2 mm plaatsvindt.

In de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag bevinden zich 34 clusters van 3 peilmerken. Deze peilmerken zijn middels een paal van ong. 6 meter lengte verzekerd in de wadbodem. Aangezien een cluster uit 3 peilmerken bestaat is het mogelijk om controlemetingen/analyses uit te voeren op mogelijke instabiliteit van de peilmerken. Hierdoor kon worden geconstateerd dat in 2006 nieuw geplaatste peilmerken onderhevig waren aan initiële zetting.



In het Lauwersmeer bevinden zich 8 peilmerken. Deze bestaan uit palen van ongeveer 1.50m lang. Hier wordt geen gebruik gemaakt van clusters.

Bij permanente GPS is een GPS antenne vast opgesteld, waarbij continue de x,y,z, posities worden geregistreerd. Voor NAM zijn permanente GPS stations opgesteld op Ameland (NAM locatie), Moddergat en Anjum (NAM locatie). Metingen worden permanent uitgevoerd en opgeslagen (interval van 15 sec.). De data wordt verwerkt tezamen met bekende stabiele GPS referentiestations. Jaarlijks worden ook de exacte posities van deze referentiestations gecontroleerd en zondig gecorrigeerd. Zowel de registratie van de data als processing wordt uitgevoerd door externe partijen. Maandelijks worden de resultaten naar SodM gestuurd en zijn deze beschikbaar op [www.nlog.nl/](http://www.nlog.nl/) (zie deze [link](#) en Referentie 2). Meer detail wordt beschreven in de jaarlijkse rapportage door 06GPS (zie dezelfde link en Referentie 3)



### 1.3.3 Wadplaat gridmeting (sedimentgrids)

Sinds 2010 worden nabij de GPS clusters terrestrische maaiveldmetingen uitgevoerd. Hierbij is een grid uitgezet van 9x5 punten of 7x5 punten, welke op een onderlinge afstand van 5m liggen.



De horizontale positie wordt met GPS bepaald, terwijl de maaiveldhoogte middels waterpassing wordt verkregen. Hiervoor wordt de hoogte van de GPS punten als referentie gebruikt om te komen tot een NAP hoogte van de gridpunten op het maaiveld (wadplaat). Daar waar de bodem zacht is (slib) wordt de meetbaak voor waterpassing voorzien van een brede voet, zodat deze niet kan wegzakken in het zand van de wadplaat.

Tot nu toe zijn er in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag voor 34 grids minimaal 2 meting uitgevoerd. Zie ook histogram. Ook in de kombergingen Lauwers en Eems-Dollard zijn een 6-tal grids gemeten.

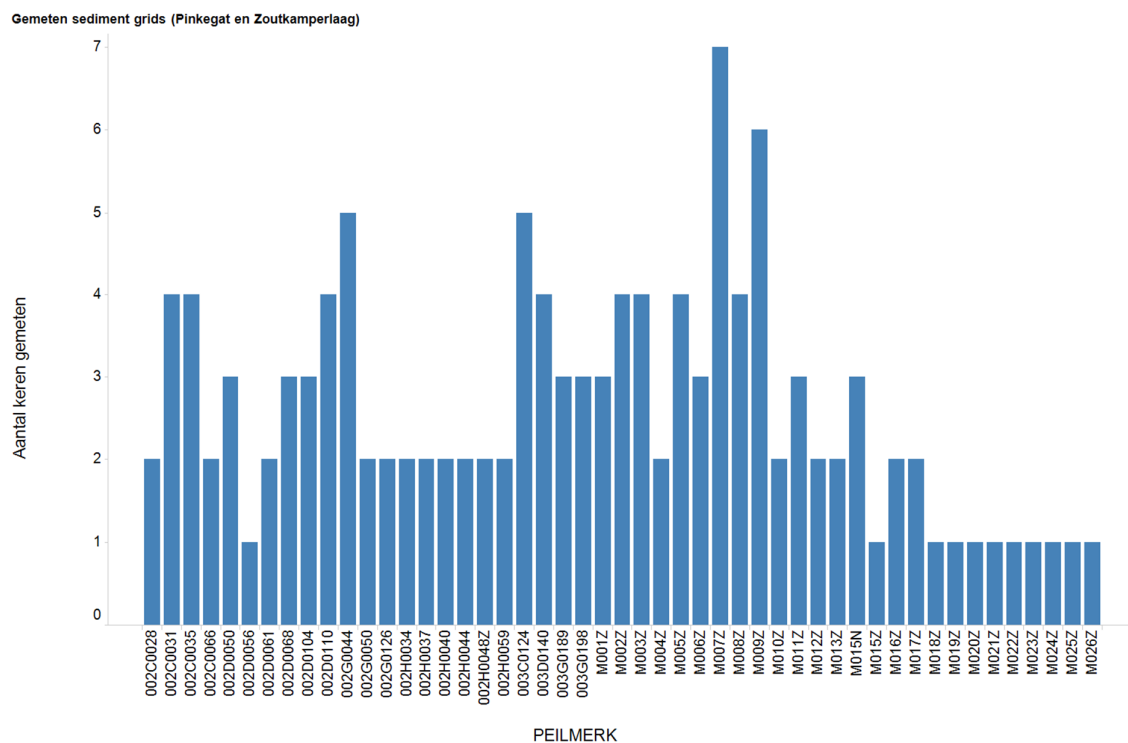


Fig. 1.3-a Overzicht van aantal keren dat sedimentgrids gemeten zijn (per GPS cluster)

De nauwkeurigheid van de waterpassing voor deze relatief korte afstanden is  $\sim 1\text{mm}$ . Afhankelijk van de gesteldheid van de bodem, zal de absolute nauwkeurigheid per meetpunt  $< 1\text{cm}$  bedragen.

### 1.3.4 Spijkermetingen

Bij spijkermetingen wordt een draadje in het sediment verankerd met een grote schroefbout die tot een diepte van circa 60 cm in het sediment wordt gedraaid. Sedimentatie



en erosie worden bepaald ten opzichte van dit in de diepte verankerde punt, door de lengte van het touwtje boven het sediment te meten.

Spijkermetingen geven inzicht in de lokale sedimentatie/erosie en de gegevens kunnen worden gekoppeld aan hoogte- en bodemdalingmetingen.

De metingen worden gemiddeld 6x per jaar uitgevoerd door het NCA (Natuur Centrum Ameland) en jaarlijks gerapporteerd (Referentie 4).



## 1.4 Resultaten metingen

### 1.4.1 Lidar

Lidar metingen zijn uitgevoerd in najaar 2010, voor- en najaar 2011, najaar 2012, najaar 2013 voor- en najaar 2014, voor- en najaar 2015 en voor- en najaar 2016. De analyse van de Lidar data en de onderlinge vergelijking wordt jaarlijks uitgevoerd door Deltares. Voor de vergelijking met de wadplaat gridmetingen is de 1x1m Lidar grid data gebruikt. Aangezien de wadplaat gridmetingen elk jaar in mei/juni plaatsvinden (gelijk met de GPS campagnemetingen) is alleen de, in het voorjaar opgenomen Lidar data beschouwd.

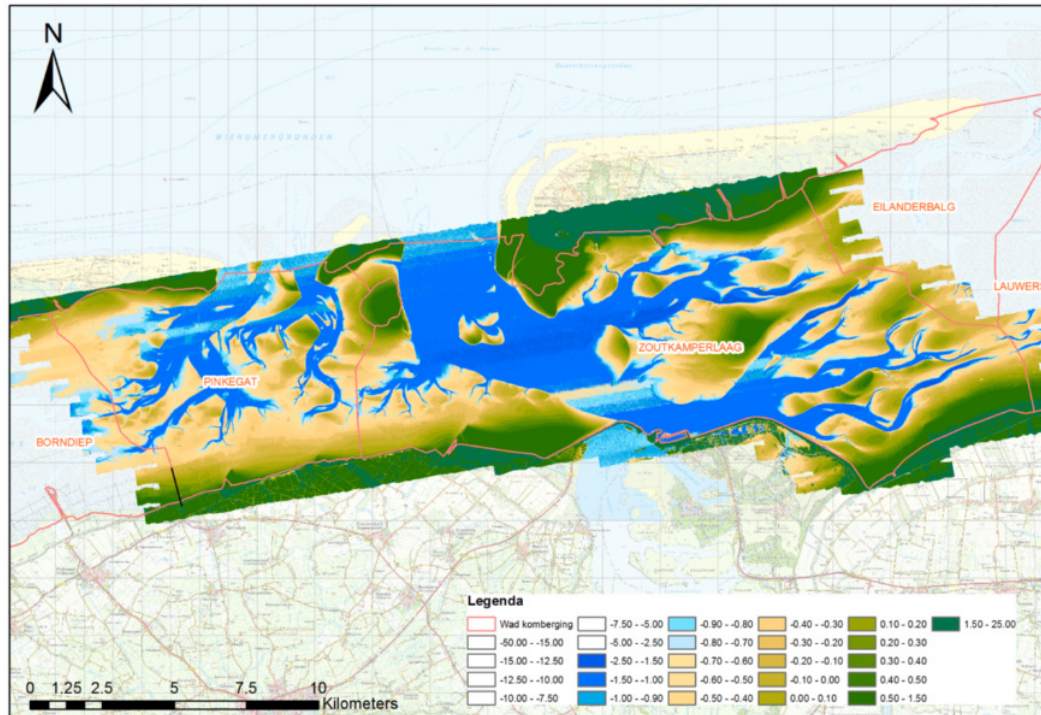


Fig. 1.4-a Voorbeeld van Lidar resultaat (juni 2015)

### 1.4.2 GPS campagne metingen

Resultaten van de GPS campagnemetingen worden in onderstaande kaart getoond in millimeters voor de periode 2010-2015. Voor het jaar 2010 is gekozen, omdat dit ook het eerste jaar was waarin een Lidar opname is genomen en gestart is met de sedimentgrid metingen. Voor het jaar 2016 bleek maar 1 GPS cluster gemeten te zijn in zowel 2010 en 2016. Daarom is gekozen voor het eindjaar 2015 om in ieder geval meer resultaten verdeeld over de kombergingen te kunnen laten zien.

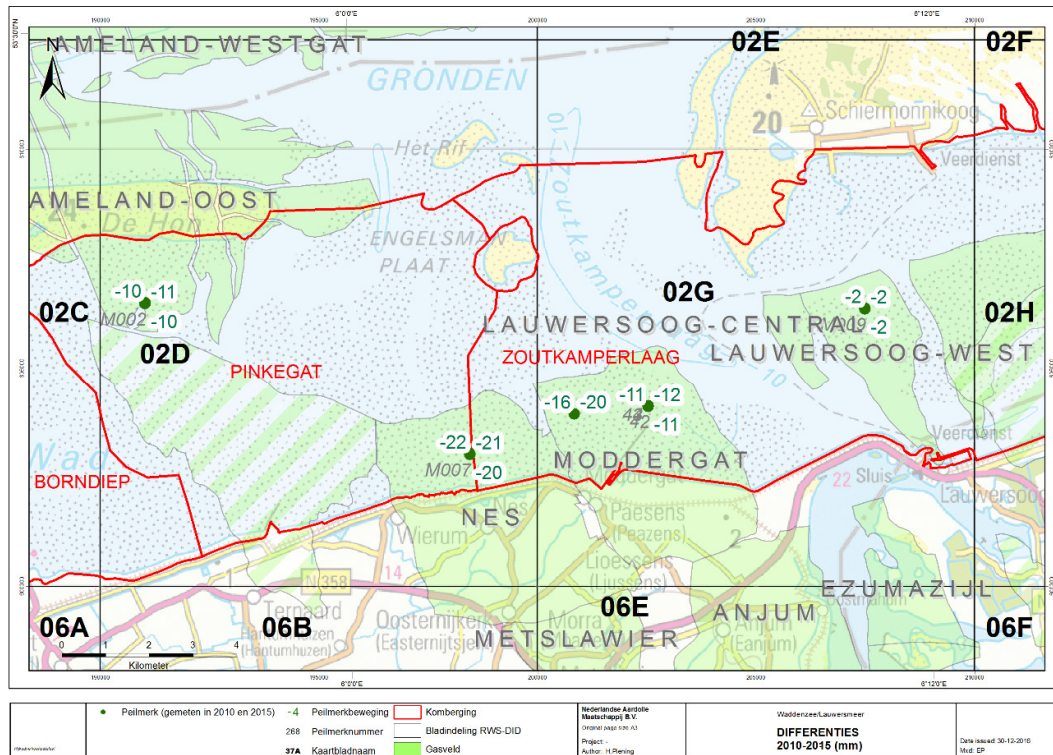


Fig. 1.4-b Kaart met dalingscijfers per GPS cluster voor de periode 2010-2015, voor die peilmerkclusters die gemeten zijn in zowel 2010 en 2015 (daling in mm).

### 1.4.3 Wadplaat gridmetingen

Bij de wadplaat gridmetingen (sedimentgrids) worden telkens dezelfde 35 gridpunten gemeten. Aangezien de wadplaat niet geheel vlak is, kunnen verschillen in hoogte en hoogteverandering in de tijd tussen de gridpunten onderling optreden. Dit is goed te zien in onderstaande boxplots van 2 sedimentgrids nabij resp. peilmerkclusters M007 en 002G0044.

Overzichtsk kaart



Box Plot Sedimentgrid (per survey)

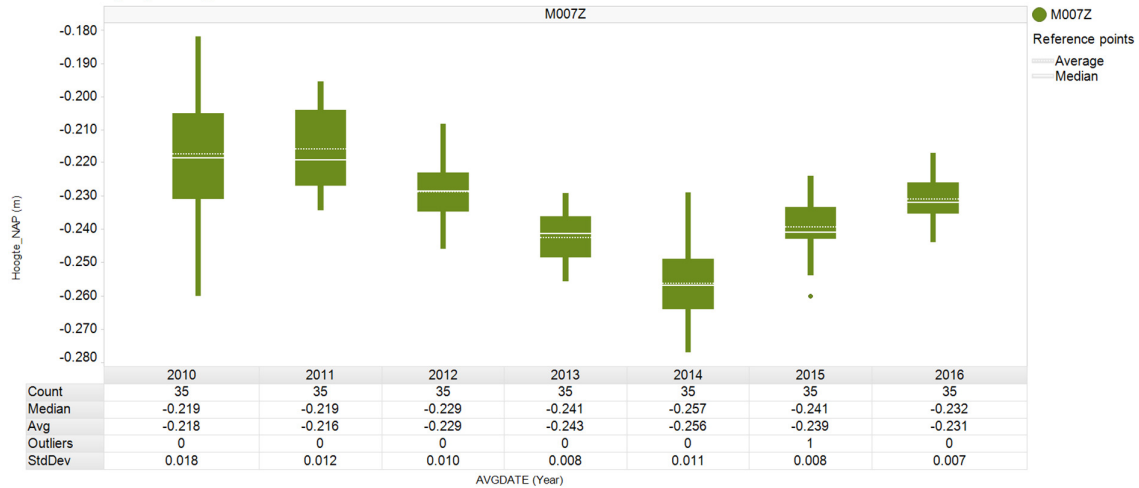
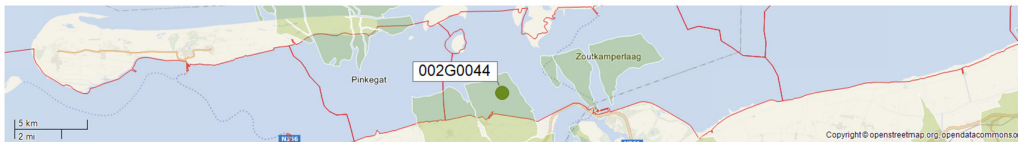


Fig. 1.4-c Boxplots van sedimentgrid nabij peilmerkcluster M007 per jaar van meting. Hiermee wordt de spreiding van de gemeten hoogtes van de verschillende gridpunten weergegeven. De horizontale (witte) streeplijn geeft de gemiddelde waarde weer, terwijl de horizontale (witte) lijn de mediaan weergeeft. De y-as geeft de NAP hoogte in meters.

Overzichtsk kaart



Box Plot Sedimentgrid (per survey)

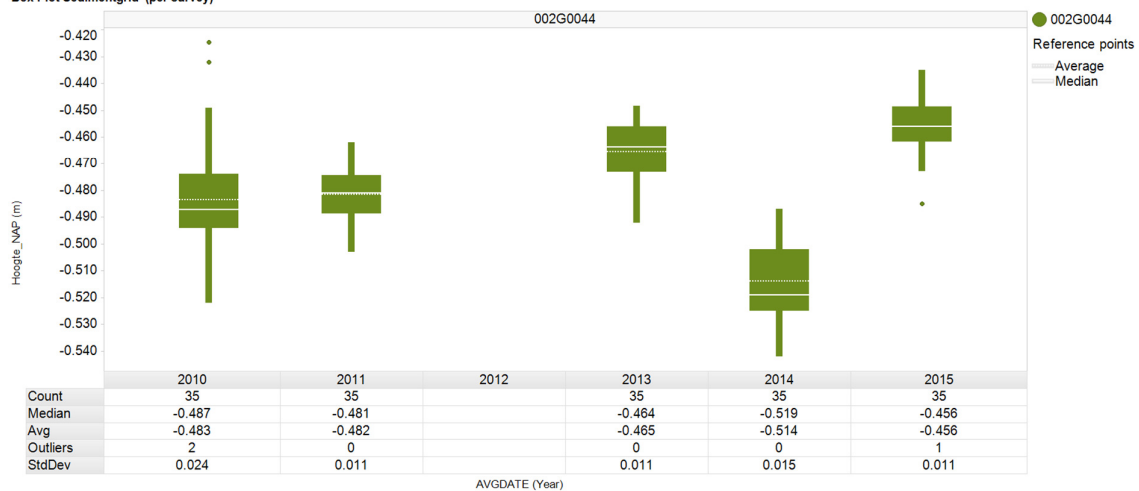


Fig. 1.4-d Boxplots van sedimentgrid nabij peilmerkcluster 002G0044 per jaar van meting. Hiermee wordt de spreiding van de gemeten hoogtes van de verschillende gridpunten weergegeven. De horizontale (witte) streeplijn geeft de gemiddelde waarde weer, terwijl de horizontale (witte) lijn de mediaan weergeeft. De y-as geeft de NAP hoogte in meters.



Vergelijk van de wadplaat gridmetingen tussen verschillende meetcampagnes wordt weergegeven in onderstaande correlatie grafieken (2014 versus 2015 en 2015 versus 2016). Indien er geen hoogteverandering van de gridpunten heeft plaatsgevonden, vallen deze punten op de diagonaallijn  $y=x$ . Voor de punten welke hier niet op vallen kan gesteld worden dat de hoogte hiervan tussen de 2 metingen gewijzigd is. Verder wordt parallel aan weerszijden van de diagonaal een stippellijn aangegeven met een waarde resp.  $y=x+5$  (cm) en  $y=x-5$  (cm), waarbij de afwijking tussen beide metingen dus  $\pm 5$ cm is.

**Correlatie Sediment grids 2014 vs. 2015**

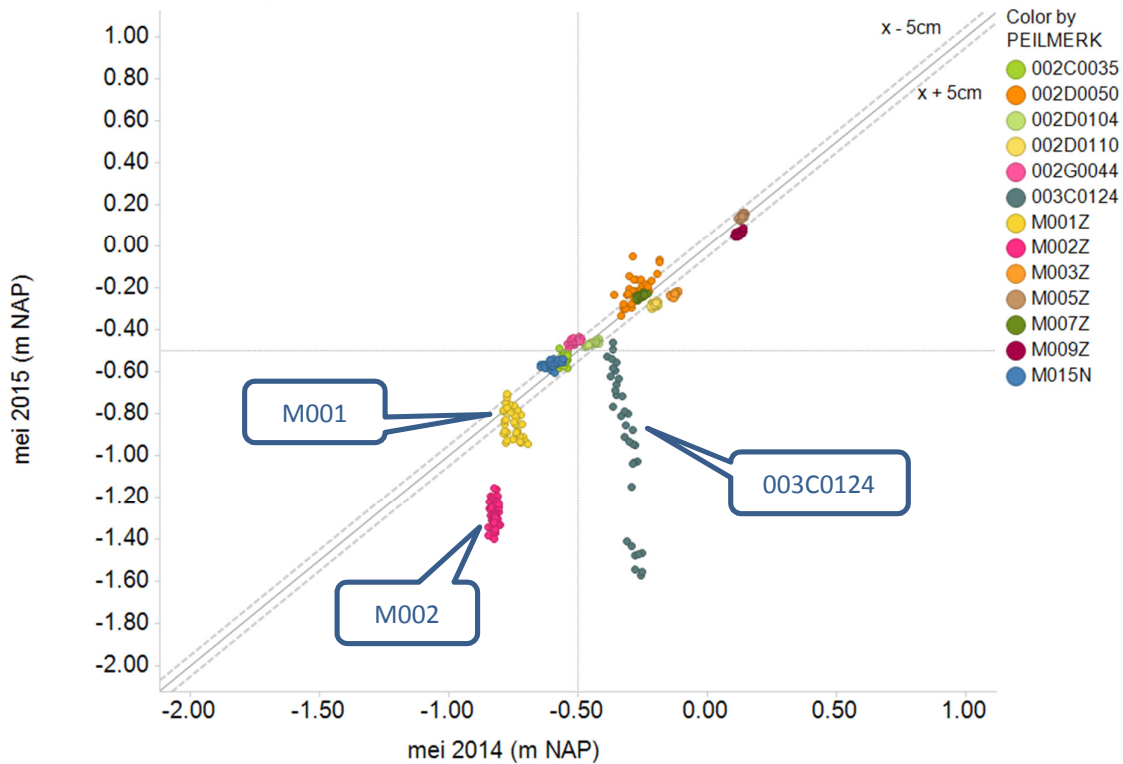


Fig. 1.4-e Correlatie tussen sedimentgrids gemeten in 2014 en in 2015. Deze grafiek geeft de spreiding weer van de gridpunthoogtes per epoche en tussen 2 epoches (2014 en 2015). Extreme verschillen, zoals 003C0124, zijn veelal het gevolg van de ligging van het grid aan de rand van een geul.



## 1.5 Vergelijk van verschillende meetresultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten van de verschillende meettechnieken met elkaar vergeleken.

### 1.5.1 Vergelijk Lidar met sediment grids

Onderstaande grafiek geeft een vergelijking van de Lidar resultaten op de locatie van de gridpunten, zoals deze nabij de GPS clusters gemeten zijn met de hoogte van deze gridpunten. Indien de hoogte gelijk is, zal deze op de diagonaal  $y=x$  liggen. Indien de punten boven deze diagonaal liggen, betekent dat, dat de Lidar meting hoger uitvalt dan de gridpunt meting (en vice versa, dus beneden de diagonaal: Lidar lager dan gridpuntmeting). Verder wordt parallel aan weerszijden van de diagonaal een stippelijijn aangegeven met een waarde resp.  $y=x+5$  (cm) en  $y=x-5$  (cm), waarbij de afwijking tussen beide metingen dus  $\pm 5$ cm is. Grote afwijkingen zijn te zien bij hoogtes lager dan -50cm NAP. Deze dienen buiten beschouwing gelaten te worden, aangezien dit mogelijk te maken heeft met de waterstand ten tijde van de Lidar opnames.

2014

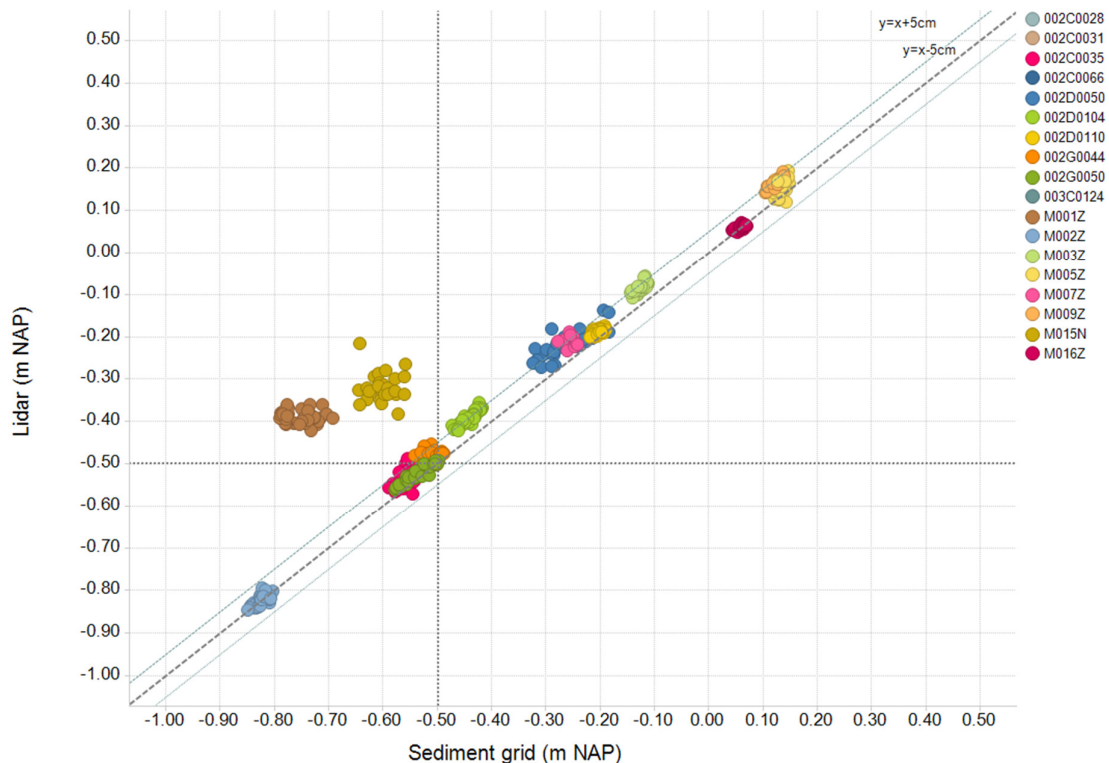


Fig. 1.5.1-a Vergelijk sedimentgrid meting met Lidar voor 2014. Voor punten op de streeplijn over de diagonaal  $y=x$  geldt, dat Lidar en sedimentgrid meting overeenkomen. X-as geeft NAP hoogte in meters van de sedimentgridmeting en Y-as de NAP-hoogte in meters van Lidar. Verticale- en horizontale streeplijn geeft de -50cm NAP grens aan. Lidar data beneden deze grens is niet betrouwbaar, gezien de waterhoogte ten tijde van de meting. De Lidar data lijkt systematisch iets hoger te liggen, gemiddeld 3cm ( $\pm 2$ cm) (zie Fig. 1.5.1-d).

2015

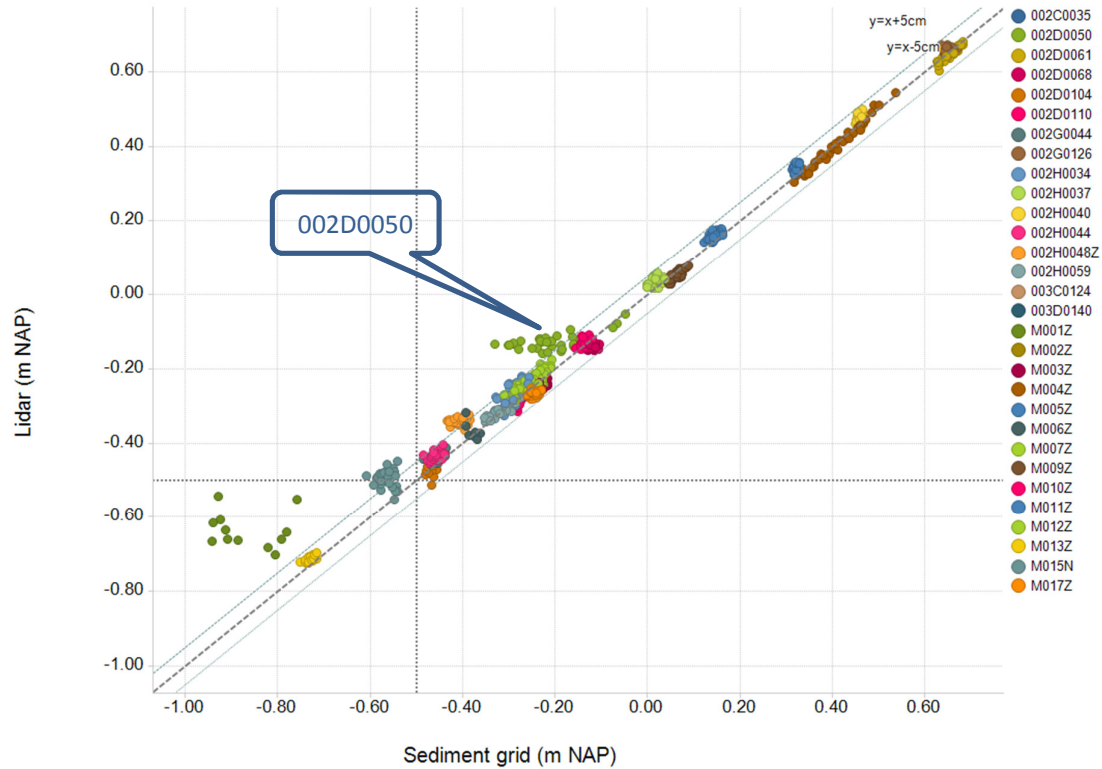


Fig. 1.5.1-b Vergelijk sedimentgrid meting met Lidar voor 2015. Voor punten op de streeplijn over de diagonaal  $y=x$  geldt, dat Lidar en sedimentgrid meting overeenkomen. X-as geeft NAP hoogte in meters van de sedimentgridmeting en Y-as de NAP-hoogte in meters van Lidar. Verticale- en horizontale streeplijn geeft de -50cm NAP grens aan. Lidar data beneden deze grens is niet betrouwbaar, gezien de waterhoogte ten tijde van de meting. Een relatief grote afwijking is te zien voor de gridpunten nabij 002D0050 (groen). Hier is mogelijk sprake van waterpoeltjes op de oneffen wadplaat (zie ook foto hieronder). Lidar geeft de hoogte van het water, terwijl de gridmeting de bodem van de poeltjes meet.



2016

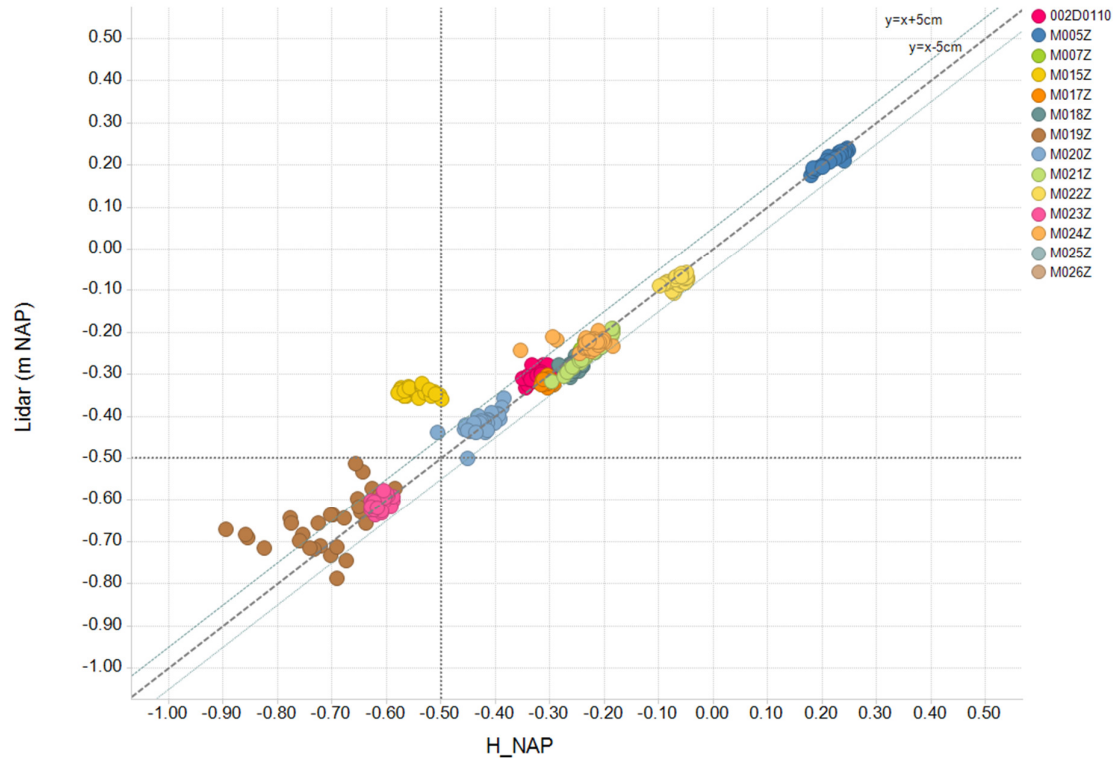
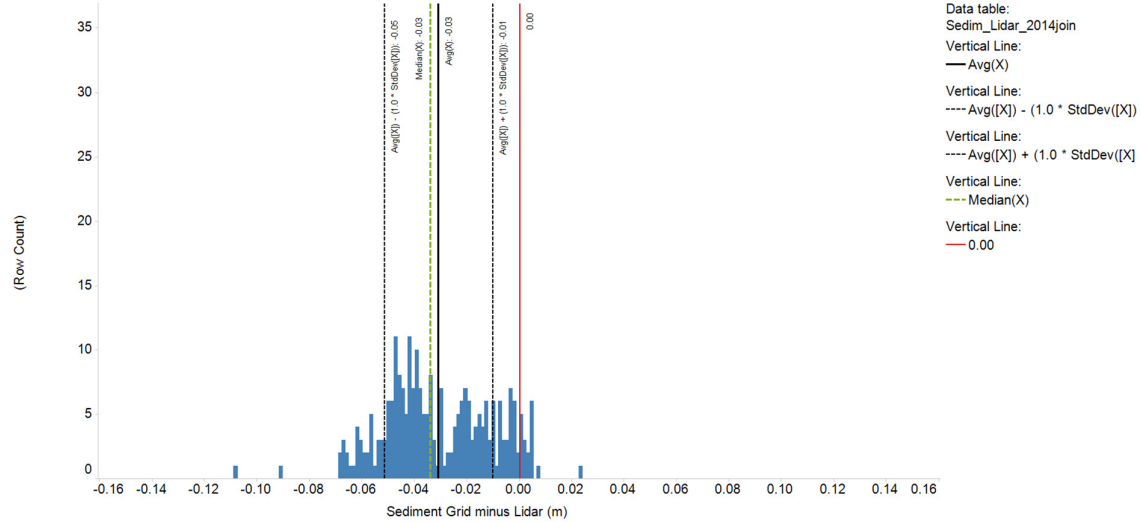


Fig. 1.5.1-c Vergelijk sedimentgrid meting met Lidar voor 2016. Voor punten op de streeplijn over de diagonaal  $y=x$  geldt, dat Lidar en sedimentgrid meting overeenkomen. X-as geeft NAP hoogte in meters van de sedimentgridmeting en Y-as de NAP-hoogte in meters van Lidar. Verticale- en horizontale streeplijn geeft de -50cm NAP grens aan. Lidar data beneden deze grens is niet betrouwbaar, gezien de waterhoogte ten tijde van de meting.

Onderstaand histogrammen geven de verdeling van de verschillen tussen Lidar en gridpunt metingen weer. Hierbij is alleen de data beschouwd, waar de hoogte boven -50cm NAP ligt voor zowel Lidar als gridmeting. De x-as geeft de verschilwaarde in meters weer. De y-as het aantal metingen bij een verschilwaarde van de x-as. Daarbij wordt het gemiddelde van de verschillen als een zwarte vertical lijn weergegeven. De groen gestreepte lijn is de mediaan. De rode lijn geeft de verschilwaarde 0.00m. Verder zijn als een gestreepte zwarte lijn weergegeven het gemiddelde  $\pm 1\sigma$  de standaard afwijking ( $1\sigma$ ). Verschil in hoogte tussen de verschillende histogrammen heeft te maken met het aantal gridpunten welke voor betreffend jaar vergeleken kunnen worden (2014: 254; 2015:731; 2016:299)

2014

Histogram met verdeling verschillen Sediment Grid minus Lidar (2014)



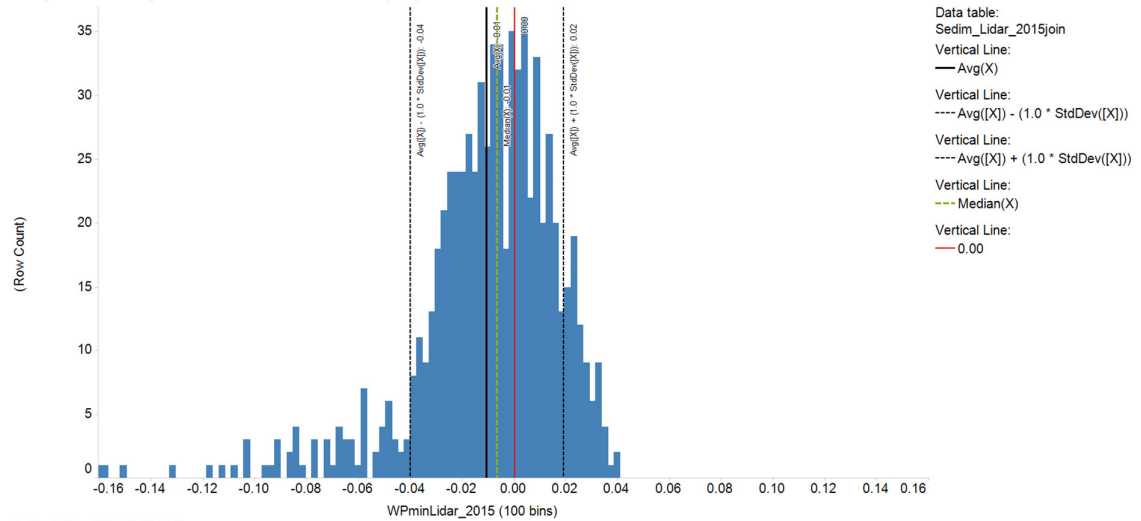
Sedim\_Lidar\_2014join Statistics

Column	Count	Min	Max	Avg	Median	StdDev
H_NAP	254	-0.50	0.15	-0.12	-0.13	0.21
RASTERVALU	254	-0.50	0.19	-0.09	-0.09	0.20
WPminLidar_2014	254	-0.11	0.02	-0.03	-0.03	0.02

Fig. 1.5.1-d Histogram met verschil tussen sediment gridpunten en bijbehorende Lidar hoogte (gridpunt hoogte minus Lidar hoogte) voor 2014. Alleen data gebruikt, welke boven -50cm NAP ligt voor zowel Lidar als sedimentgrid. Negatief verschil betekent, dat de Lidar waarde hoger ligt dan de gridpunt meting. Voor 2014 ligt het gemiddelde en mediaan van de verschillen op -3cm (met standaard afwijking van 2cm). Lidar resultaat ligt dus bijna uitsluitend hoger dan de gridpunt meting.

2015

Histogram met verdeling verschillen Sediment Grid minus Lidar (2015)



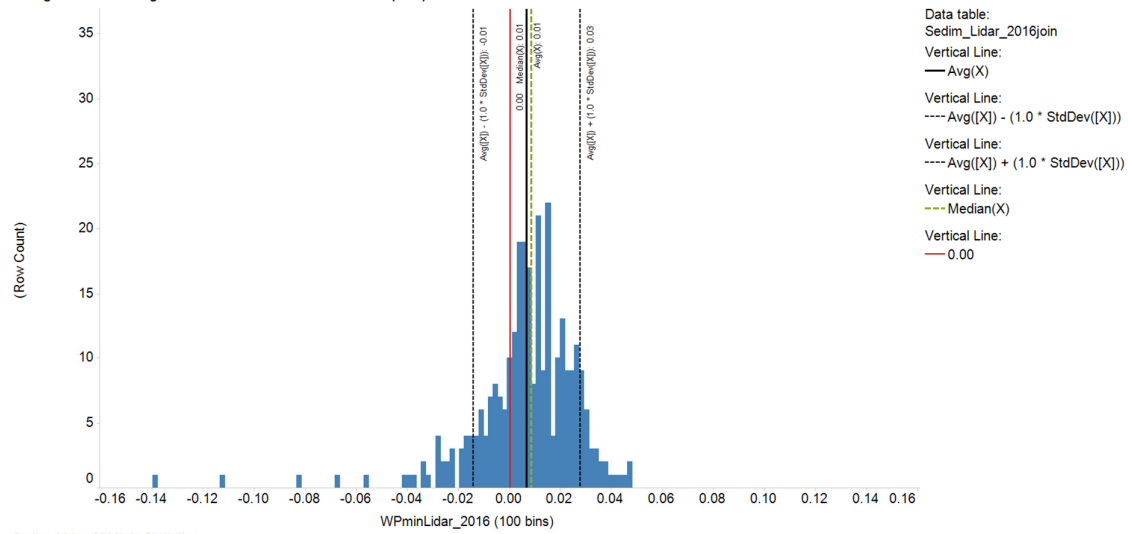
Sedim\_Lidar\_2015join Statistics

Column	Count	Min	Max	Avg	Median	StdDev
H_NAP	731	-0.49	0.68	-0.04	-0.21	0.34
RASTERVALU	731	-0.49	0.68	-0.03	-0.15	0.34
WPminLidar_2015	731	-0.20	0.04	-0.01	-0.01	0.03

Fig. 1.5.1-e Histogram met verschil tussen sediment gridpunten en bijbehorende Lidar hoogte (gridpunt hoogte minus Lidar hoogte) voor 2015. Alleen data gebruikt, welke boven -50cm NAP ligt voor zowel Lidar als sedimentgrid. Negatief verschil betekent, dat de Lidar waarde hoger ligt dan de gridpunt meting. Voor 2015 ligt het gemiddelde en mediaan van de verschillen op -1cm (met standaard afwijking van 3cm. Redelijk normaal verdeeld rond nul).

2016

Histogram met verdeling verschillen Sediment Grid minus Lidar (2016)



Sedim\_Lidar\_2016join Statistics

Column	Count	Min	Max	Avg	Median	StdDev
H_NAP	299	-0.50	0.25	-0.20	-0.24	0.18
RASTERVALU	299	-0.50	0.24	-0.21	-0.25	0.18
WPminLidar_2016	299	-0.14	0.05	0.01	0.01	0.02

Fig. 1.5.1-f Histogram met verschil tussen sediment gridpunten en bijbehorende Lidar hoogte (gridpunt hoogte minus Lidar hoogte) voor 2016. Alleen data gebruikt, welke boven -50cm NAP ligt voor zowel Lidar als sedimentgrid. Negatief verschil betekent, dat de Lidar waarde hoger ligt dan de gridpunt meting. Voor 2016 ligt het gemiddelde en mediaan van de verschillen op +1cm (met standaard afwijking van 2cm).

### 1.5.2 Vergelijk Lidar opnames in profielen

In onderstaande figuren worden de verschillende Lidar opnames getoond over een profiellijn. Het 1<sup>e</sup> profiel is gemaakt van de 1x1m Lidar griddata over een lijn van west naar oost, in het zuidwestelijke deel van Pinkegat en Zoutkamperlaag. Hiervoor is gekozen, omdat hier een relatief groot verschil geconstateerd werd tussen de Lidar opnames van 2014 en 2015. Het 2<sup>e</sup> profiel is hier haaks op gekozen om vooral over de dijk te zien wat voor verschillen er optreden tussen de opnames, die dus onafhankelijk zijn van mogelijke erosie of sedimentatie van de wadplaat.

#### 1.5.2.1 Profiel 1 West-oost in zuidwestelijk deel.

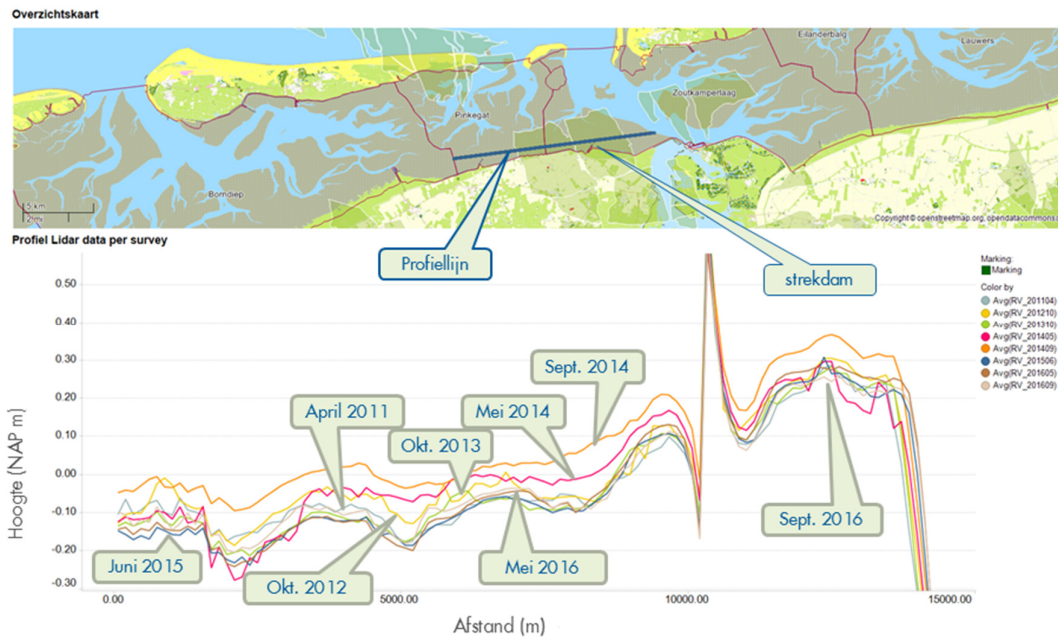


Fig. 1.5.2-a In deze figuur is te zien dat de Lidar data van de opname van september 2014 duidelijk hoger ligt dan de andere opnames. Ook de opname van mei 2014 ligt in veel gevallen hoger dan andere jaren.



De piek bij de strekdam is in onderstaande figuur uitvergroet.

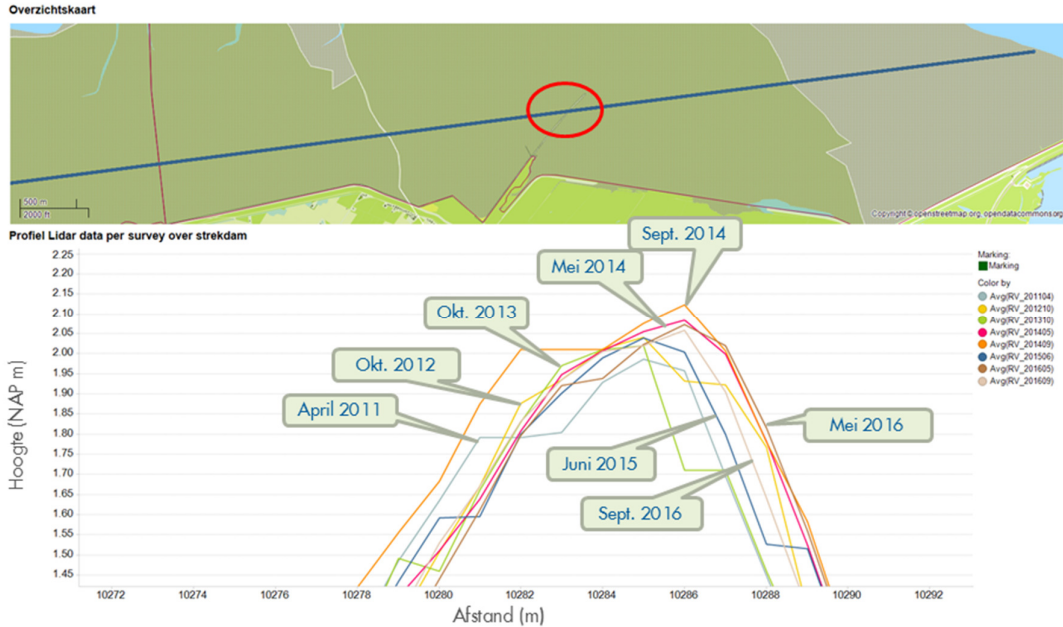


Fig. 1.5.2-b Profiel over strekdam. Ook in deze figuur is te zien dat de 2014 lidar opname data relatief hoger ligt dan opnames van andere jaren. Het is wel goed om te realiseren, dat het hier om een grid van 1x1m gaat en dat er mogelijk ook in horizontale positie een klein verschil kan optreden.

### 1.5.2.2 Profiel 2 Noord-zuid over dijk in Friesland.

Onderstaand profiel is bepaald in noord-zuid richting waarbij het profiel is onderverdeeld in 3 stukken, te weten noordelijk deel over de wadplaat, de dijk en zuidelijk deel over land.

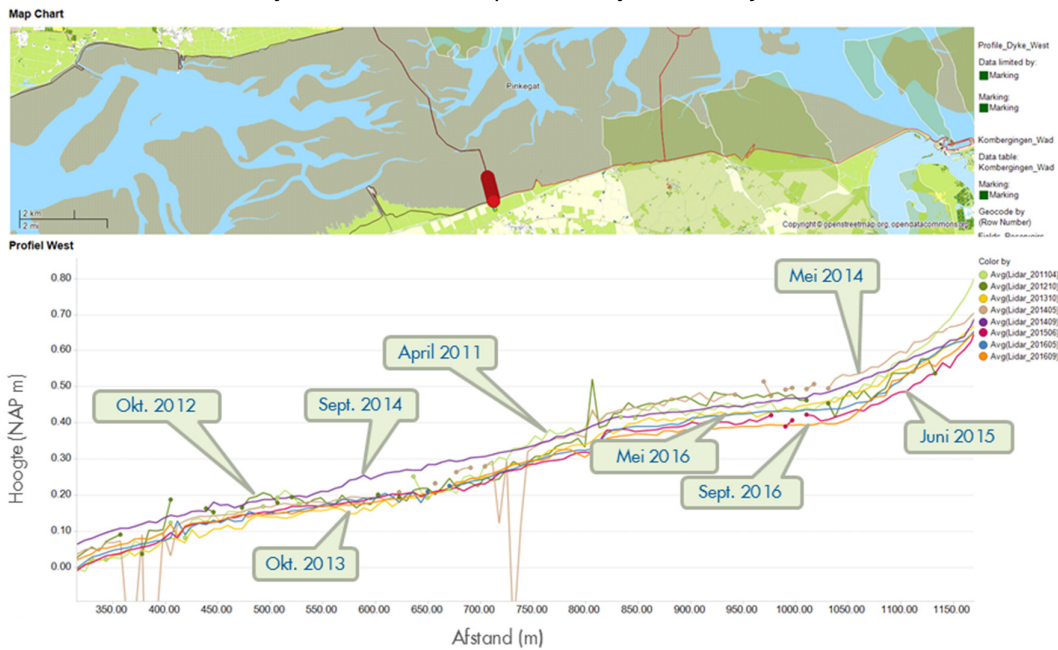


Fig. 1.5.2-c Profiel noord-zuid over wadplaat (y-as in meters t.o.v. NAP).

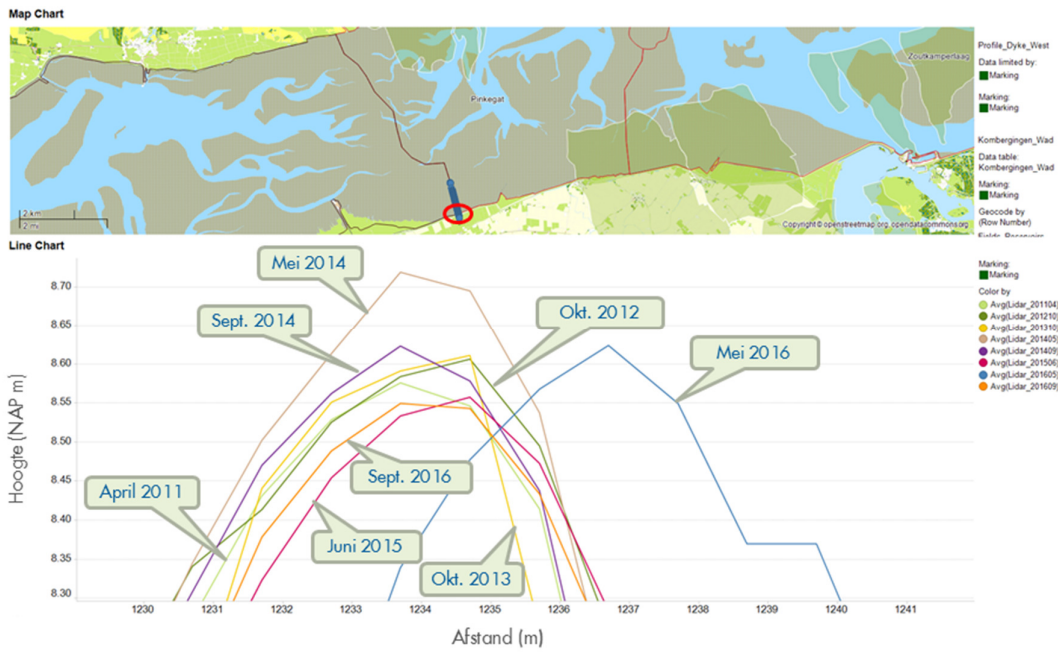


Fig. 1.5.2-d Profiel noord-zuid over de dijk (y-as in meters t.o.v. NAP). In de dataset van mei 2016 (blauwe lijn) zit een verschuiving in horizontale (XY) positie en wel in noord-zuid richting.

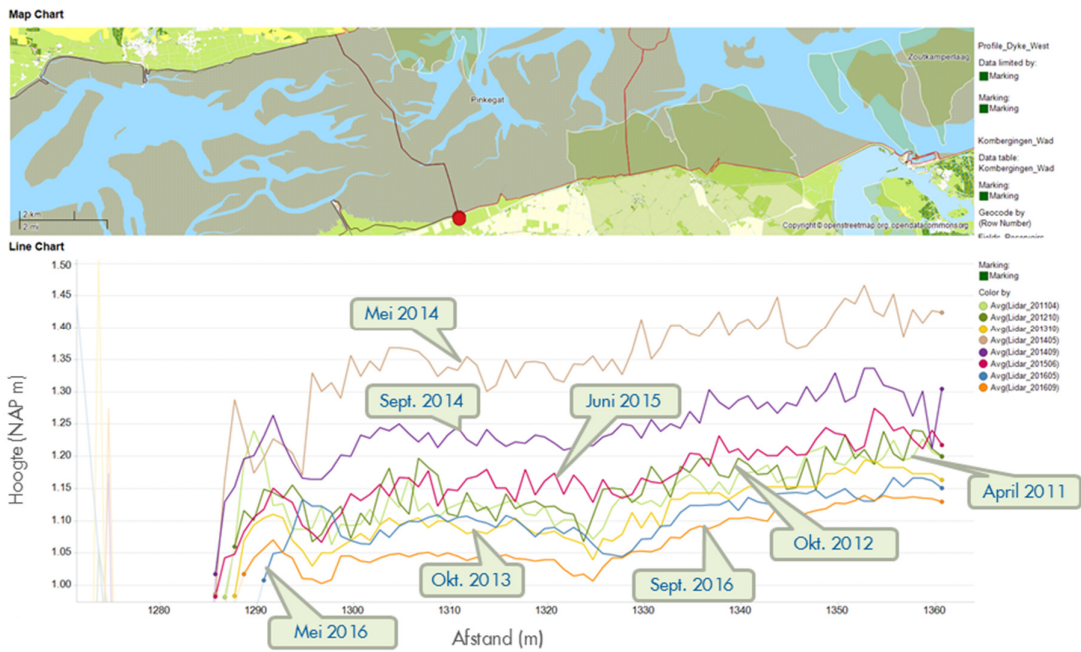


Fig. 1.5.2-e Profiel noord-zuid over het land gedeelte (y-as in meters t.o.v. NAP).

### 1.5.2.3 Profiel Noord-zuid op Ameland

Onderstaand profiel is bepaald op Ameland in noord-zuid richting over een weg (Kooidijk) nabij Kooiplaats.

Van dit profiel kan geconstateerd worden, dat verschillen in hoogte tussen de Lidar opnames kan variëren van 0-7cm. Ook hier vallen de opnames van 2014 hoger uit dan de opnames van 2013 en 2015.

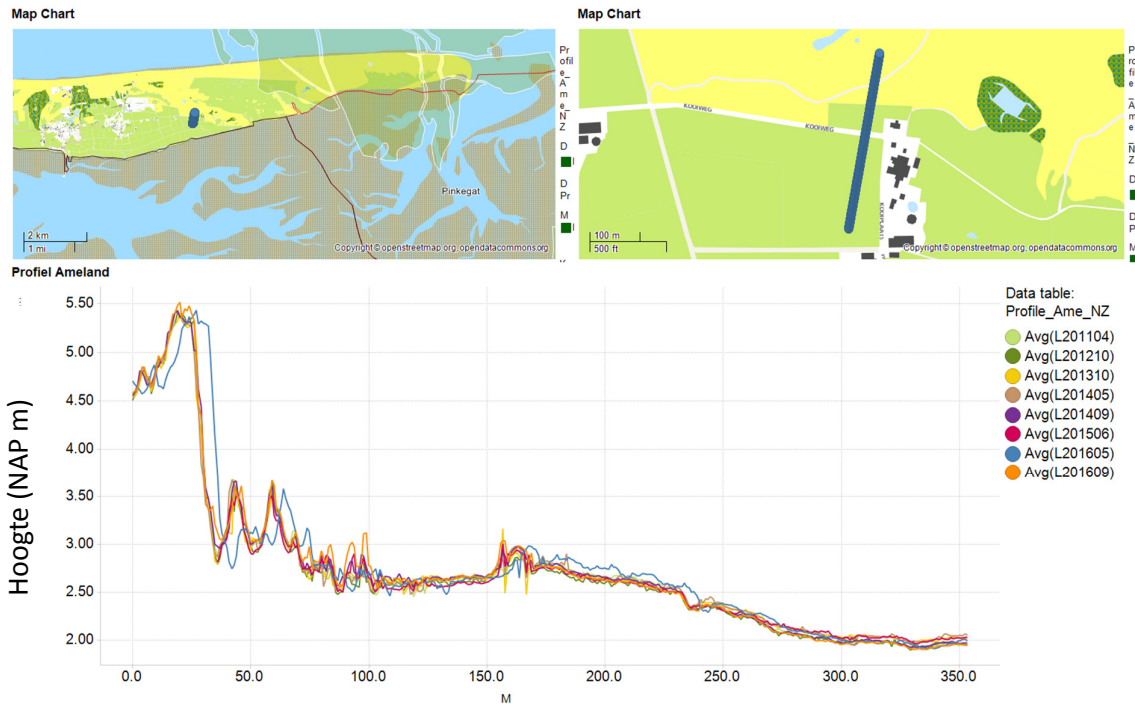


Fig. 1.5.2-f Profiel noord-zuid over Kooiweg op Ameland (y-as in meters t.o.v. NAP). Hierin is wederom te zien, dat er in de dataset van de Lidar opname van mei 2016 (blauwe lijn) een verschuiving zit in horizontale (XY) positie.

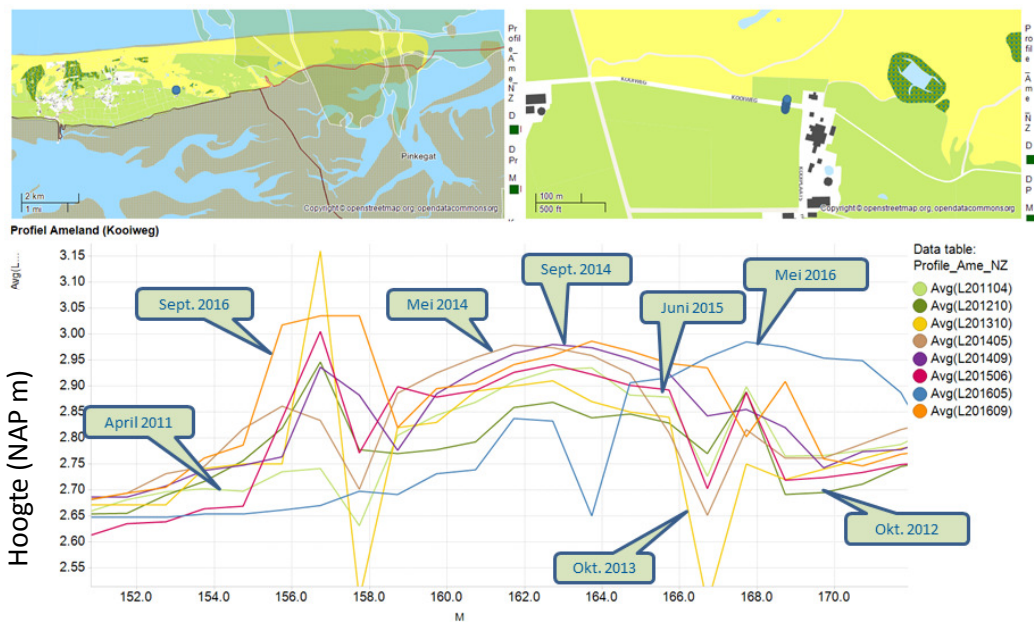


Fig. 1.5.2-g Detail profiel noord-zuid over Kooiweg op Ameland (y-as in meters t.o.v. NAP). De data van mei 2014 (licht bruin) en september 2014 (paars) ligt iets hoger dan de data van juni 2015 (rood),  $\pm 4$ cm en oktober 2013 (geel),  $\pm 7$ cm .

1.5.2.4 Profiel Noord-zuid op Schiermonnikoog.

Onderstaand profiel is bepaald op Schiermonnikoog in noord-zuid richting over een weg (Heereweg) en dijk. Hoewel hier de opnames van mei 2014 en september 2014 hoger uitvallen dan juni 2015 en oktober 2013 is het verschil ( $\pm 1-2\text{cm}$ ) minder dan in voorgaande profielen in Friesland en op Ameland.

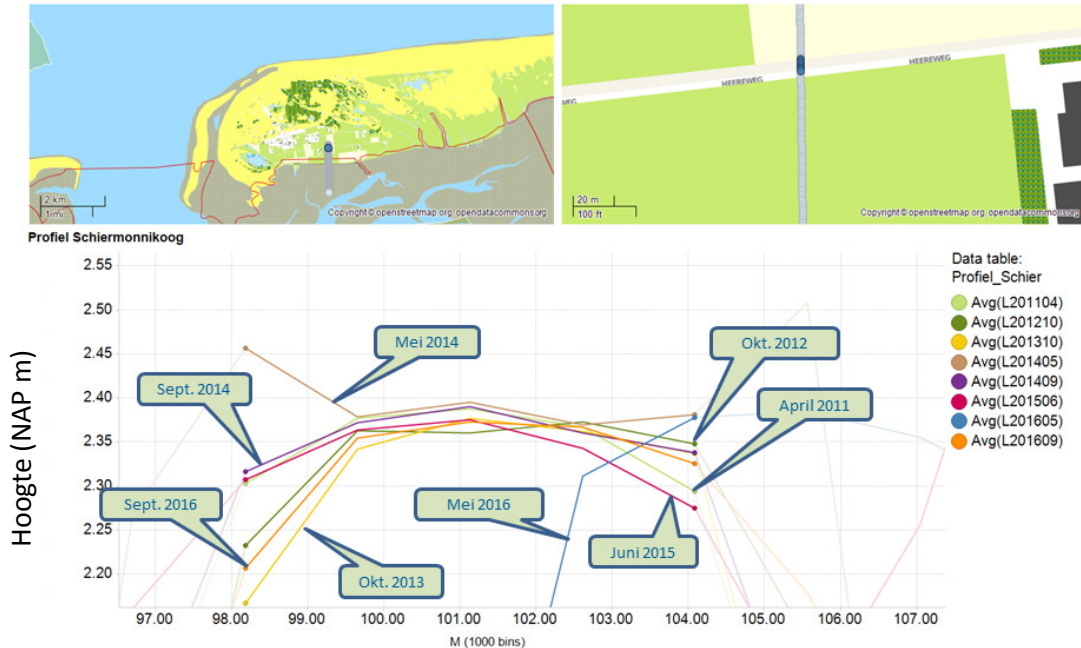


Fig. 1.5.2-h Detail profiel (noord-zuid) over Heereweg op Schiermonnikoog. Opname van mei 2014 (licht bruin) en september 2014 (paars) liggen iets hoger dan juni 2015 (rood) en oktober 2013 (geel),  $\pm 1-2\text{ cm}$ . Wel minder dan te zien is in de profielen van Friesland en Ameland.

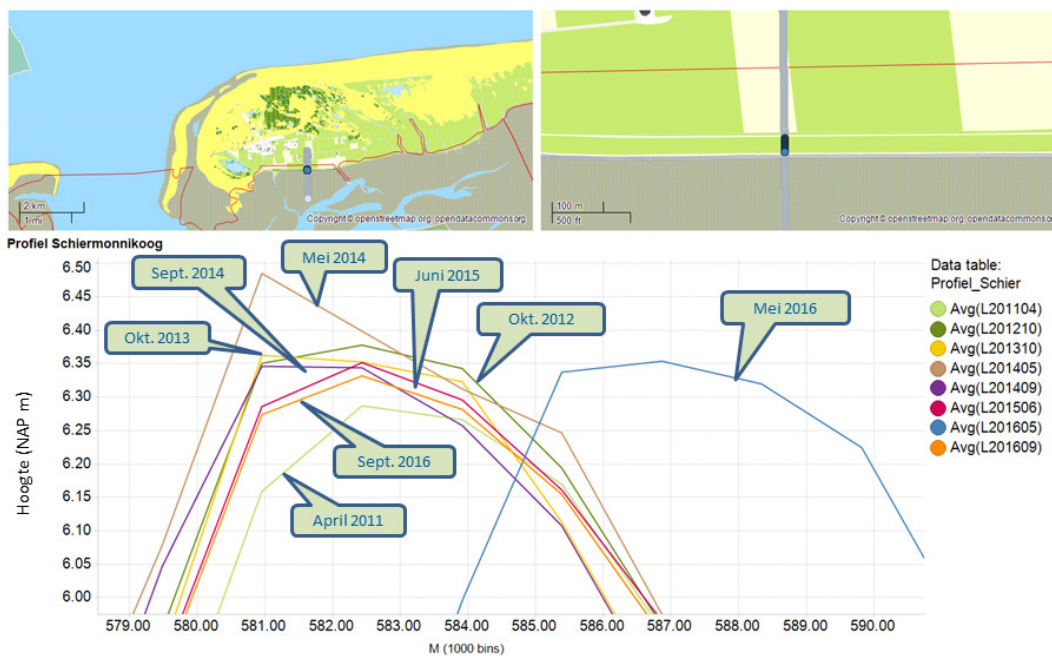


Fig. 1.5.2-i Detail profiel (noord-zuid) over de dijk op Schiermonnikoog. Profiellijn van opname mei 2014 laat een uitschieter zien. Dit heeft ook te maken met de resolutie van 1 meter van de rasterdata, waarbij betreffend pixel mogelijk beïnvloed is door een tijdelijk object ten tijde van de opname.

1.5.2.5 Profiel Noord-zuid in Groningen.

Onderstaand profiel is genomen aan de kust van noord-Groningen (nabij Kleine Huisjes). In het detail profiel van de dijk is te zien, dat de opnames van oktober 2012 en oktober 2013 zo'n 5cm hoger uitvallen.

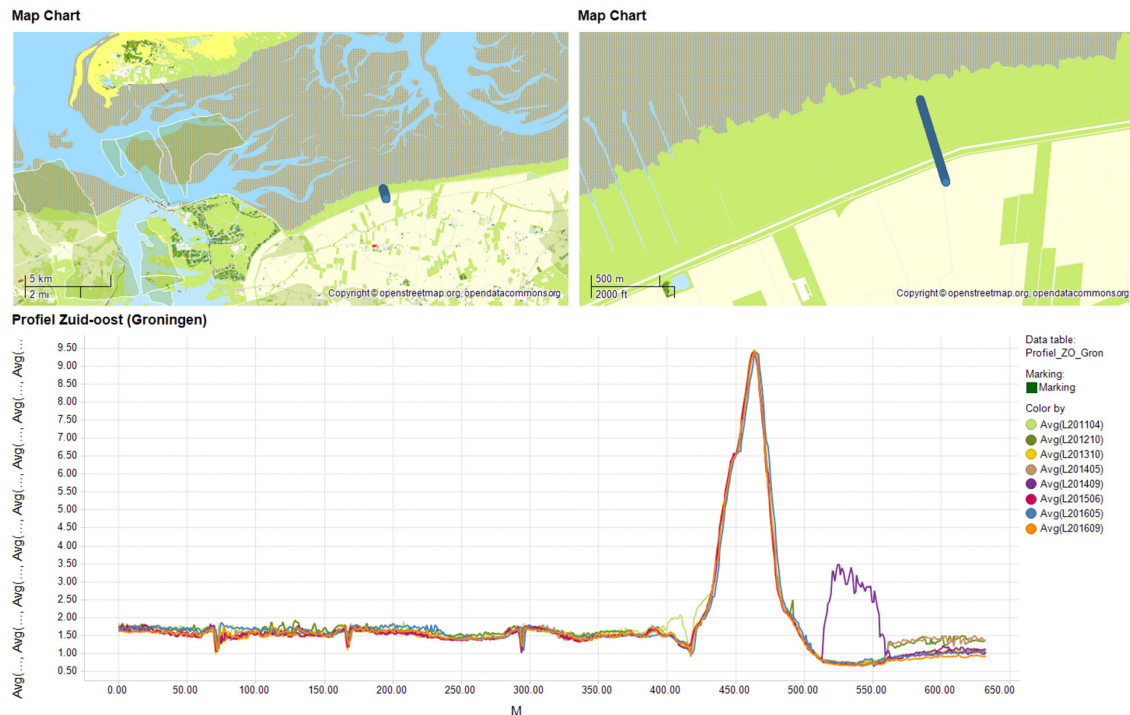


Fig. 1.5.2-j Profiel in noord-zuid richting aan kust van Groningen, bij Kleine Huisjes, inclusief dijk. Hoewel opvallend dat in september 2014 aan landkant van de dijk een sterke verhoging optreedt, heeft dit waarschijnlijk te maken met akkerbouw op het land en is voor deze analyse niet relevant.

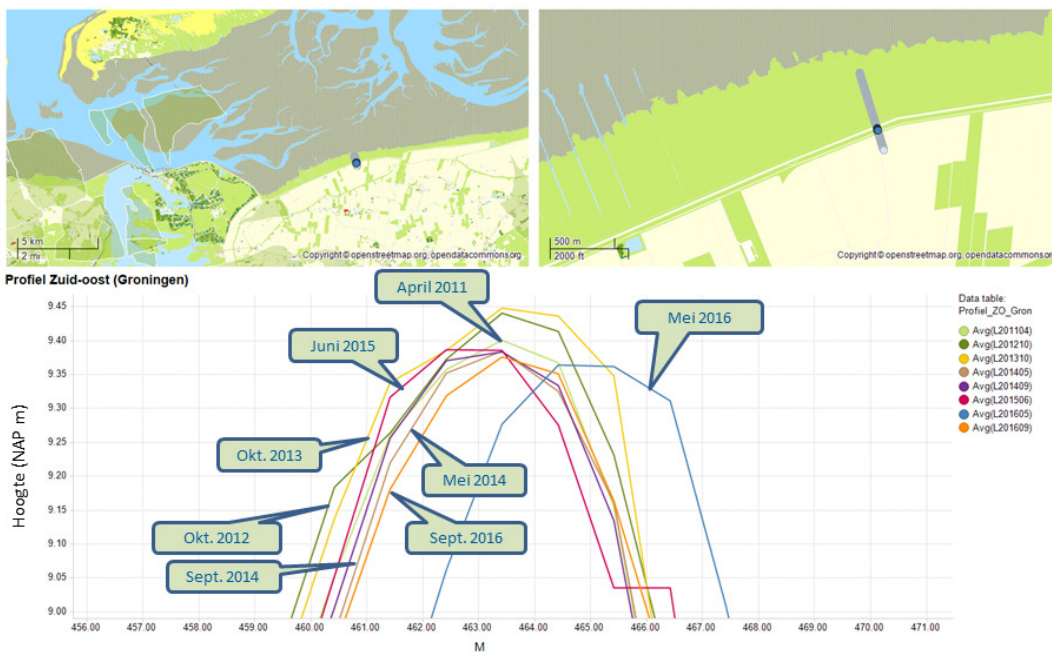


Fig. 1.5.2-k Detail profiel over de dijk bij Kleine Huisjes. Wederom de verschuiving in zuidelijke richting van de opname van mei 2016. In dit profiel is te zien, dat de opnames van oktober 2012 en oktober 2013 zo'n 5cm hoger uitvallen.

### 1.5.2.6 Profiel west-oost op Ameland

Dit profiel is genomen om te zien of de geconstateerde verschuiving in horizontale (XY) positie van de opname van mei 2016 alleen in noord-zuid richting optreedt, of ook in west-oost richting. Te zien is, dat er geen duidelijke verschuiving is in west-oost richting.

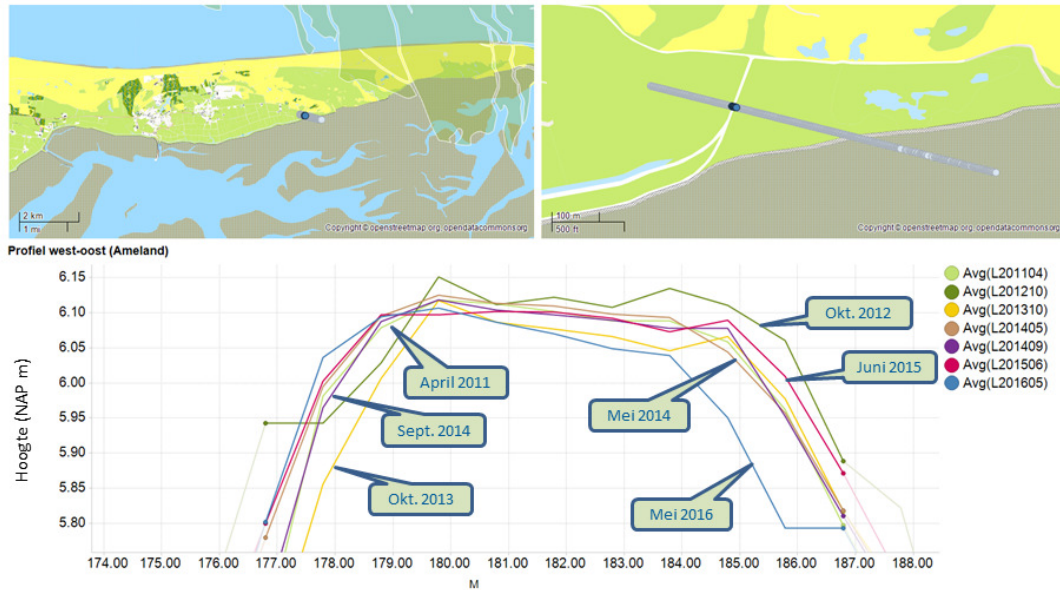
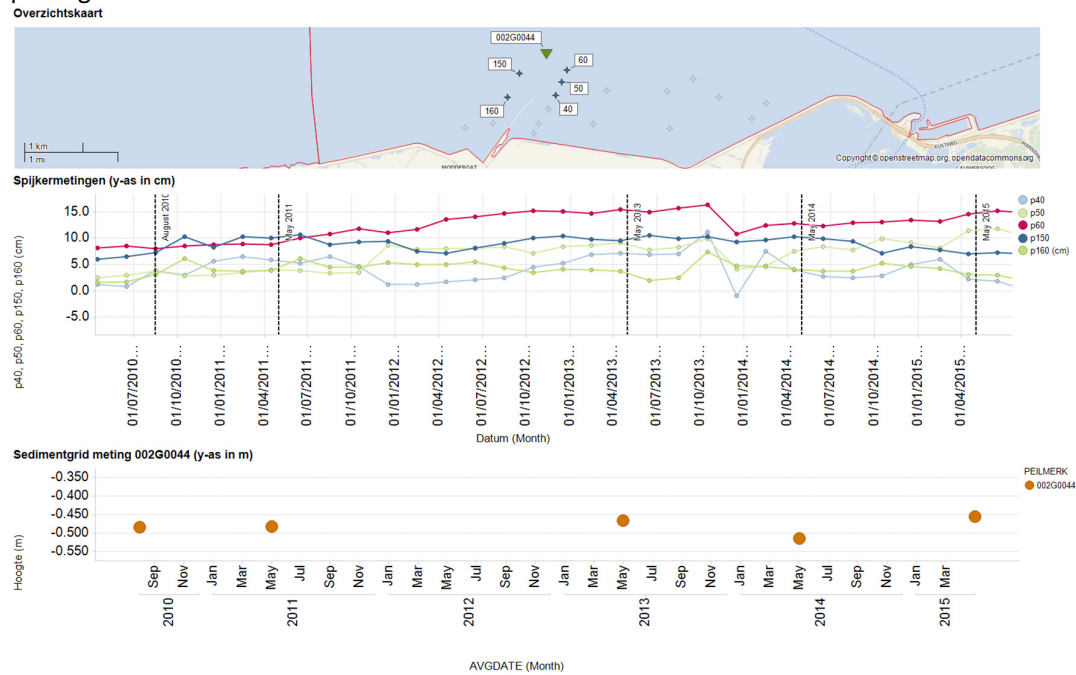


Fig. 1.5.2-1 Detail profiel Ameland in west-oost richting, ter verificatie van een mogelijke verschuiving in west-oost richting van met name de mei opname van 2016. Dit blijkt niet het geval te zijn (in tegenstelling tot de geconstateerde verschuiving in noord-zuid richting). Ook in het profiel over de strekdam in 1.5.2.1 laat geen verschuiving in west-oost richting zien.

### 1.5.3 Vergelijk spijkermetingen met sedimentgrid meting

Nabij de spijkermetingen van Paesens is ook de GPS cluster 002G0044 gelegen. Spijkermetingen worden om de 2 maanden uitgevoerd, terwijl het sedimentgrid bij de GPS cluster maximaal 1x per jaar wordt gemeten. Voor een vergelijk van het gedrag van de wadplaat ter plaatse zijn voor beide typen metingen afzonderlijke grafieken boven elkaar geplaatst. De verticale streeplijnen in de grafiek met spijkermetingen geven die momenten in tijd aan, waar de sedimentgrid metingen hebben plaatsgevonden.



**Fig. 0-a** Overzichtsk kaart met locatie van de meetpunten en vergelijk tussen spijkermetingen (bovenste grafiek) en sedimentgrid meting (onderste grafiek) in het gebied Paesens. Alleen de spijkerpunten welke het dichtst bij GPS cluster 002G0044 liggen worden getoond.

Te zien is, dat met name de resultaten van de spijkerpunt p60, welke het dichtst bij het sedimentgrid ligt, overeenkomsten vertoont qua hoogteverandering. Verschillen tussen de afzonderlijke spijkerpunten geven wel aan, dat er lokaal veel afwijkingen voorkomen.

### 1.5.4 Vergelijk Sediment grid met GPS

In een tijdserie is de verandering van de sediment (mediaan) gridhoogte per jaar vergeleken met de GPS hoogteverandering voor een aantal peilmerken. Voor de sedimentgrid hoogte is gekozen voor de mediaan, aangezien deze minder beïnvloed wordt door uitschieters. De x-as geeft de tijdschaal weer. De y-as de (relatieve) hoogte in meters. De hoogtes zijn relatief aangezien deze gereduceerd zijn rond de 0.00, zodat alle data binnen het bereik van de schaal blijft. De schaal van de y-as is voor beide hoogtes gelijk (-20cm tot +20cm). Uit de grafieken valt te concluderen, dat de dynamiek van de wadplaathoogte veel groter is dan de diepe bodemdaling gemeten met GPS

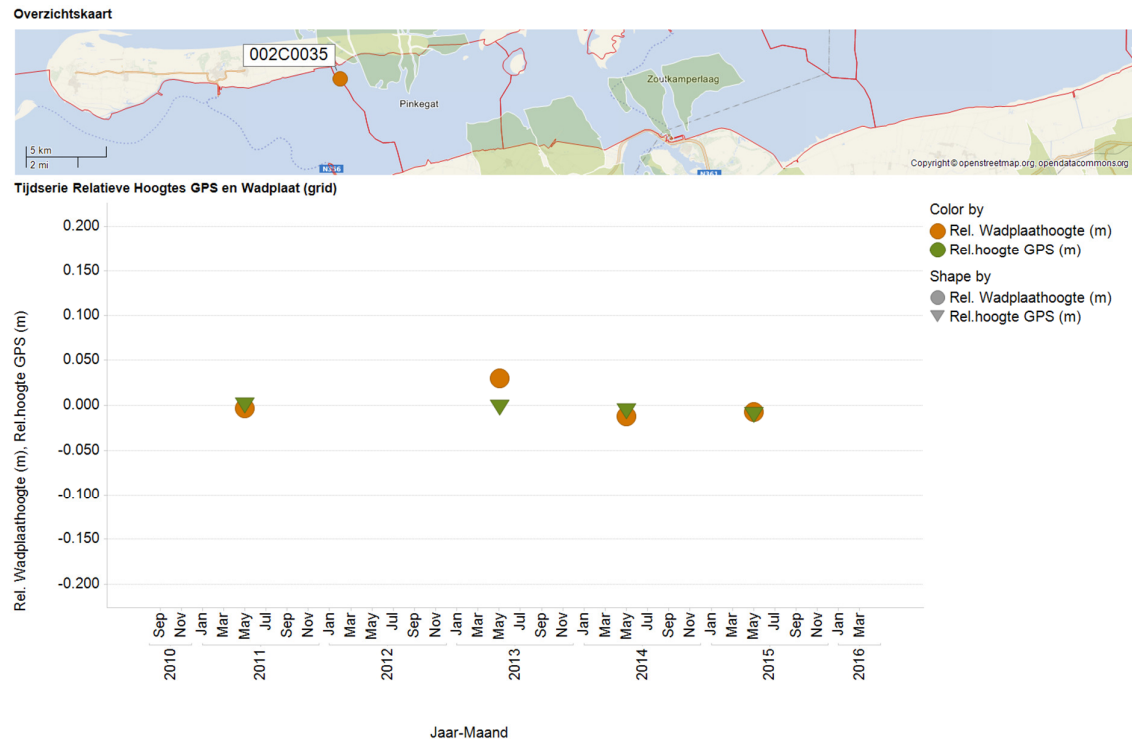
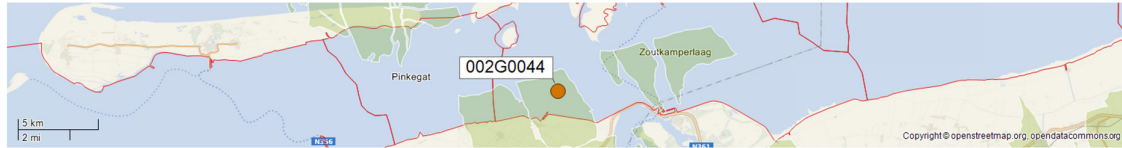


Fig. 1.5.4-a Vergelijk van relatieve wadplaathoogte (sedimentgrid, oranje ronde stippen) en diepe bodemdaling gemeten met GPS (groene driehoeken) op cluster 002C0035 (Y-as is in meters). Per jaar is de mediaan van de hoogte van alle gridpunten bepaald.



Overzichtskaart



Tijdsree Relatieve Hoogtes GPS en Wadplaat (grid)

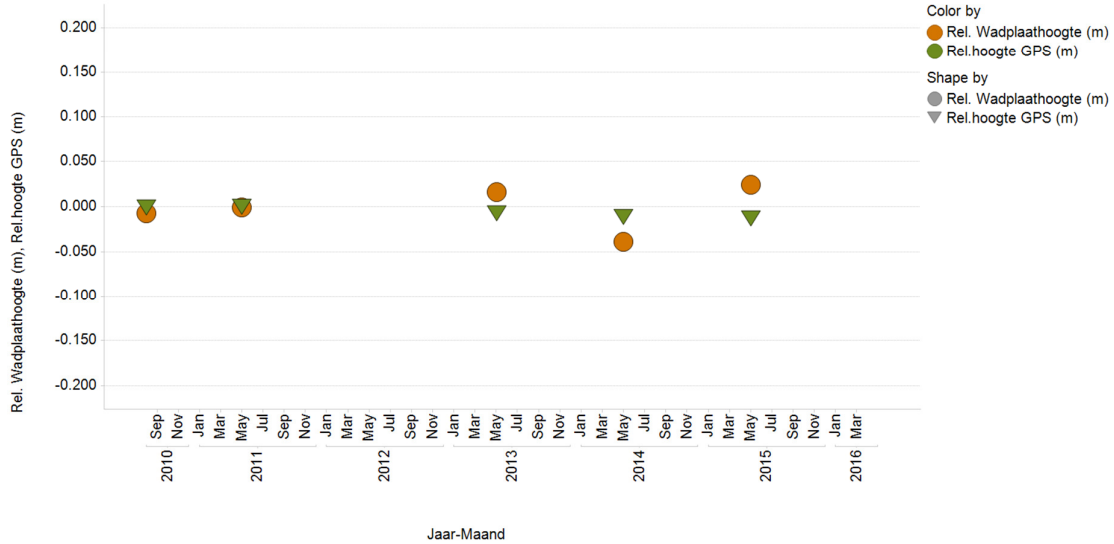


Fig. 1.5.4-b Vergelijk van relatieve wadplaathoogte (sedimentgrid, oranje ronde stippen) en diepe bodemdaling gemeten met GPS (groene driehoeken) op cluster 002G0044 (Y-as is in meters). Per jaar is de mediaan van de hoogte van alle gridpunten bepaald.

Overzichtskaart



Tijdsree Relatieve Hoogtes GPS en Wadplaat (grid)

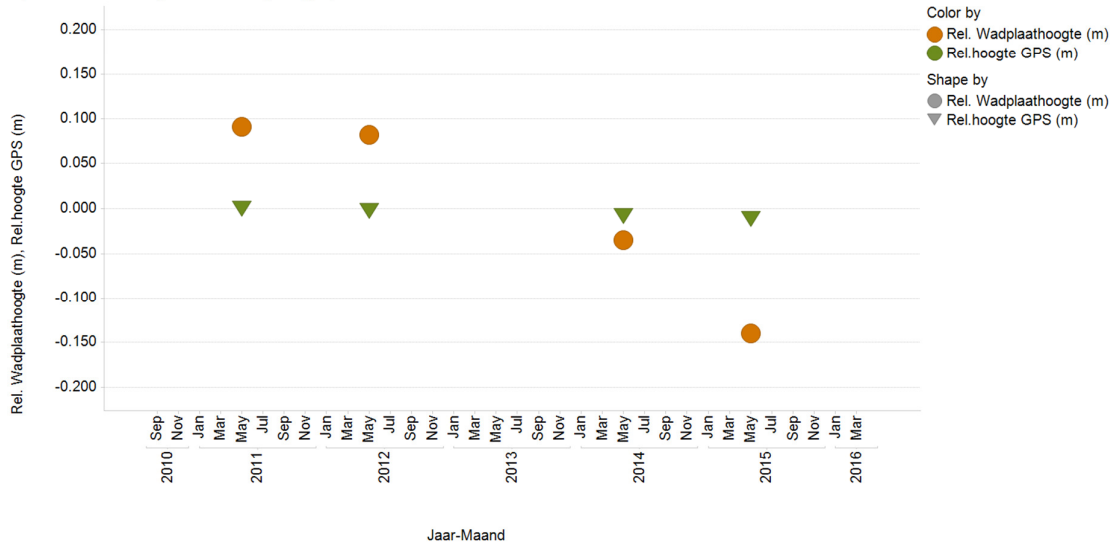


Fig. 1.5.4-c Vergelijk van relatieve wadplaathoogte (sedimentgrid, oranje ronde stippen) en diepe bodemdaling gemeten met GPS (groene driehoeken) op cluster M003 (Y-as is in meters). Per jaar is de mediaan van de hoogte van alle gridpunten bepaald.

Overzichtskaart



Tijdsree Relatieve Hoogtes GPS en Wadplaat (grid)

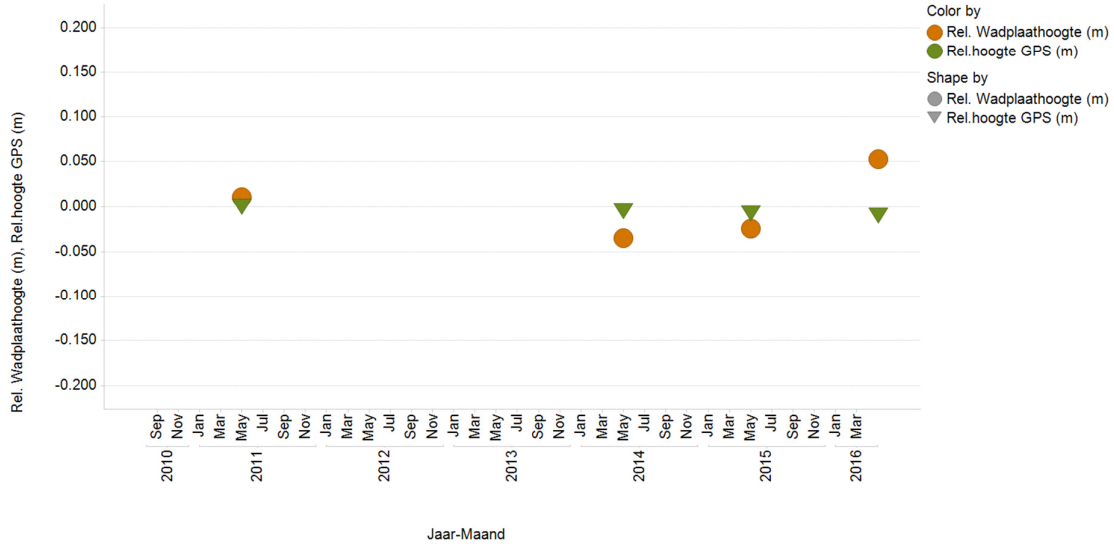
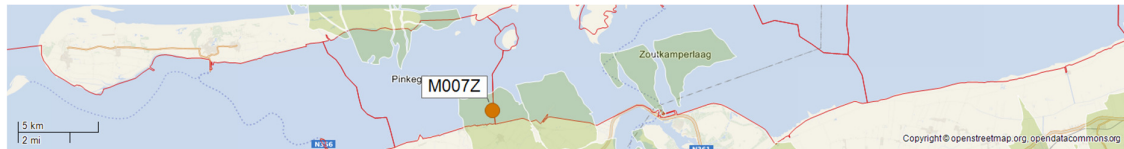


Fig. 1.5.4-d Vergelijk van relatieve wadplaathoogte (sedimentgrid, oranje ronde stippen) en diepe bodemdaling gemeten met GPS (groene driehoeken) op cluster M005 (Y-as is in meters). Per jaar is de mediaan van de hoogte van alle gridpunten bepaald.

Overzichtskaart



Tijdsree Relatieve Hoogtes GPS en Wadplaat (grid)

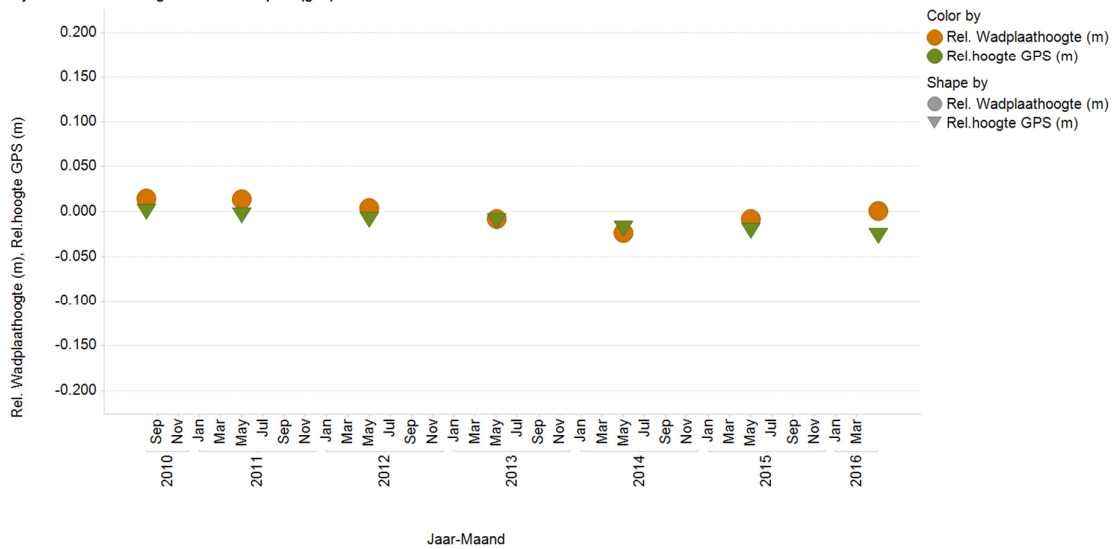
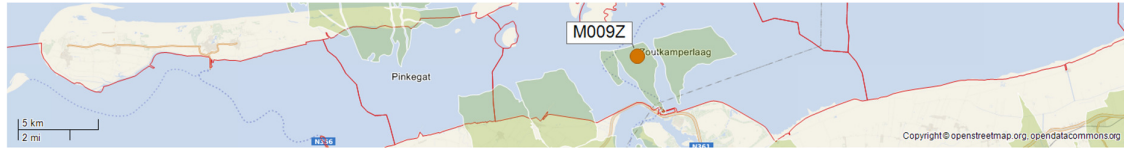


Fig. 1.5.4-e Vergelijk van relatieve wadplaathoogte (sedimentgrid, oranje ronde stippen) en diepe bodemdaling gemeten met GPS (groene driehoeken) op cluster M007 (Y-as is in meters). Per jaar is de mediaan van de hoogte van alle gridpunten bepaald.

Overzichtskaart



Tijdsree Relatieve Hoogtes GPS en Wadplaat (grid)

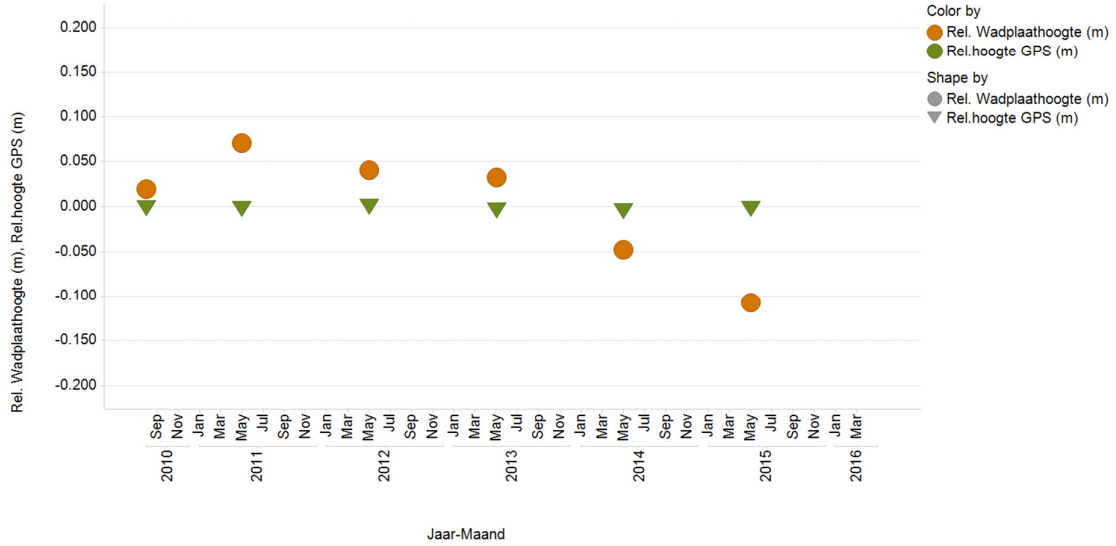


Fig. 1.5.4-f Vergelijk van relatieve wadplaathoogte (sedimentgrid, oranje ronde stippen) en diepe bodemdaling gemeten met GPS (groene driehoeken) op cluster M009 (Y-as is in meters). Per jaar is de mediaan van de hoogte van alle gridpunten bepaald.

### 1.5.5 Vergelijk Controlegrids met Lidar data

Telkens wanneer een Lidar opname wordt geprocesseerd wordt een correctie in hoogte uitgevoerd aan de hand van de nauwkeurig door waterpassing bepaalde controlegrids (GCP's). Veelal zijn dit



harde terreinen, zoals parkeerplaatsen of weggedeelten, die ook in de Lidar opnames herkenbaar zijn.

Zie bijgevoegde foto van GCP2, betreffende een weggedeelte.

De controlegrids zijn in 2013 middels waterpassing aangemeten en aangesloten aan het NAP netwerk, middels dezelfde waterpassing naar een nabij gelegen Rijkswaterstaat peilmerk.

Aangezien deze controlegrids in veel gevallen ook onderhevig zijn aan bodemdaling moet hiervoor gecorrigeerd worden.

Correcties die uitgevoerd zijn voor de Lidar opnames van 2013-2015 zijn in onderstaande tabel weergegeven.

Daarbij is het van belang te weten, dat de peilmerken waarop de GCP's zijn aangesloten, eerder in NAP hoogte zijn bepaald. Dit jaar van vastlegging is vermeld in de kolom [2013]. Ook in de periode tussen vastlegging en 2013 kan er reeds bodemdaling opgetreden zijn.

Tabel 0-a Toegepaste correcties per Lidar survey van Controle grids op Lidar hoogte. Kolom [Totaal] (in rood) geeft de totale toegepaste correctie in 2015. Ter referentie wordt in de laatste kolom de, middels GPS, gemeten daling weergegeven van nabij gelegen GPS-station. Kolom [2013] geeft het jaar aan van de vastlegging van de NAP hoogte van het gebruikte NAP referentie peilmerk.

Controle grid	2013	2014 mei correctie	2014 sept. correctie	2015 juni correctie	Totaal <sup>1)</sup>	GPS daling 2011-2015
GCP1	gemeten (2011)		-1.1cm	-2.0cm	-3.1cm	Ame1 -3.0cm
GCP2	gemeten (2011)			-0.3cm	-0.3cm	
GCP3	gemeten (2011)	-0.8cm		-1.4cm	-2.2cm	Modd -1.8cm
GCP4	gemeten (2012)			-0.1cm	-0.1cm	Schier referentie correctie -0.1cm
GCP5	gemeten (2011)			-0.6cm	-0.6cm	
GCP6	gemeten (2011)	-0.2cm		-1.2cm	-1.4cm	
GCP7	gemeten (2012)			-0.4cm	-0.4cm	
GCP8	gemeten (2011)	Verstoord			(-0.2cm)	
GCP9	Gemeten (2008)	-0.7cm		-0.3cm	-1.0cm	

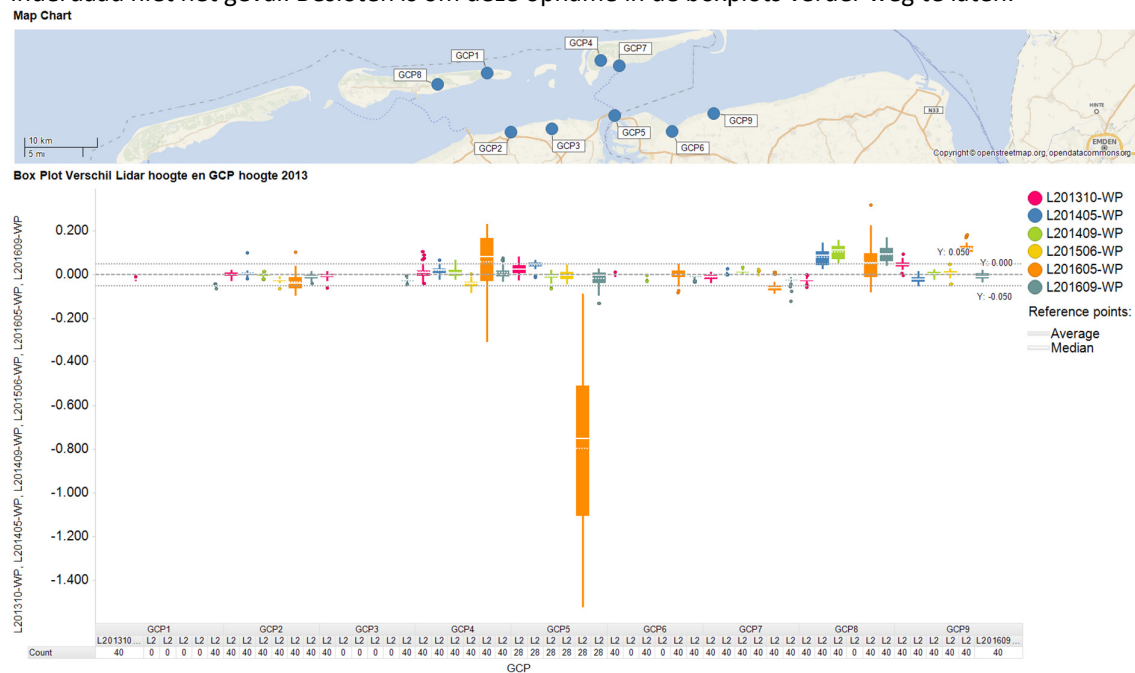
De grootste correctie is uitgevoerd op GCP1 (op NAM locatie Ameland).

In onderstaande boxplots is de Lidar hoogte van het 1x1m grid van de verschillende opnames vergeleken met de NAP hoogte van de GCP's zoals deze in 2013 bepaald is (Lidar hoogte minus GCP hoogte).

Let wel: In deze boxplot is voor een eenduidig beeld de GCP hoogte niet gecorrigeerd, terwijl de Lidar hoogte tijdens processing wél gecorrigeerd is voor eventuele daling van de GCP's. Dit zou dus kunnen betekenen dat de Lidar hoogte iets lager uitvalt dan de GCP. Het verschil zal daardoor negatief (-) kunnen zijn.

Helaas zijn in de Lidar resultaten niet altijd de GCP locaties opgenomen (uiteraard wel in de processing, maar om onduidelijke redenen zijn deze niet aan NAM en Deltares aangeleverd, ofwel grofweg 'geknipt' op de kombergingen).

Zoals eerder reeds is opgemerkt, is de Lidar survey van mei 2016 in noord-zuid richting verschoven tijdens de processing. Hierdoor is niet zeker of de locatie van de GCP's wel op de juiste positie liggen en gezien de uitschieters (opname 2016-05 in oranje) getoond in onderstaande boxplot is dat inderdaad niet het geval. Besloten is om deze opname in de boxplots verder weg te laten.



**Fig. 0-a** Boxplot met verschil tussen Lidar hoogte per opname en hoogte controlegrid. Y-as geeft het verschil in meters. Negatief verschil betekent, dat de Lidar hoogte lager is dan de, in 2013 bepaalde, controlegrid hoogte. Duidelijke uitschieter is de opname van mei 2016. Dit is te verklaren door de horizontale verschuiving in noord-zuid richting van de Lidar data, waardoor de positie van de GCP niet overeenkomt met die van de Lidar opname.

Onderstaande boxplot, waarbij de verklaarde uitschieters van mei 2016 zijn weggelaten (waardoor de schaal van de y-as kon worden aangepast), geeft een goed beeld van de verschillen, waarbij opvalt, dat de Lidar hoogte van GCP8 van de opnames van 2014 (mei en september) en 2016 (september) veel hoger uitvallen. Reeds in de rapportage van de Lidar opname van mei 2014 is geconstateerd dat er een nieuwe asfaltlaag is aangebracht op de betreffende wegkruising (GCP8). Uit de hermeting van een aantal GCP's in 2015 blijkt, dat de kruising gemiddeld 9cm hoger ligt. Uit deze hermeting is tevens gebleken, dat de toegepaste correctie voor GCP2 in juni 2015 ongeveer 1cm meer daling moest zijn (-1.5cm in plaats van -0.3cm). In onderstaande boxplot vertaald zich dat in een box (GCP2, geel) die 1cm hoger ligt. GCP3 en GCP6 daarentegen zouden 1cm minder correctie moeten hebben (resp. GCP3: -1.2cm i.p.v. -2.2cm en GCP6: -0.4cm i.p.v. -1.4cm)

De opname van juni 2015 (geel) ligt relatief lager voor GCP's 2 en 4. Verder valt op, dat de opname van september 2016 (grijs-groene kleur) voor vrijwel alle GCP's (met uitzondering van GCP4 en 8) lager uitvalt.

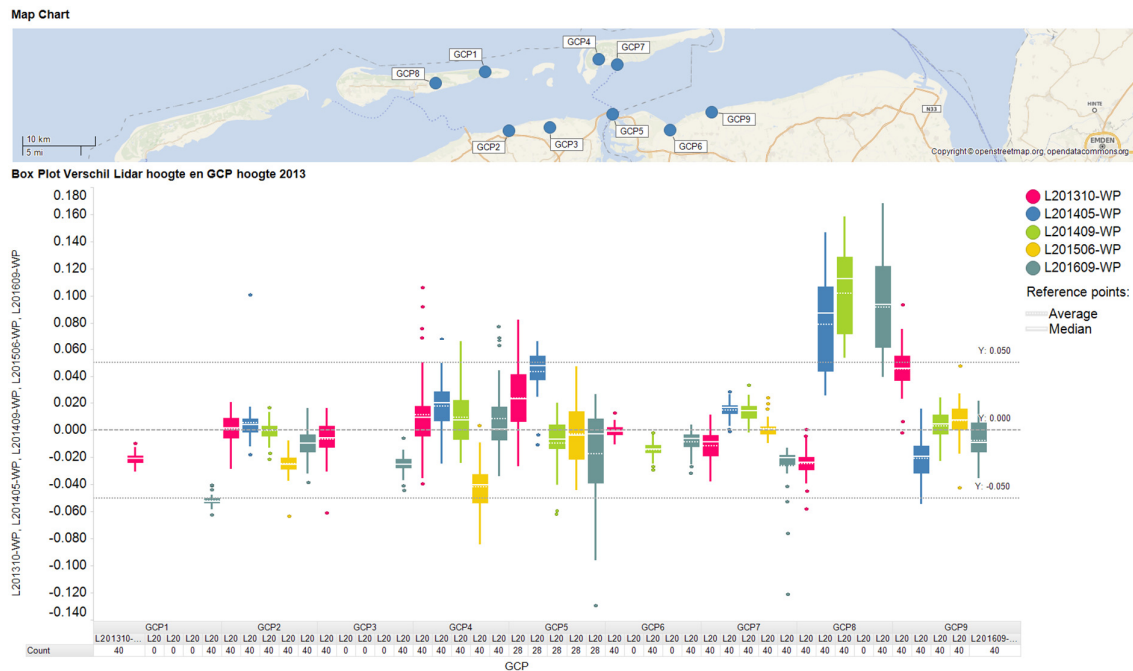


Fig. 0-b Boxplot als in fig. 0-a, maar dan zonder survey van mei 2016, vanwege de incorrecte horizontale positie. Tevens is daarom de schaal van de y-as aangepast. Boxen geven verschil tussen Lidar hoogte per opname en gewaterpaste hoogte van het controlegrid. Y-as geeft het verschil in meters. Negatief verschil betekent, dat de Lidar hoogte lager is dan de, in 2013 bepaalde, controlegrid hoogte.

Ingezoomed per controlegrid geven onderstaande boxplots een duidelijk overzicht van de GCP hoogte per Lidar opname. Hier geeft de y-as de NAP hoogte in meters (dus niet een verschil tussen Lidar hoogte en GCP hoogte).

Ook hier is duidelijk dat voor GCP2 en 4 de Lidar opname van juni 2015 (geel) lager ligt dan de andere opnames.

Let wel op, dat de y-waardes (NAP hoogte in meters) verschillen per GCP.

Wat tevens opvalt is, dat de verschillen tussen minimum en maximum waardes (box lengte) per GCP/opname sterk verschillen. Dat betekent, dat de GCP's van de 'lange' boxen een grotere variatie in hoogte hebben, ofwel een hellend terrein zijn.

**GCP2**

Map Chart



Box Plot Lidar hoogte op GCP

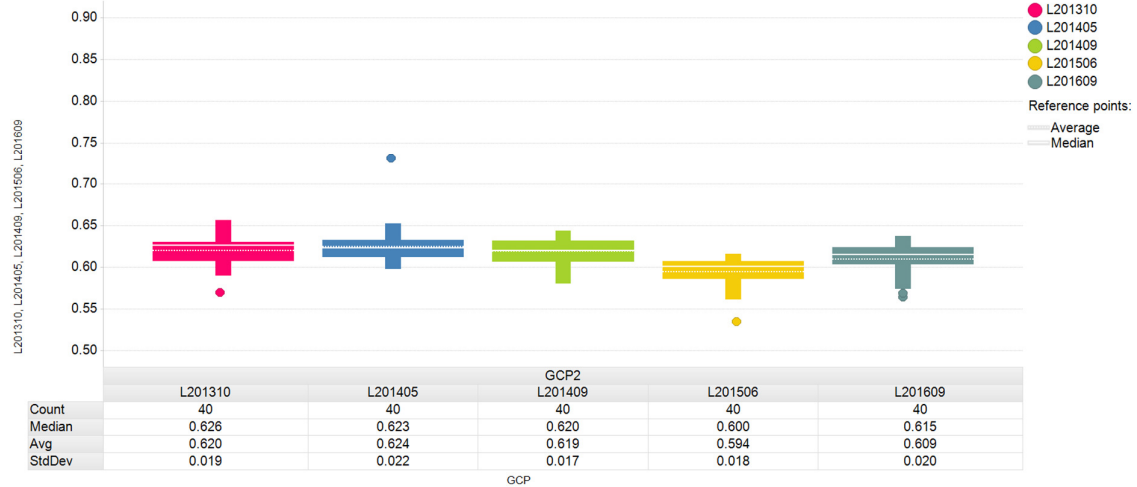


Fig. 0-c Boxplot met op de y-as de NAP hoogte in meters van controlegrid GCP2, uit de 1x1m Lidar data.

**GCP4**

Map Chart



Box Plot Lidar hoogte op GCP

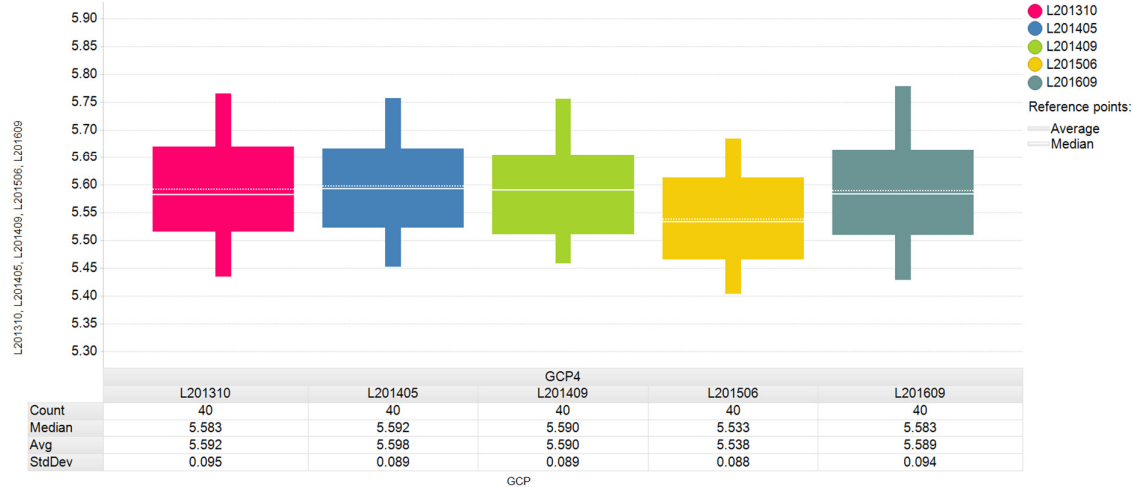


Fig. 0-d Boxplot met op de y-as de NAP hoogte in meters van controlegrid GCP4, uit de 1x1m Lidar data.

**GCP5**  
Map Chart



Box Plot Lidar hoogte op GCP

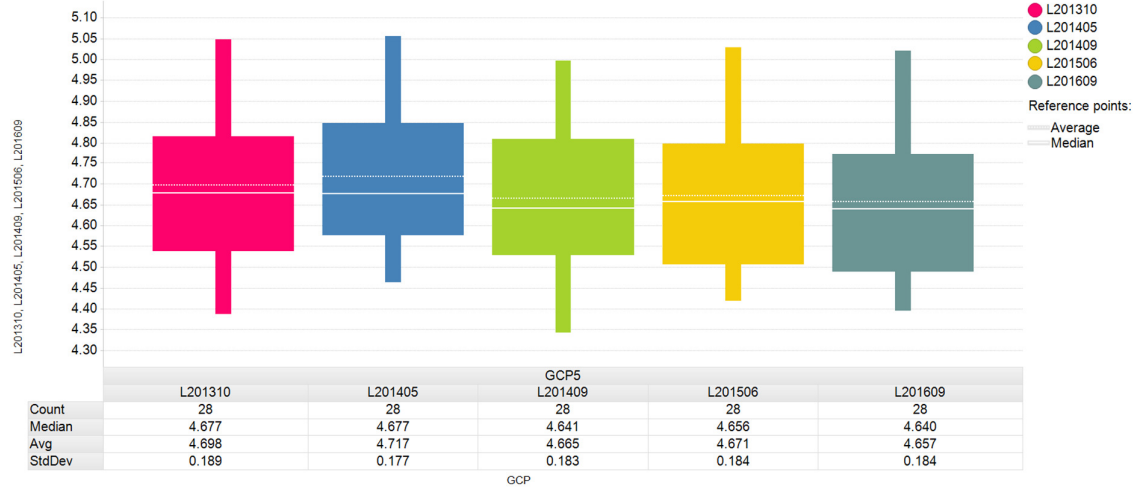


Fig. 0-e Boxplot met op de y-as de NAP hoogte in meters van controlegrid GCP5, uit de 1x1m Lidar data.

**GCP7**  
Map Chart



Box Plot Lidar hoogte op GCP

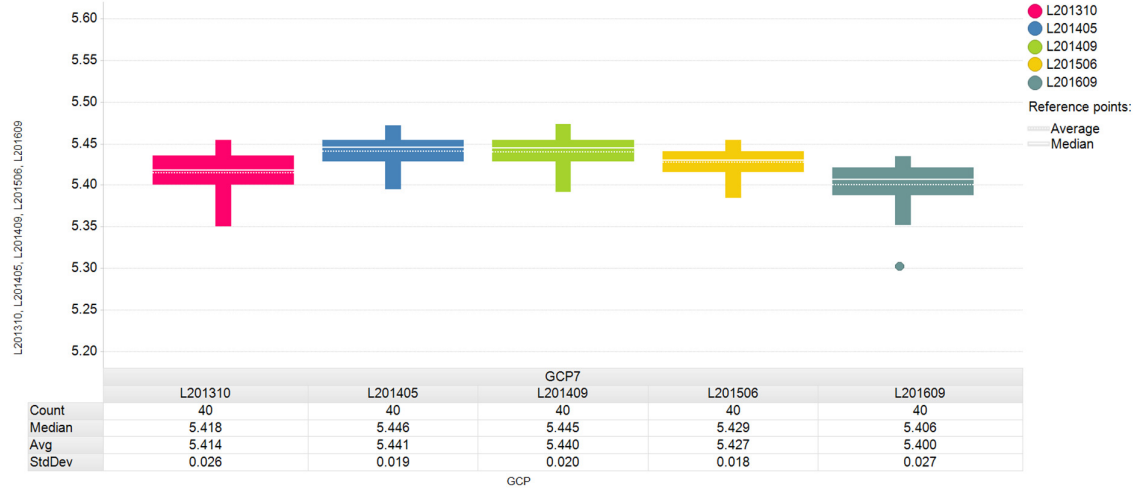


Fig. 0-f Boxplot met op de y-as de NAP hoogte in meters van controlegrid GCP7, uit de 1x1m Lidar data.



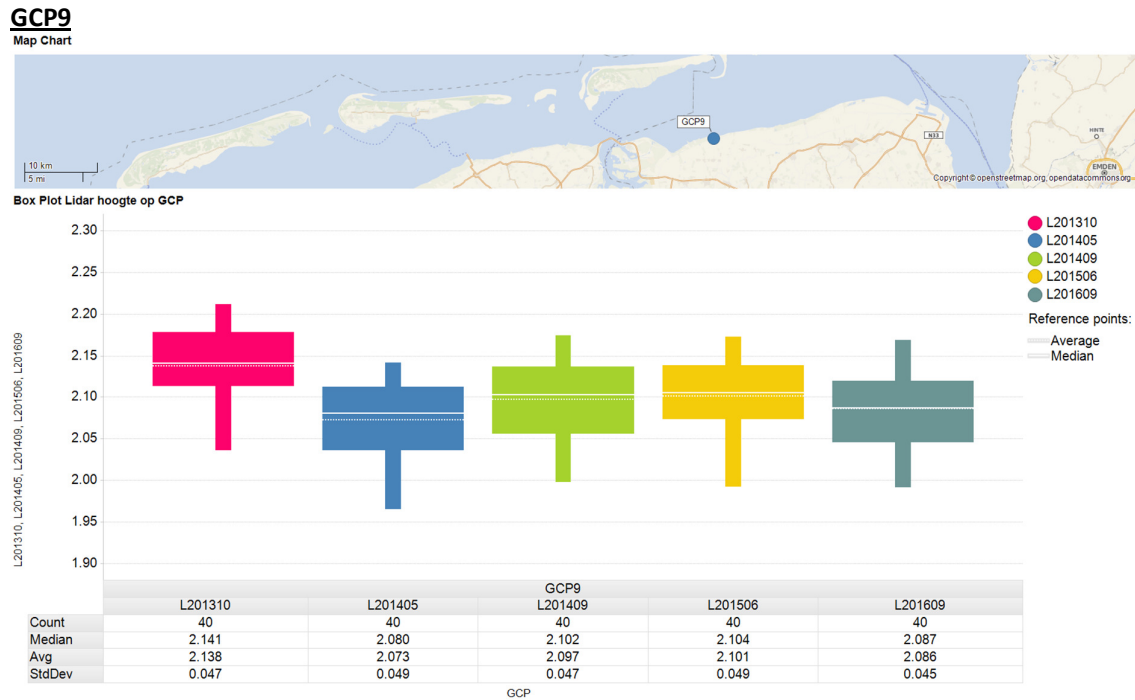


Fig. 0-g Boxplot met op de y-as de NAP hoogte in meters van controlegrid GCP9, uit de 1x1m Lidar data. De survey van 2013 ligt relatief iets hoger dan de andere surveys. Dit komt overeen met het detail profiel van fig. 1.5.2-k over de dijk bij Kleine huisjes. Ook in het Lidar acquisitie rapport van de 2013 survey (zie (Fugro, 2014)) is bij de absolute nauwkeurigheid controle geconstateerd dat GCP9 met Lidar zo'n 5cm hoger ligt, dan de gewaterpaste NAP hoogte, maar is er destijds geen duidelijke reden gevonden waarom dit zo is (verondersteld is, dat dit veroorzaakt is door de (on)nauwkeurigheid van de GPS positie van het vliegtuig).

Samenvattend kan geconcludeerd worden dat correcties zoals deze op de GCP grid hoogtes zijn toegepast, niet altijd even juist bleken (a.d.h.v. hermeting in 2015), maar niet meer dan 1 cm afwijken. De NAP hoogte van GCP8 is na de asfaltering opnieuw bepaald en kan in toekomstige Lidar Surveys weer volledig gebruikt worden voor de inpassing naar NAP hoogte. Ook de andere berekende correcties zullen in de toekomst gebruikt worden.

## Conclusies

Na de beschouwing van de resultaten van de verschillende meetmethodes kan het volgend geconcludeerd worden:

- a. De aan de hand van LiDAR-metingen bepaalde verandering in wadplaathoogte waar momenteel discussie over is in het publieke debat, wordt veroorzaakt door de onnauwkeurigheid van de meetmethode en niet door daadwerkelijk opgetreden veranderingen in wadplaathoogte. Aan deze conclusie liggen de volgende observaties ten grondslag.
  - De tijdreeks aan hoogtemetingen voor Pinkegat en Zoutkamperlaag (a.d.h.v. LiDAR) laat zien dat voor het zuidwest gelegen deel de gemeten wadplaathoogte in het voor- en najaar van 2014 opvallend hoog lag (i.p.v. een opvallende verlaging van het wad in 2015) (zie profielen in 1.5.2).
  - De sedimentgrid metingen die ten tijde van een LiDAR-meting ter controle op enkele wadplaten worden uitgevoerd laten zien dat de gemeten LiDAR-hoogte in 2014 systematisch hoger lag dan de gemeten sedimentgrid hoogtes (zie Fig. 1.5.1-a).
  - Analyse van de met LiDAR ingemeten hoogte van de dijk en een in het gebied gelegen strekdam laten dezelfde hoogteverandering in de tijd zien als het nabijgelegen wad. Ook strekdam en dijk lagen in 2014 opvallend hoog t.o.v. andere jaren (zie Fig. 1.5.2-b en Fig. 1.5.2-d).

Overige conclusies uit deze analyse zijn:

- b. De verandering in wadplaathoogte (sedimentoppervlak) is vele malen groter dan die van de gemeten diepe bodemdaling veroorzaakt door gaswinning (zie 1.5.4).
- c. Er is geen correlatie aan te tonen tussen de veranderingen in wadplaathoogte en de diepe bodemdaling.
- d. Lidar geeft een goed vlakdekkend beeld van het areaal droogvallende wadplaten in de kombergingen Pinkegat en Zoutkamperlaag, waarbij er tussen de verschillende opnames gemeten hoogteverschillen kunnen optreden als gevolg van meet(on)nauwkeurigheid van 5-10cm (zie b.v. Fig. 1.5.2-d Profiel noord-zuid over de dijk)
- e. Vergelijking van de a.d.h.v. sedimentgridmeting en LiDAR-metingen bepaalde wadplaathoogte laat zien, dat deze binnen de meetnauwkeurigheid goed overeenkomen (zie 1.5.1).
- f. Hoewel het profiel in het zuidwest deel van het Friesche Zeegat voor 2014 duidelijk hoger ligt, kan dit voor profielen in andere delen niet geconstateerd worden, en lijkt deze afwijking zich te beperken tot het zuidwestelijk deel (zie 1.5.2).
- g. Sedimentgridmetingen en spijkermetingen geven een nauwkeurig, maar zeer lokaal beeld van de hoogteveranderingen van de wadplaat. Tevens is te zien dat er ook op deze beperkte lokale schaal relatief grote verschillen in wadplaathoogte kunnen optreden (zie 0).
- h. Toegepaste correcties op de NAP hoogte van de controlegrids blijken niet meer dan 1cm af te wijken van de her-berekende hoogtes en zijn slechts een klein onderdeel van de (on)nauwkeurigheid van Lidar (zie 0).

## 1.6 Referenties

- Referentie 1 - Analyse LiDAR data voor het Friesche Zeegat (2010-2015) - 1221249-000 (Deltares - Schrijvershof, 2016)
- Referentie 2 - Continue GPS hoogtemetingen NAM Waddenzee – Rapportage september 2016 (EP201610203908) (11-10-2016)
- Referentie 3 - GPS Survey NAM Waddenzee (version 1.20) (06GPS, January 14, 2016)
- Referentie 4 - Wadsedimentatiemetingen Ameland, Engelsmanplaat, Paesens en Schiermonnikoog 2007-2015 (Krol, J., 2016)
- Referentie 5 – Waddenzee LiDAR Survey (Fugro, 2014)