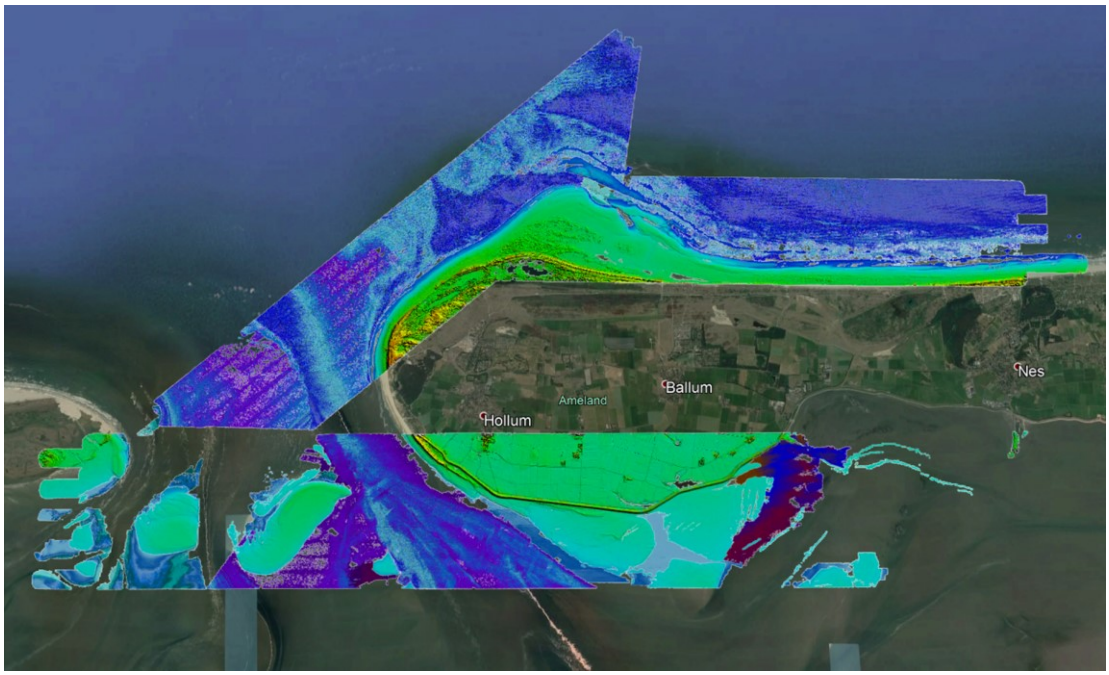
Project rapportage

“Uitvoering Pilot met het Chiroptera 4X Bathymetrische en Topografische LiDAR systeem”

Onderdeel: Vluchtuitvoering en resultaten

opdrachtgever: Rijkswaterstaat



Airborne Laserscanning International B.V.
Jan Willem van der Vegt
jwvdvegt@web.de
20 December, 2019

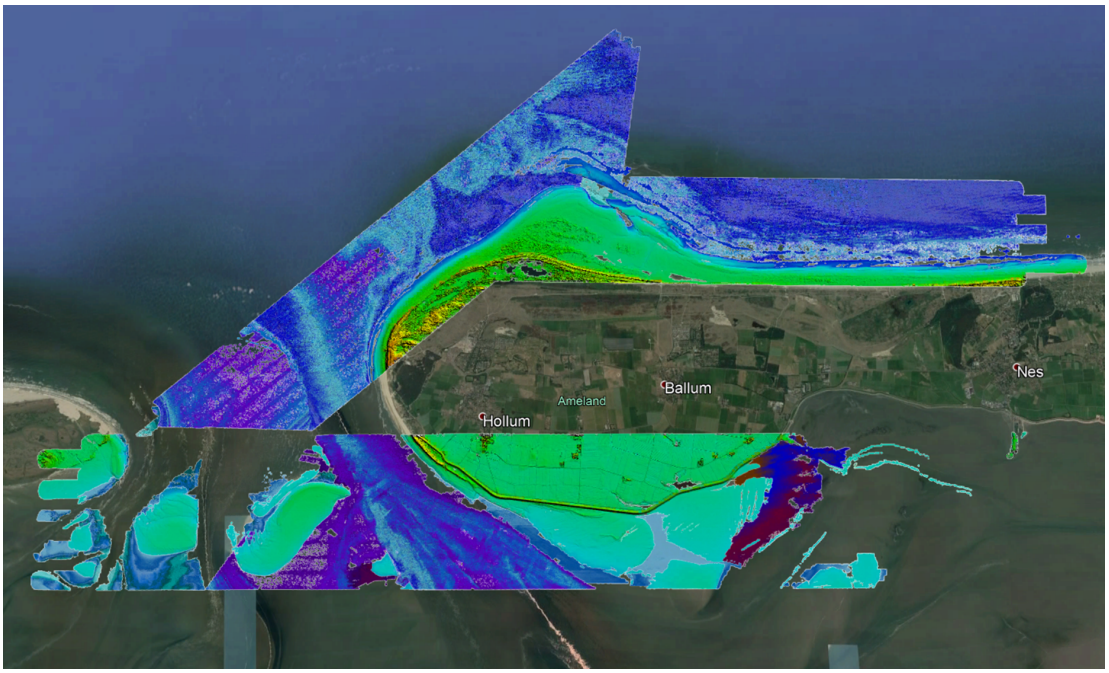
This project was initiated by Rijkswaterstaat-WVL as part of the Interreg VB North Sea Region Building with Nature project

Project rapportage

“Uitvoering Pilot met het Chiroptera 4X Bathymetrische en Topografische LiDAR systeem”

Onderdeel: Vluchtuitvoering en resultaten

opdrachtgever: Rijkswaterstaat



Airborne Laserscanning International B.V.
Jan Willem van der Vegt
jwvdvegt@web.de
2 April, 2020

Table of content

1 Inleiding 2
2 Vluchtuitvoering 3
2.1 Systeem en vliegtuig: Chiroptera 4X in Partenavia P68 3
2.2 Vluchtuitvoering 3
2.3 Weer en omgevingscondities tijdens de vlucht 8
3 Resultaten van de dataverwerking 10
3.1 De trajectberekening 10
3.2 De Full waveform processing 10
3.3 De resultaten 12
3.3.1 Projectgebied Waddenzee 12
3.3.2 Projectgebied Houtribdijk 16
3.3.3 Baseline Urk 18
4 Vergelijk met referentie gegevens 21
4.1 Topografische LiDAR data 21
4.1.1 Conclusie 22
4.2 Bathymetrische LiDAR data 22
4.2.1 Projectgebied Waddenzee 22
4.2.2 Projectgebied Houtribdijk 28
4.2.3 Gebied Urk 35
4.2.4 Conclusies 36
5 Opgeleverde dataproducten 38
6 Aanbevelingen 39

1 Inleiding

Dit rapport beschrijft de uitvoering van de vlucht en de bereikte resultaten na verwerking van de ingewonnen data.
De dataproducten zijn conform de specificaties geleverd op harddisc.

De metingen zijn uitgevoerd met het Chiroptera 4X Bathymetrische en Topografische LiDAR systeem en niet, zoals oorspronkelijke gepland, met het Hawkeye-3 systeem.
Rond 21 oktober werd duidelijk dat de weersomstandigheden vanaf 29 oktober waarschijnlijk gunstig zouden zijn voor het uitvoeren van de metingen.
Helaas bleek dat het vliegtuig dat gebruikt wordt voor het Hawkeye-3 systeem een motorprobleem had. Dit probleem kon niet tijdig opgelost worden, waardoor dat systeem niet kon worden ingezet. Wel was het mogelijk om de metingen uit te voeren met het nieuwe Chiroptera 4X systeem. Voor dit systeem kan een vliegtuig met 1 camera gat worden gebruikt (voor de Hawkeye-3 zijn 2 gaten nodig). Dit vliegtuig kon worden ingehuurd.
Door Leica/Hexagon is nogmaals bevestigd dat met het Chiroptera 4X systeem dezelfde of zelfs betere resultaten kunnen worden behaald. Dit omdat de beperkingen zitten in de troebelheid van het water en niet in de diepte.
Besloten is gebruik te maken van de gunstige weersomstandigheden en de vluchten uit te voeren met het Chiroptera 4X systeem.
De verwerkingssoftware en verwerking van de data is bij beide systemen gelijk.

2 Vluchtuitvoering

2.1 Systeem en vliegtuig: Chiroptera 4X in Partenavia P68

Het Chiroptera 4X systeem is opgebouwd uit de volgende systeemcomponenten:

- Een 500 kHz topografische Laserscanner;
- Een 140 kHz bathymetrische scanner voor dieptes tot 1.5 Secchi diepte;
- Een 80 MPixel medium format digitale RGBN-camera (Leica RCD 30).

De specificaties van het systeem zijn beschreven in de rapportage “vliegplan en verwerkingsplan” en bijgevoegd in de appendix van deze rapportage. Figuur 1 laat het systeem zien, zoals geïnstalleerd in het survey vliegtuig, een Partenavia P68

Figuur 1. Chiroptera 4X geïnstalleerd in het meetvliegtuig (Partenavia P68)

2.2 Vluchtuitvoering

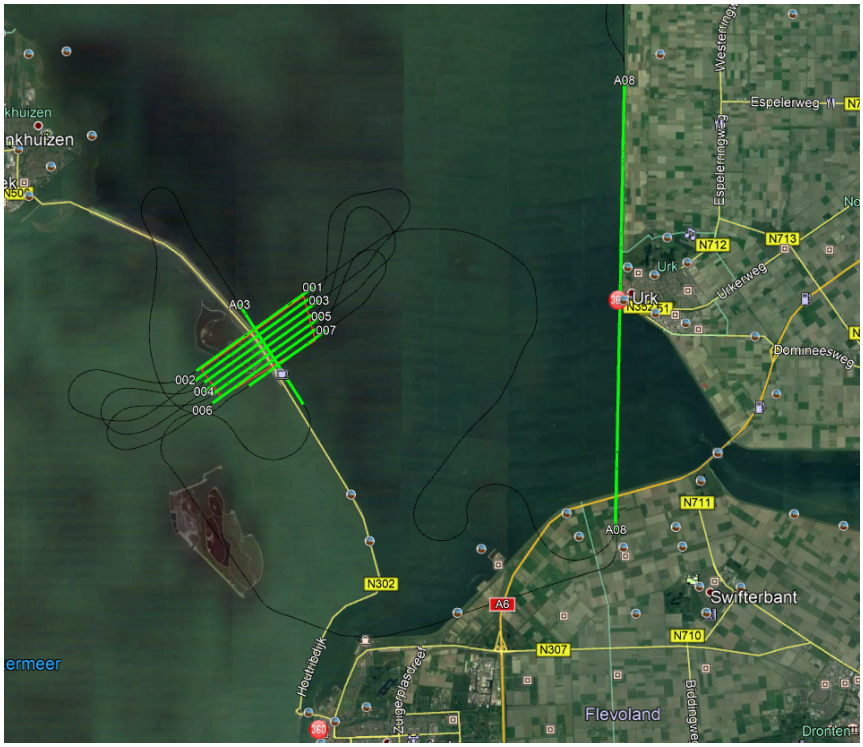
De vluchten zijn uitgevoerd op 30 oktober 2019 tussen 10:45 en 16:08 UTC.
De luchthaven van Groningen (EHGG) is als basis gebruikt. Als eerste zijn de vluchten over het gebied Houtribdijk uitgevoerd met als basisstation URK. Tevens is hier een teststrook gevlogen van ongeveer 16 km over de Westermeerdijk, het IJsselmeer voor Urk tot aan de noordkant van Flevoland.
Om te zorgen dat het Waddenzeegebied zo goed mogelijk gedurende laagwater gevlogen kon worden is deze vlucht het tweede deel van de dag uitgevoerd. Hier is als basisstation Ballum gebruikt, midden in het gebied.
De exacte vluchttijden waren als volgt:

- Take-off EHGG: 11:29
- Vlucht Houtribdijk: 12:11-12:53
- Vlucht Waddenzee: 13:39-17:08
- Landing EHGG: 17:12

Figuur 2 toont het complete gevlogen traject.

Figuur 2. Het gevlogen traject

De vlieglijnen over het testgebied Houtribdijk en de teststrook over Urk zijn in Figuur 3 aangegeven.



Figuur 3. Vlieglijnen houtribdijk en teststrook Urk

Figuur 4 en Figuur 5 laten een paar foto-impressies zien van het testgebied Houtribdijk vanuit de lucht.

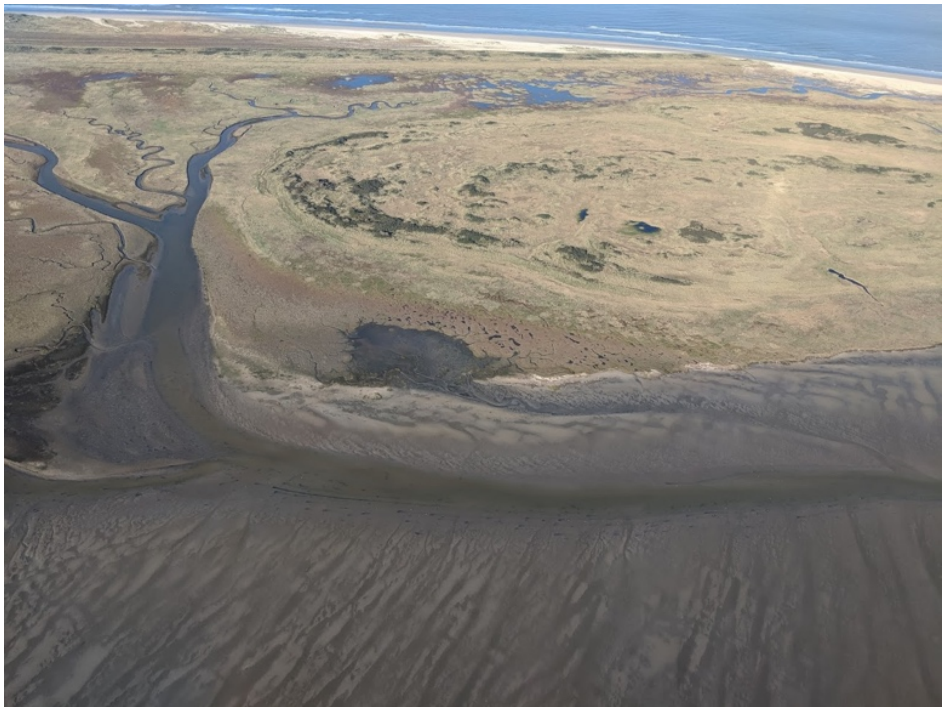
Figuur 4. Houtribdijk.

Figuur 5. Houtribdijk

In Figuur 6 zijn de vlieglijnen over het testgebied Ameland aangegeven.

Figuur 6. Vlieglijnen testgebied Ameland.

Hieronder zijn een paar foto-impressies van het testgebied Ameland vanuit de lucht te zien (Figuur 7, Figuur 8, Figuur 9).



Figuur 7. Ameland.

Figuur 8. Ameland.

Figuur 9. Ameland.

2.3 Weer en omgevingscondities tijdens de vlucht

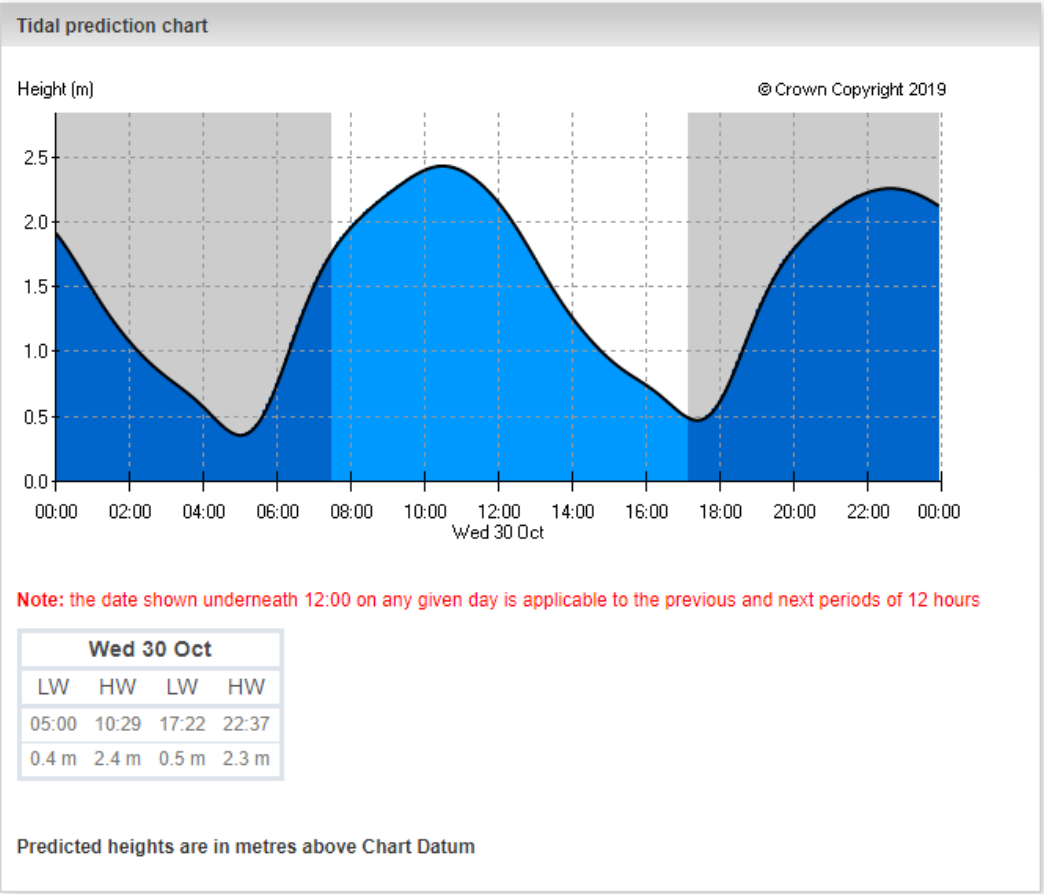
De timing voor de vluchten was gunstig. De wind was zwak tot matig (2-3 Bft.) en kwam voor de tweede achtereenvolgende dag vanuit het zuidoosten (vanaf land). Er waren nauwelijks golven. Kortom goede condities voor minimaal zwevend stof en potentieel helder water.

De vliegcondities waren ook zeer gunstig, geen significante wolken, matige wind en nauwelijks turbulentie.

Vanuit de lucht was duidelijk te zien dat het water in beide gebieden meestal bruin van kleur was met af en toe strepen groen water. Slechts op een paar kleinere, zeer ondiepe plaatsen was de zeebodem van bovenaf zichtbaar.

Tijdens de vlucht kon door de operator worden geconstateerd dat de ontvangen lasersignalen een hoge mate van verstrooiing lieten zien, als gevolg van de troebelheid van het water. Het aantal reflecties van de zeebodem dat de operator tijdens de vlucht kon waarnemen was daardoor zeer beperkt.

De vlucht over het Waddengebied is uitgevoerd bij afnemend tij van 1.5-0.5 m. Figuur 10 laat het verloop van het getij op de dag van de metingen zien.



Figuur 10. Het verloop van het getij tijdens de uitvoering van de vluchten.

De weersomstandigheden tijdens de vlucht zijn in Tabel 1 aangegeven.

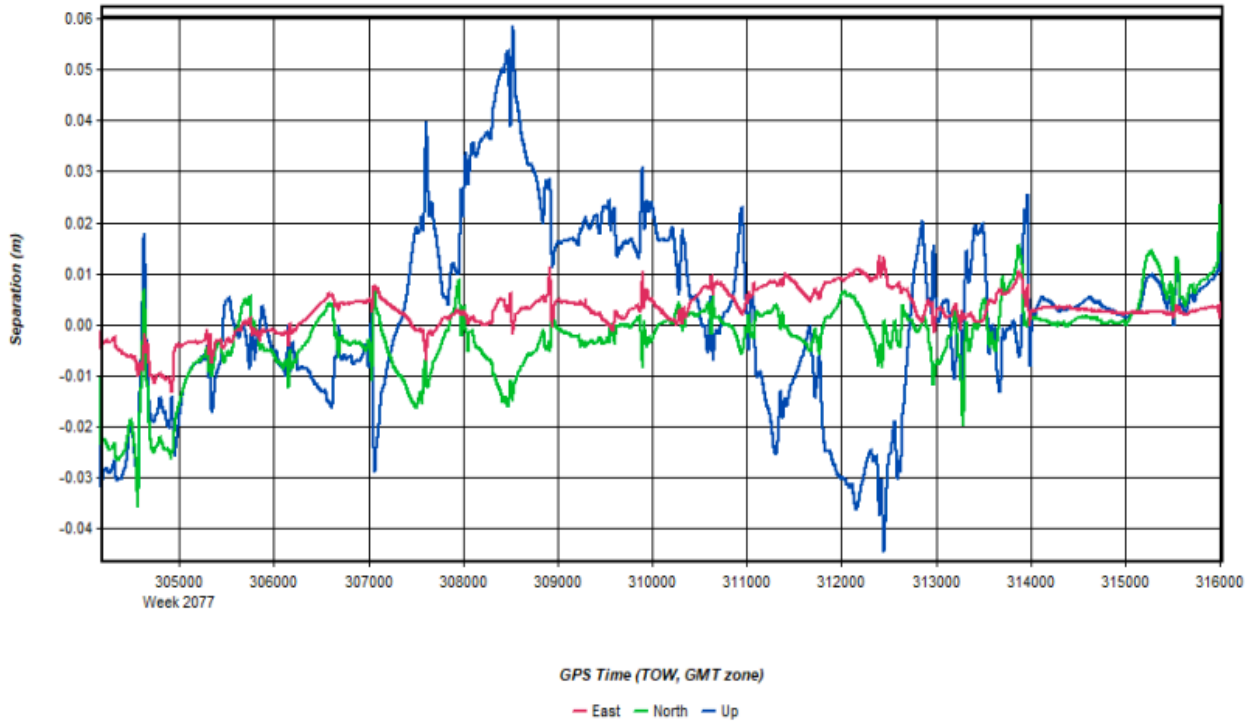
Tabel 1. De weersomstandigheden tijdens de uitvoering van de vluchten.

Local date	**Wednesday, Oct 30**							
Local time	01	04	07	10	13	16	19	22
Wind direction								
Wind speed (kts)	12	12	12	13	12	13	15	15
Wind gusts (max kts)	13	13	13	14	13	13	16	16
Cloud cover								
Precipitation type								
Precipitation (mm / 3h)								
Air temperature (°C)	9	8	8	8	9	9	9	8
Air pressure (hPa)	1030	1029	1030	1030	1029	1028	1028	1028
Wave direction								
Wave height (m)	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8
Wave period (s)	7	7	7	7	7	7	7	7
Tide type								
Time		04:01		10:03		16:24		22:25
Tide height (m)	1.3	0.2	1.7	2.5	1.5	0.3	1.6	2.4

3 Resultaten van de dataverwerking

3.1 De trajectberekening

De nauwkeurige positie en stand van het vliegtuig tijdens de vlucht is berekend met het softwarepakket *Inertial Explorer* van Novatel. De bereikte nauwkeurigheid is bepaald uit de resultaten van de vereffening van een geintegreerde berekening met DGPS en IMU-gegevens en metingen naar meerdere satellieten. De nauwkeurigheid was ruim binnen de specificaties van +/- 5 cm. Figuur 11 laat een voorbeeld zien.



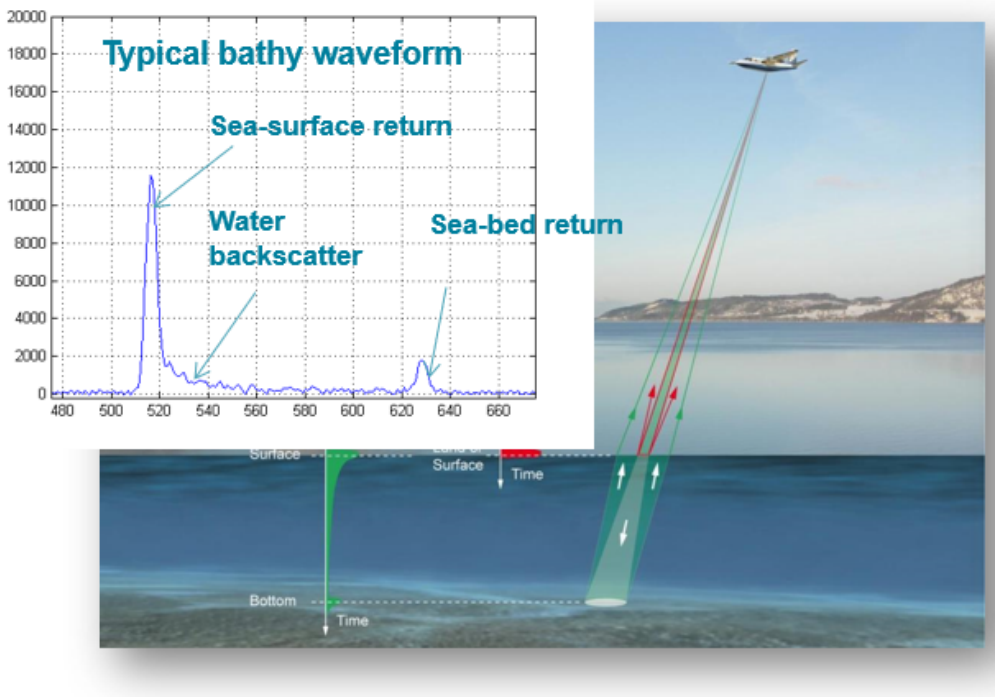
Figuur 11. Nauwkeurigheid van de positie berekening (rood: easting, groen: north, blauw: hoogte).

3.2 De Full waveform processing

Het programma LiDAR Survey Studio (LSS 2.5) is gebruikt voor de berekening van de puntenwolk en de eerste verificatie van de “full-waveform” informatie. De troebelheid van het water en daardoor hoge mate van backscatter maakt het gebied erg complex voor de verwerking van de data. Het bleek noodzakelijk om de “treshold” instellingen lokaal aan te passen om zo optimaal mogelijk de “full-waveform the kunnen extraheren.
Voor de verdere verwerking, de data cleaning, de classificatie en het vervaardigen van de eindproducten is het programma TerraScan gebruikt.
Een uitgebreidere beschrijving van de verwerkingsstappen is te vinden in de de rapportage: “vlieg- en verwerkingsplan d.d. 19 april 2019”

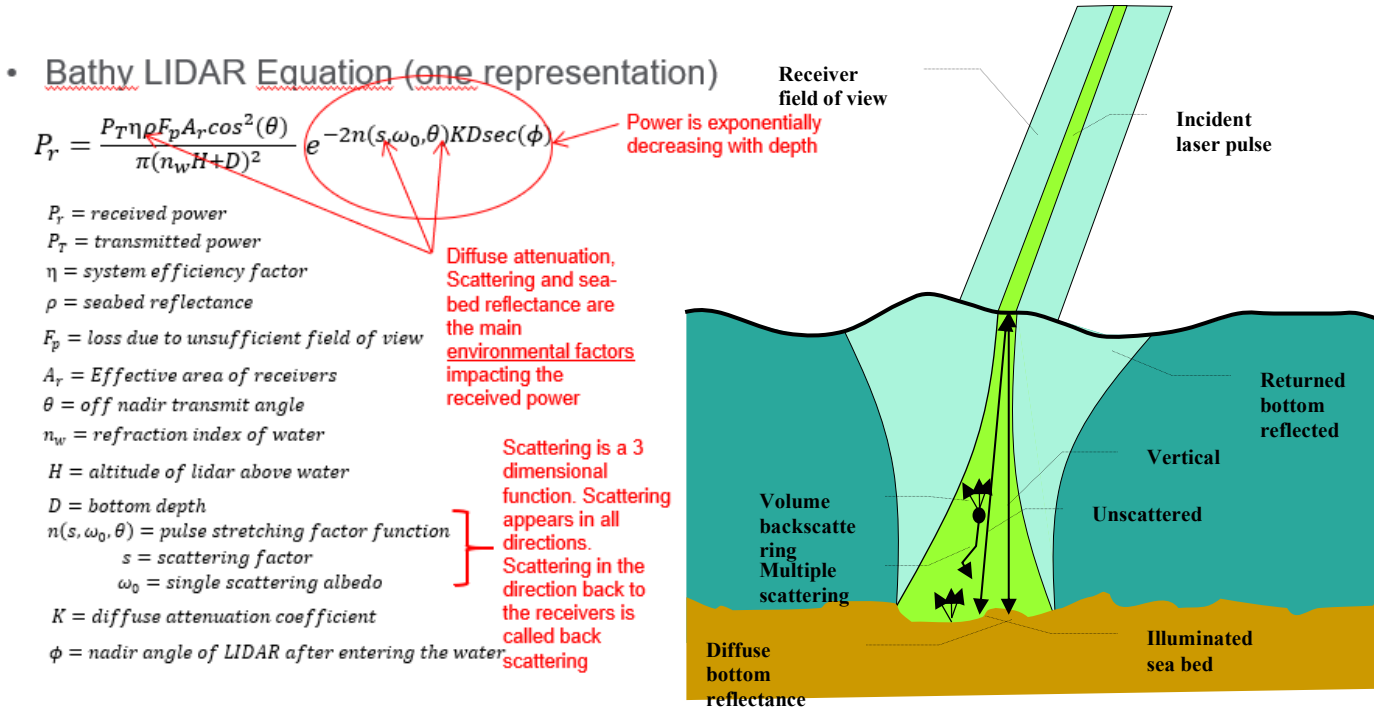
Figuur 12 laat een typische bathymetrische waveform zien, met een duidelijke piek bij het return signaal van het wateroppervlakte, een zwak signaal van backscatter van deeltjes in het water en een sterk return signaal van de onderwaterbodem.

Dit type return signaal kan worden verwacht bij goede watercondities.



Figuur 12. Typische bathymetrische waveform bij gunstige watercondities.

De formule in Figuur 13 beschrijft hoe de belangrijkste "omgevingsfactoren" (de helderheid van het water, de scattering factor en de reflectie van de bodem) de sterkte van het terugontvangen signaal beïnvloeden.



Figuur 13. Belangrijkste omgevingsfactoren.

In de verwerking zijn de returns van het bathymetrische signaal onderverdeeld in twee verschillende categorieën:

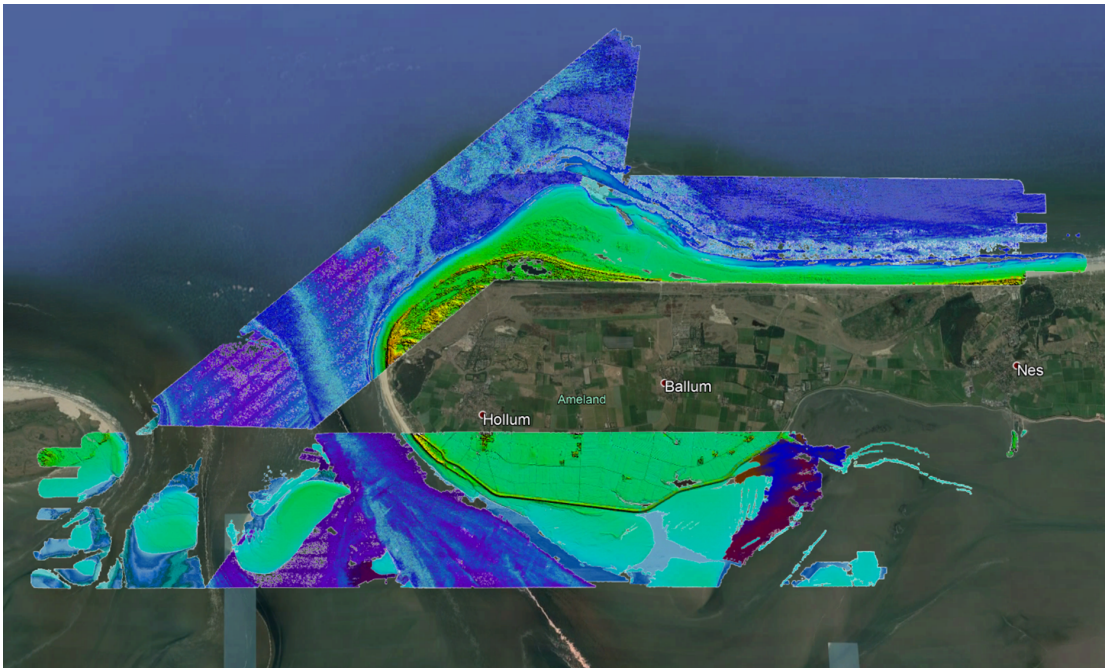
- Resultaten met hoge mate van betrouwbaarheid (“higher confidence”)
- Resultaten met lage mate van betrouwbaarheid (“lower confidence”)

Van de bathymetrische resultaten met de klasse “higher confidence” kan met zekerheid gezegd worden dat het om bodemreflecties gaat. Bij de resultaten met “lower confidence” gaat het waarschijnlijk niet om returns van de bodem, maar om sterke backscatter.

3.3 De resultaten

3.3.1 Projectgebied Waddenzee

Het resultaat van alle returnsignalen voor het projectgebied over Ameland is in Figuur 14 weergegeven. De kleuren geven hoogte/dieptewaarden weer (bruin -> geel -> groen: topografische hoogtes; lichtblauw -> paars: toename van de diepte).

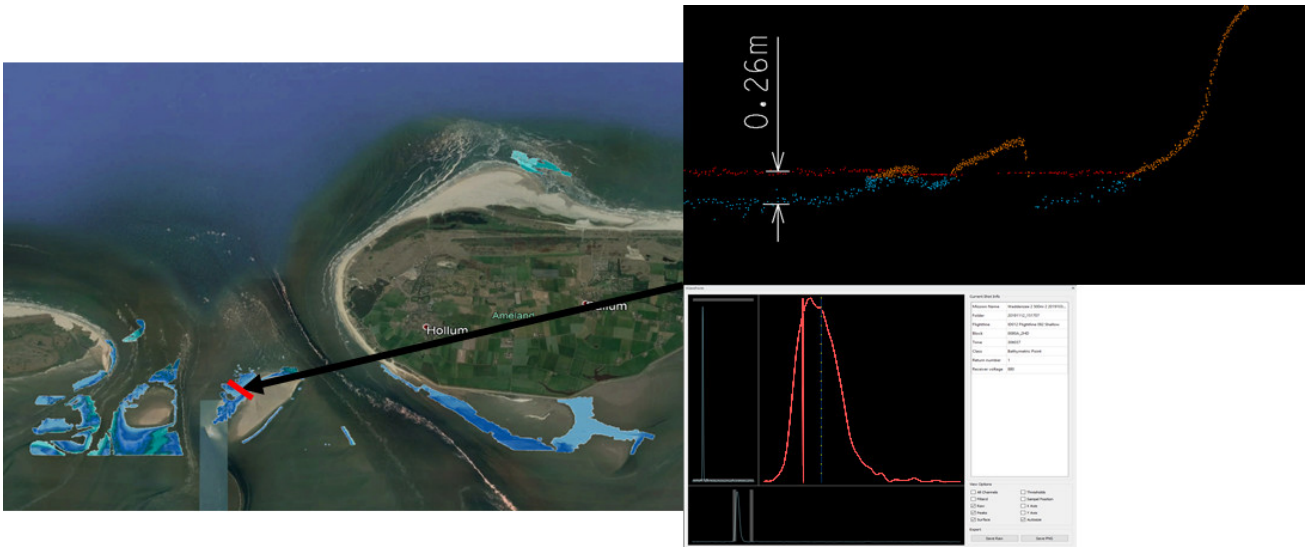


Figuur 14. Resultaat van alle returnsignalen (topografisch en bathymetrisch).

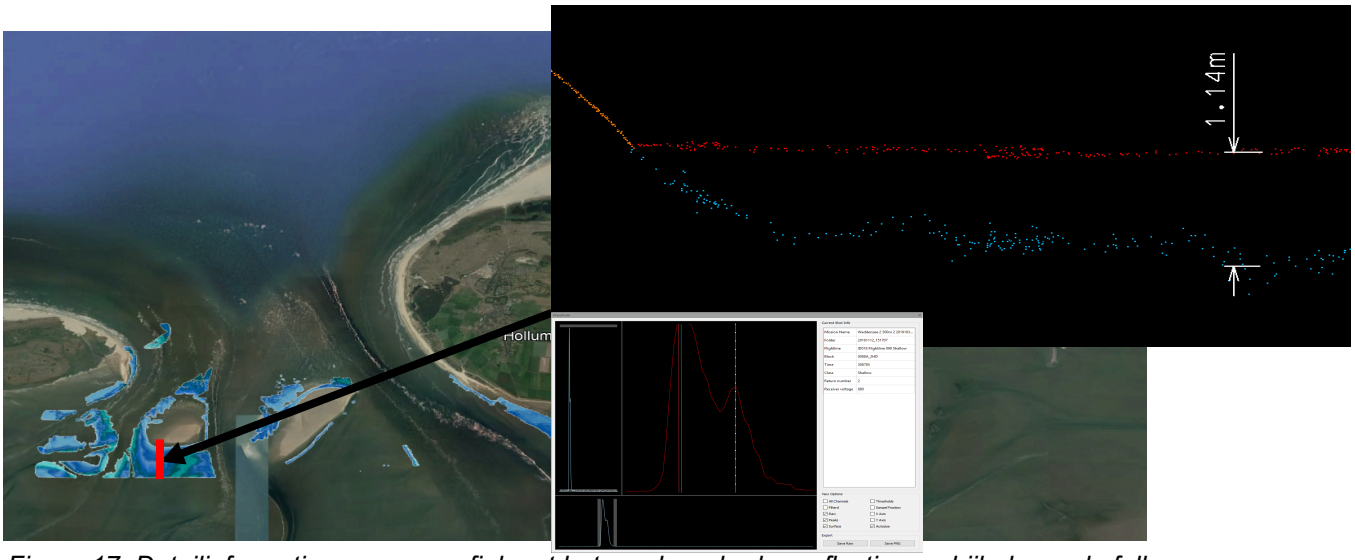
Het resultaat van alle bathymetrische returnsignalen die met hoge mate van betrouwbaarheid als correcte bodemreflecties zijn geclassificeerd, zijn in Figuur 15 weergegeven. Duidelijk is dat dit slechts een zeer beperkt deel van het totale gebied betreft.

Figuur 15. Resultaat van returnsignalen met betrouwbare bodemreflecties (lichtblauw diepte: 0-0,25m; donkerblauw dieptes: 0,25 m tot 1,20m)

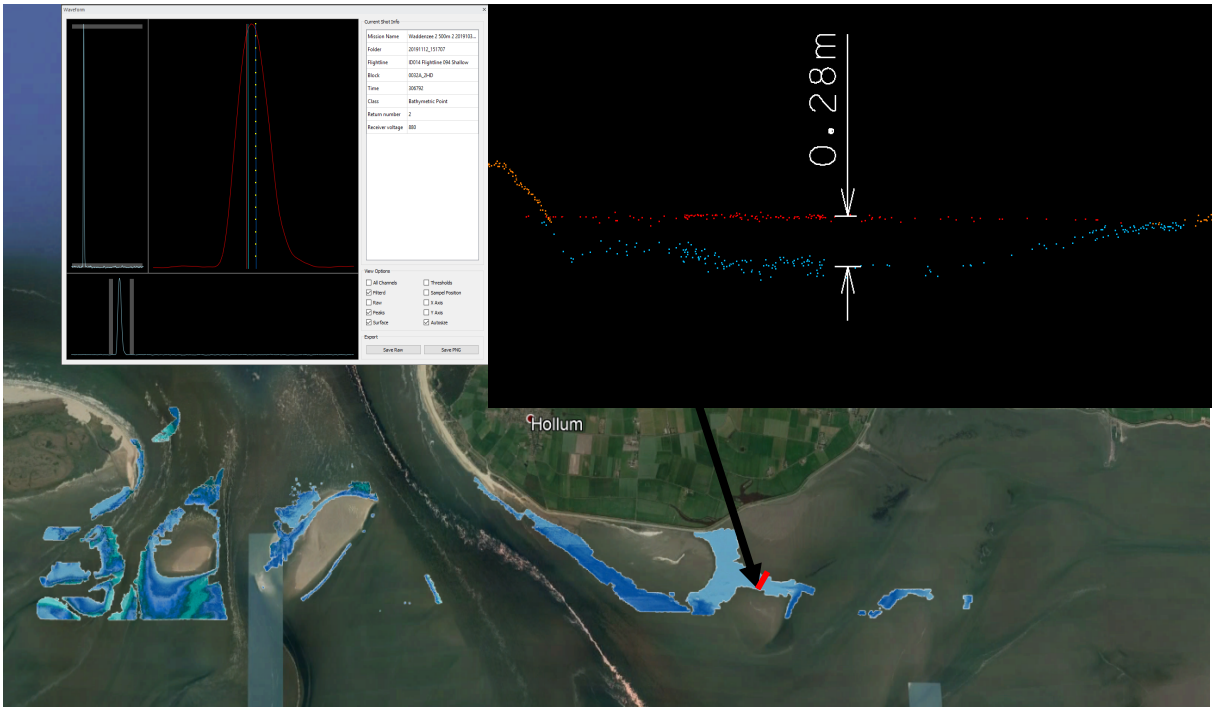
Figuur 16, Figuur 17 en Figuur 18 laten de details zien van een aantal profielen in deze gebieden. In blauw de onderwaterbodem, in rood het wateroppervlak en in oranje alles boven water. De getallen geven een gemiddelde diepte weer.



Figuur 16. Detailinformatie van een profiel met betrouwbare bodemreflecties en bijbehorende full wave form informatie.



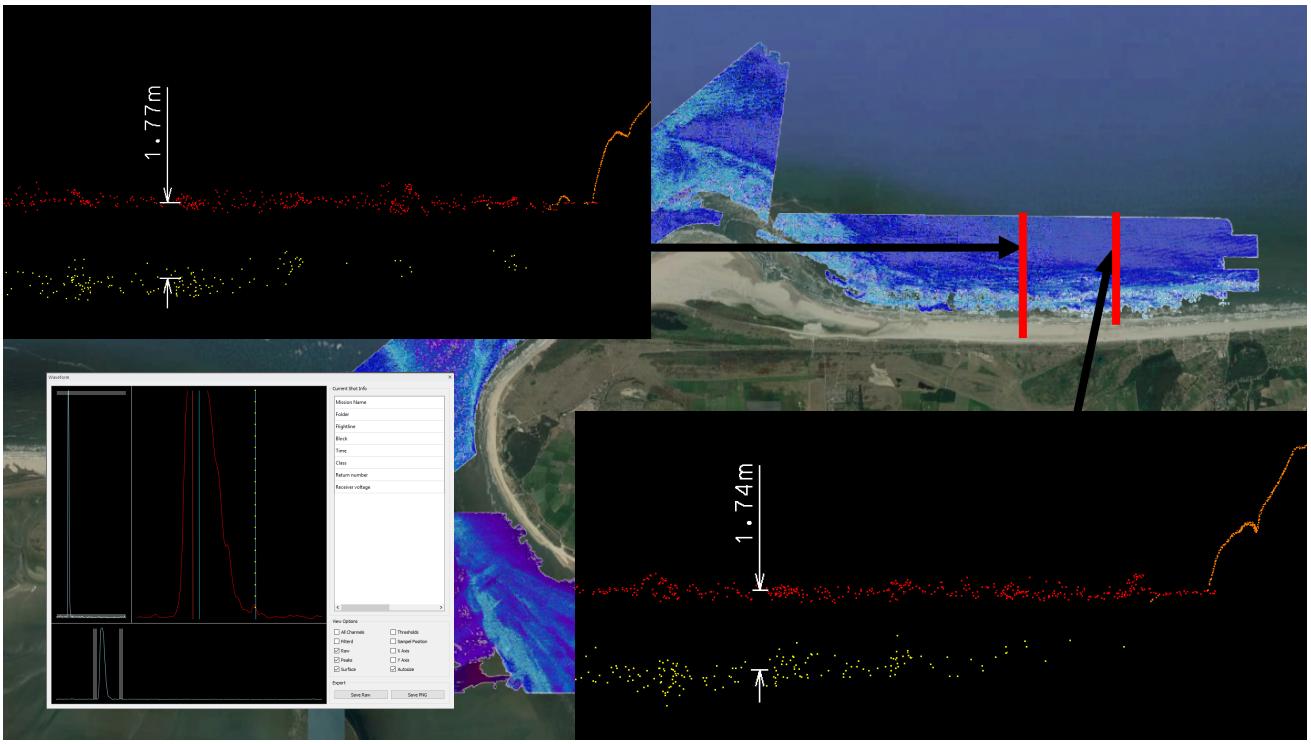
Figuur 17. Detailinformatie van een profiel met betrouwbare bodemreflecties en bijbehorende full wave form informatie.



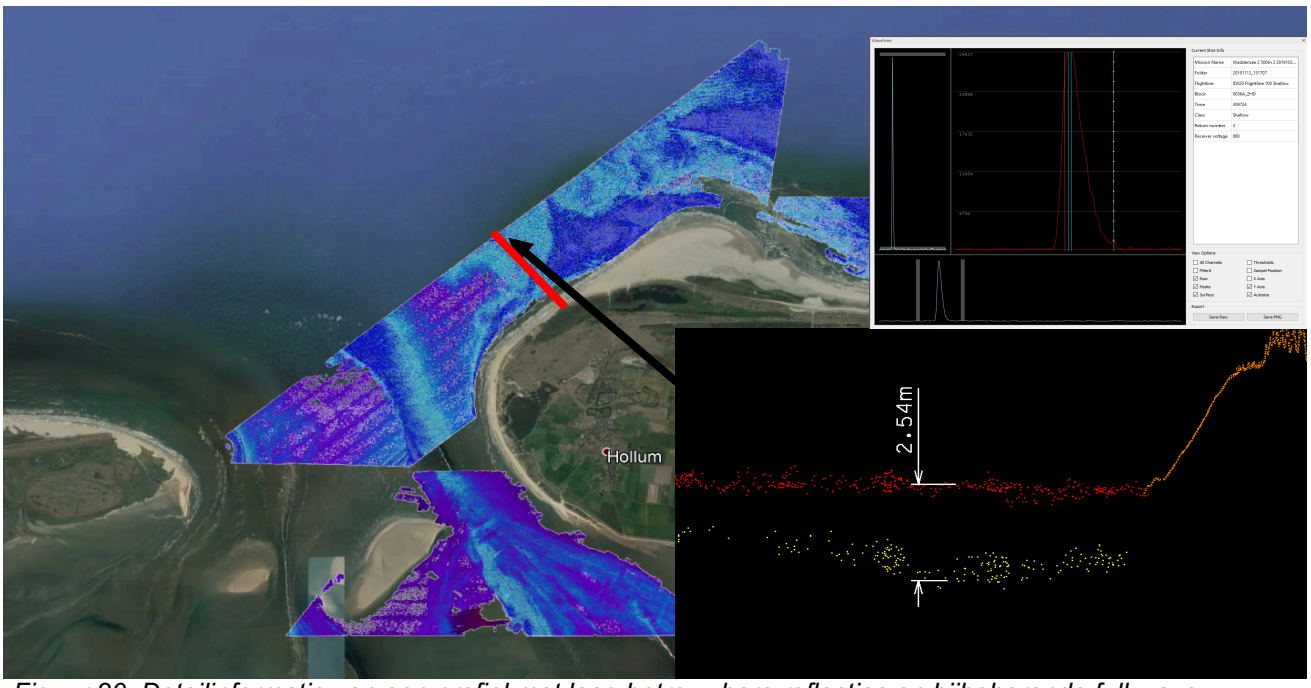
Figuur 18. Detailinformatie van een profiel met betrouwbare bodemreflecties en bijbehorende full wave form informatie.

De figuren laten zien dat als betrouwbaar geclassificeerde bathymetrische laserinformatie verkregen wordt voor dieptes tot ruim 1 meter, met name rondom de wadplaten.

Figuur 19 en Figuur 20 laten de details zien van een aantal profielen in gebieden waar de bathymetrische return signalen als laag betrouwbaar zijn geclassificeerd. Er is een duidelijk verschil te zien in de wave-form informatie in vergelijking met de voorbeelden uit de gebieden met betrouwbare bodemreflecties. In rood de metingen van het wateroppervlak in geel de laag betrouwbare bathymetrische return signalen.



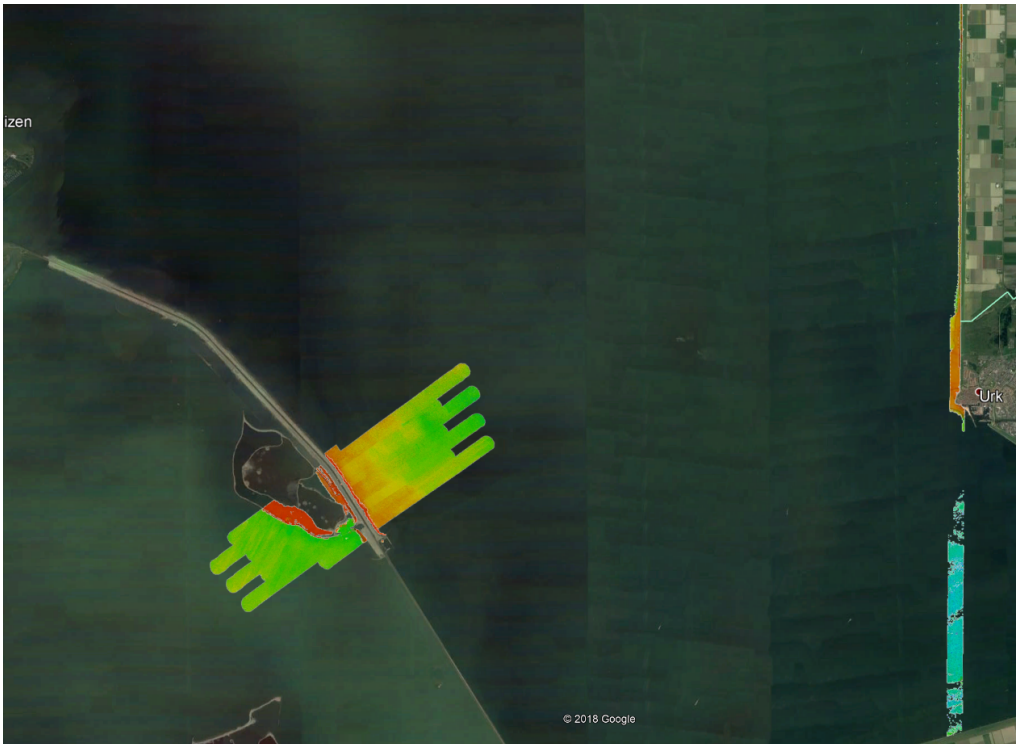
Figuur 19. Detailinformatie van een profiel met laag betrouwbare reflecties en bijbehorende full wave form informatie.



Figuur 20. Detailinformatie van een profiel met laag betrouwbare reflecties en bijbehorende full wave form informatie

3.3.2 Projectgebied Houtribdijk

Het resultaat van alle returnsignalen voor het projectgebied Houtribdijk is in Figuur 21 weergegeven.

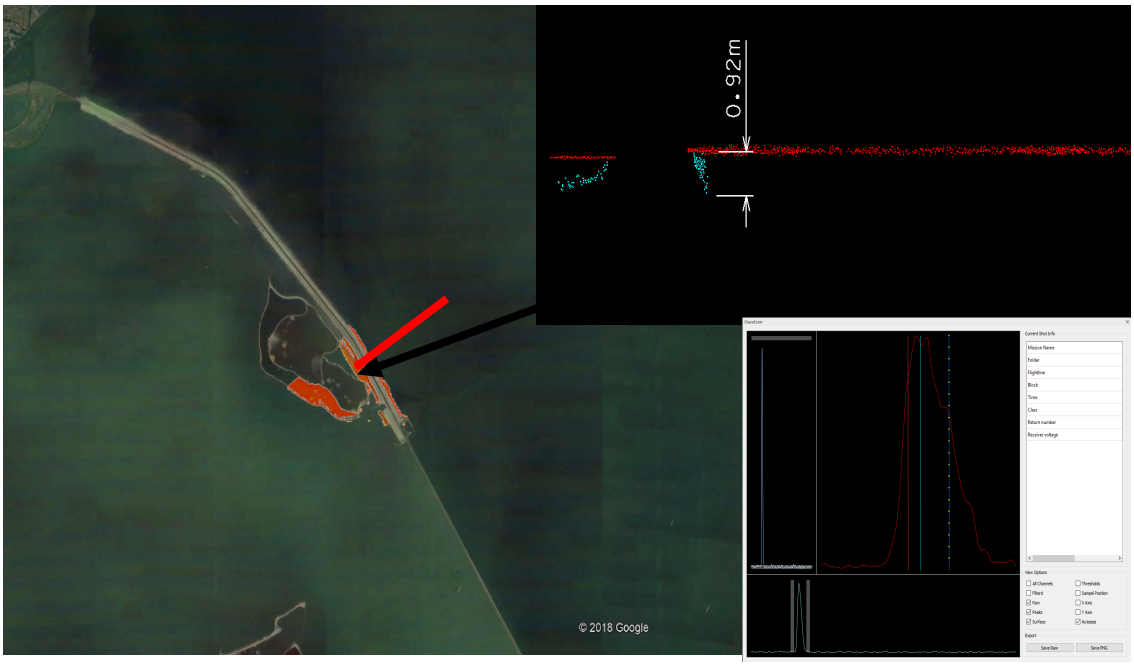


Figuur 21. Resultaat van alle bathymetrische returnsignalen voor het projectgebied Houtribdijk.

Het resultaat van alle bathymetrische returnsignalen die met hoge mate van betrouwbaarheid als correcte bodemreflecties zijn geclassificeerd, zijn in Figuur 22 weergegeven.

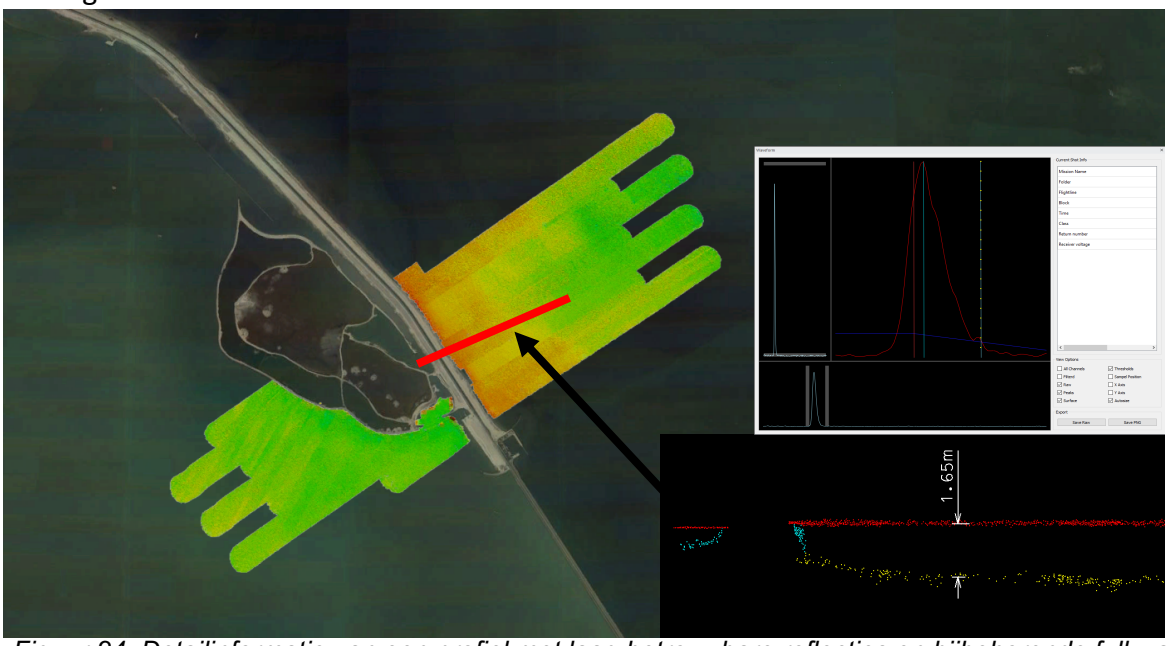
Figuur 22. Resultaat van returnsignalen met betrouwbare bodemreflecties.

Figuur 23 laat de details zien van een aantal profielen in deze gebieden.

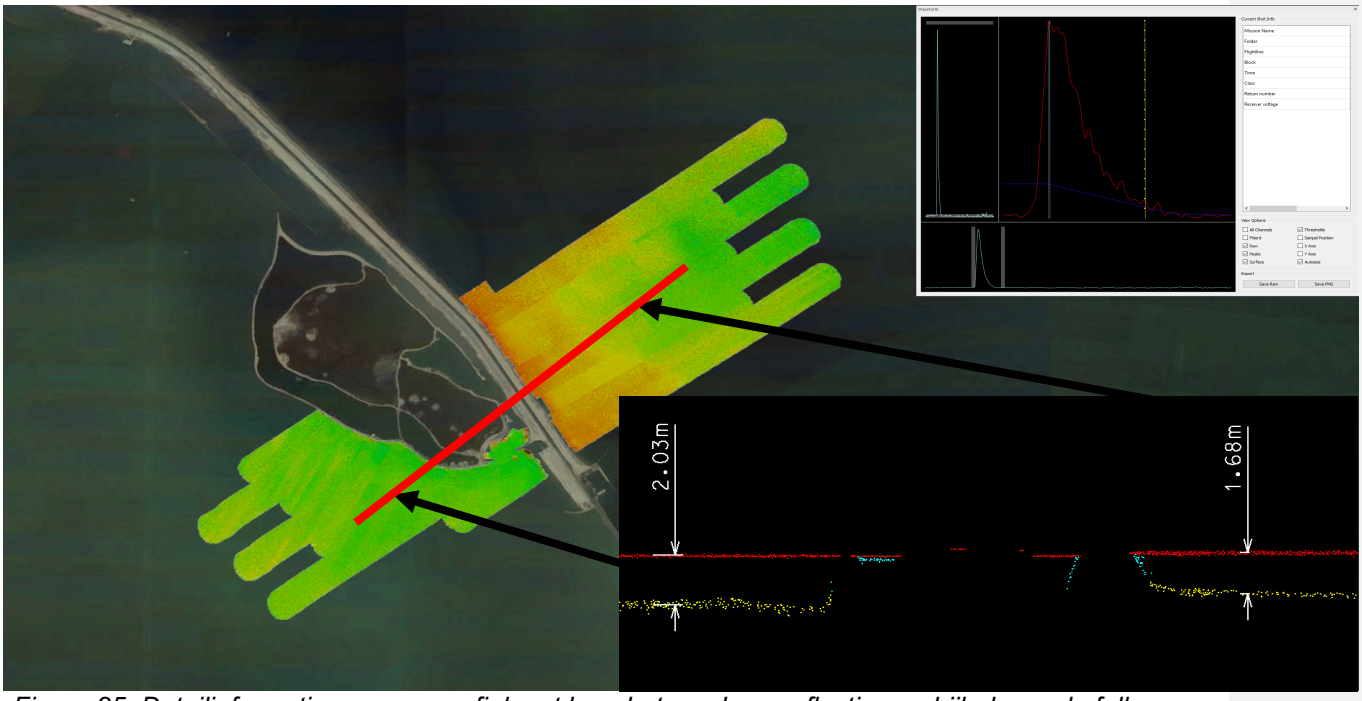


Figuur 23. Detailinformatie van een profiel met betrouwbare bodemreflecties en bijbehorende full wave form informatie.

Figuur 24 en Figuur 25 laten de details zien van een aantal profielen in gebieden waar de bathymetrische return signalen voor een deel als laag betrouwbaar zijn geclassificeerd. Er is een duidelijk verschil te zien in de wave-form informatie in vergelijking met de voorbeelden uit de gebieden met betrouwbare bodemreflecties.



Figuur 24. Detailinformatie van een profiel met laag betrouwbare reflecties en bijbehorende full wave form informatie.



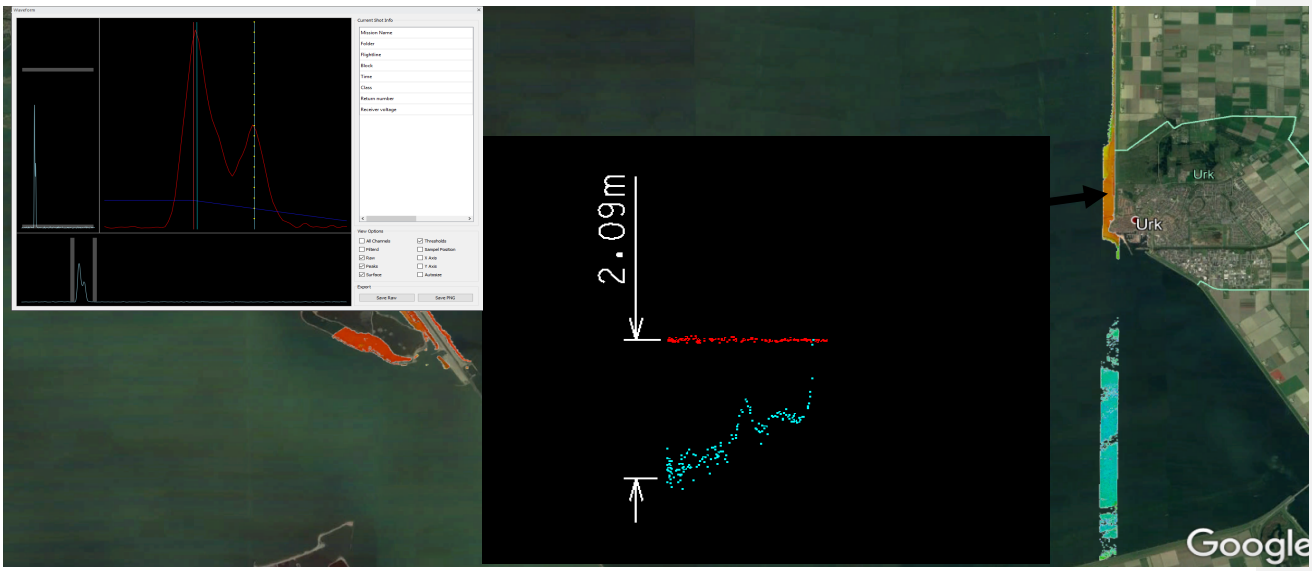
Figuur 25. Detailinformatie van een profiel met laag betrouwbare reflecties en bijbehorende full wave form informatie.

3.3.3 Baseline Urk

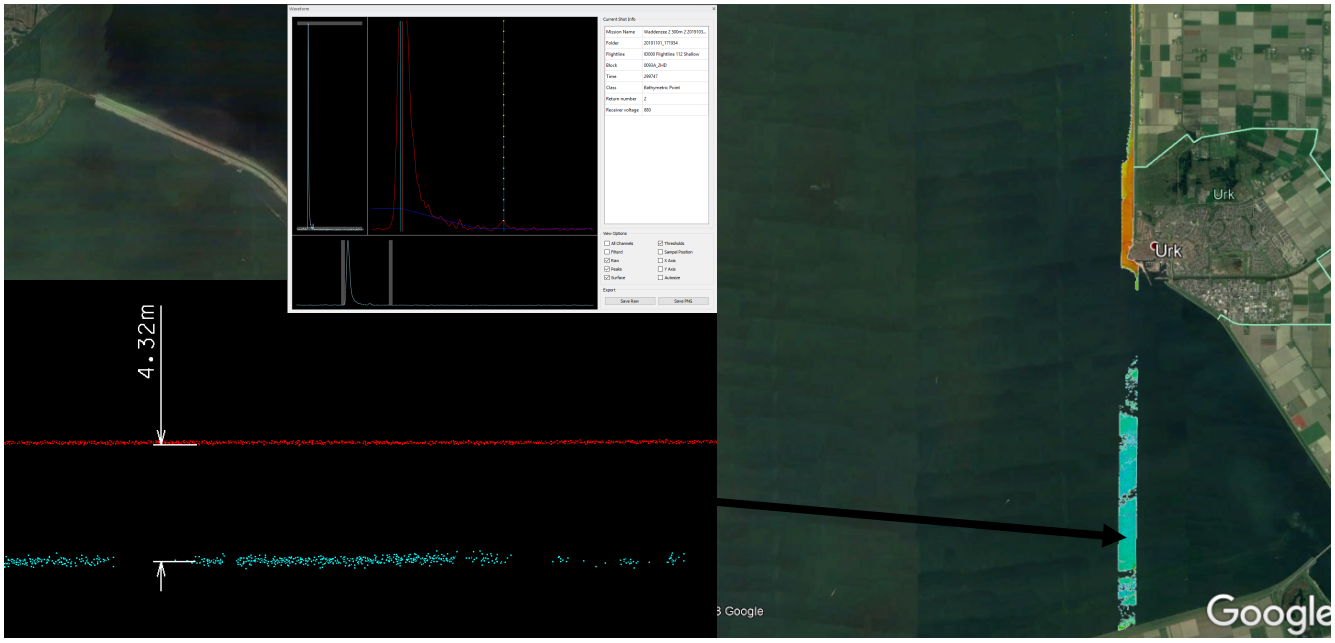
Tijdens de vlucht van de 16 km lange teststrook over Urk, de kust voor Urk en het IJsselmeer zuidelijk van Urk, waren goede bodemreflecties zichtbaar. Na verwerking van de data werd dit bevestigd. Oorzaak is de goede waterkwaliteit/doorzicht aan deze kant van het IJsselmeer. Dit is waarschijnlijk veroorzaakt door de aflandige wind tijdens en de dag voor de uitvoering van de vlucht.

De resultaten van de als betrouwbare bodemreflecties geclassificeerde data wordt in Figuur 26, Figuur 27 en Figuur 28 getoond.

heeft ver
Figuur 26



Figuur 26. Resultaat van returnsignalen met betrouwbare bodemreflecties.



Figuur 27. Resultaat van returnsignalen met betrouwbare bodemreflecties.

Figuur 28. Resultaat van returnsignalen met betrouwbare bodemreflecties

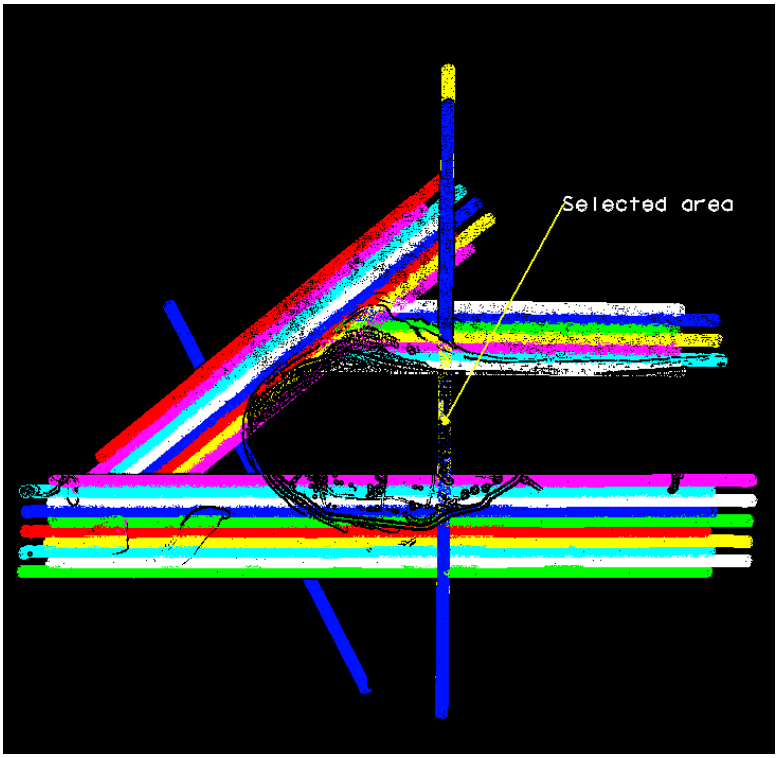
De complete dataset is als volgt geclassificeerd:

Class nummer en beschrijving
0 - Water oppervlak
2 - Grond
5 - Vegetatie en niet grond
6 - Gebouwen
9 - Bathymetrische resultaten “higher confidence level”
10-Bathymetrische resultaten “lower confidence level”

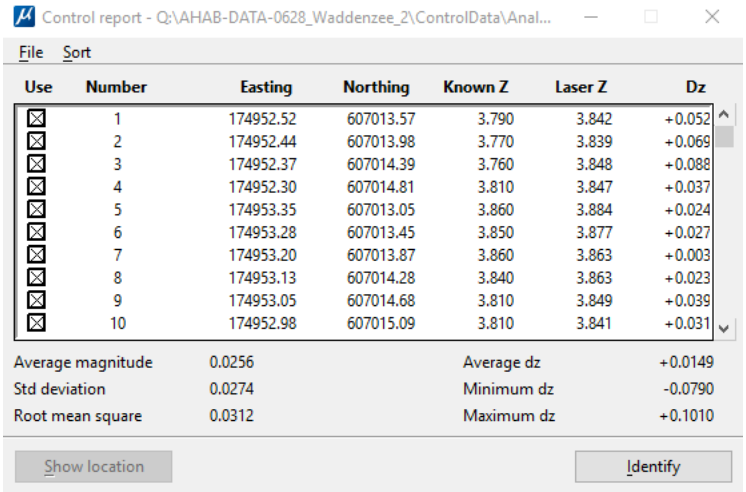
4 Vergelijk met referentie gegevens

4.1 Topografische LiDAR data

Op het moment van de verwerking waren er geen topografische controlepunten beschikbaar. Om de topografische kwaliteit te checken is daarom gebruik gemaakt van officiële 50 cm kadastrale topografische data. Uitgekozen is een klein gebied over een weg. Figuur 29, Figuur 30 en Figuur 31 laten de locatie van het referentiegebied zien en de verschillen tussen de berekende LiDAR data en de referentie data.



Figuur 29. Locatie van het referentiegebied: (X=174966.3059, Y=607323.8603).



Control report - Q:\AHAB-DATA-0628_Waddenzee_2\ControlData\Anal...

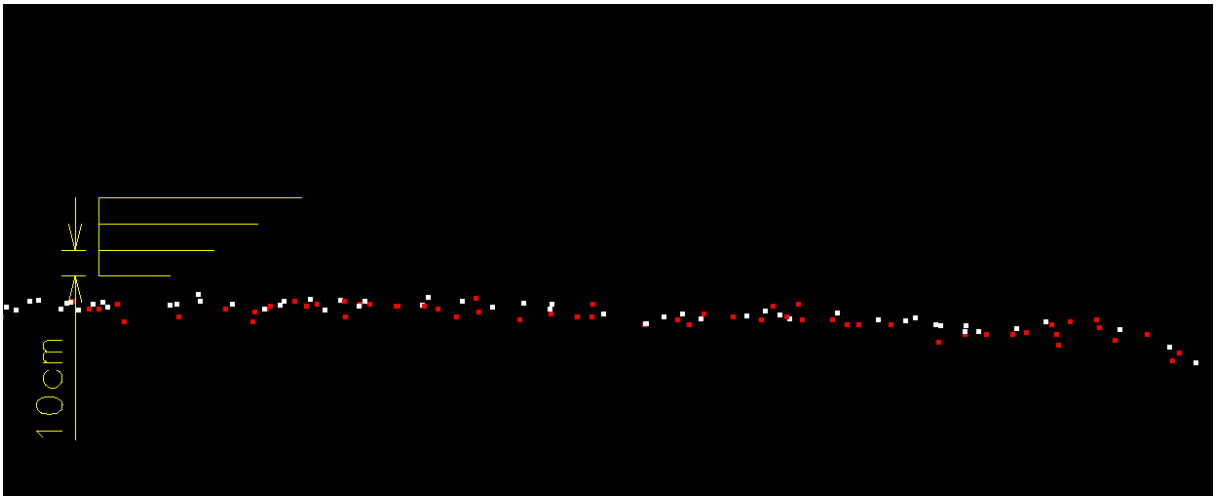
File Sort

Use	Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
☒	1	174952.52	607013.57	3.790	3.842	+0.052
☒	2	174952.44	607013.98	3.770	3.839	+0.069
☒	3	174952.37	607014.39	3.760	3.848	+0.088
☒	4	174952.30	607014.81	3.810	3.847	+0.037
☒	5	174953.35	607013.05	3.860	3.884	+0.024
☒	6	174953.28	607013.45	3.850	3.877	+0.027
☒	7	174953.20	607013.87	3.860	3.863	+0.003
☒	8	174953.13	607014.28	3.840	3.863	+0.023
☒	9	174953.05	607014.68	3.810	3.849	+0.039
☒	10	174952.98	607015.09	3.810	3.841	+0.031

Average magnitude	0.0256	Average dz	+0.0149
Std deviation	0.0274	Minimum dz	-0.0790
Root mean square	0.0312	Maximum dz	+0.1010

Show location Identify

Figuur 30. Verschillen tussen de topografische LiDAR en referentiedata.



Figuur 31. Verschillen tussen de topografische LiDAR metingen (wit) en referentie (rood).

4.1.1 Conclusie

Er is een zeer goede overeenkomst tussen topografische LiDAR data en de topografische referentie. Met een gemiddeld verschil van 1.5 cm en standaardafwijking die beter is dan 3 cm, bevestigt dit de hoge nauwkeurigheid van de topografische lasermetingen.

4.2 Bathymetrische LiDAR data

De resultaten van de bathymetrische lasermetingen zijn vergeleken met referentie datasets die door de opdrachtgever ter beschikking zijn gesteld.
De volgende twee paragrafen tonen de resultaten.

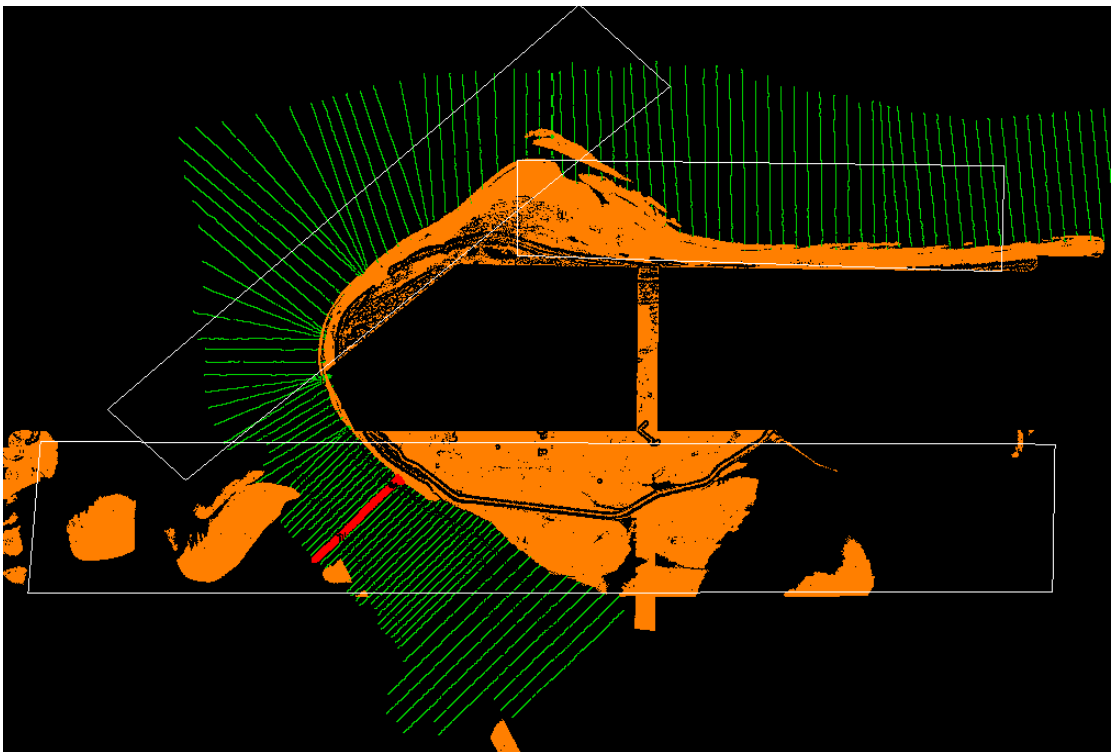
4.2.1 Projectgebied Waddenzee

Voor het projectgebied Ameland zijn Jarkusmetingen uit voorjaar 2019 beschikbaar en resultaten van een aparte meting aan de zuidwest kant van Ameland. Bij deze laatste meting is ook een gevalideerde puntenwolk geleverd van het deel dat met multibeam gemeten is.
De referentie datasets hebben volgende naamgeving:

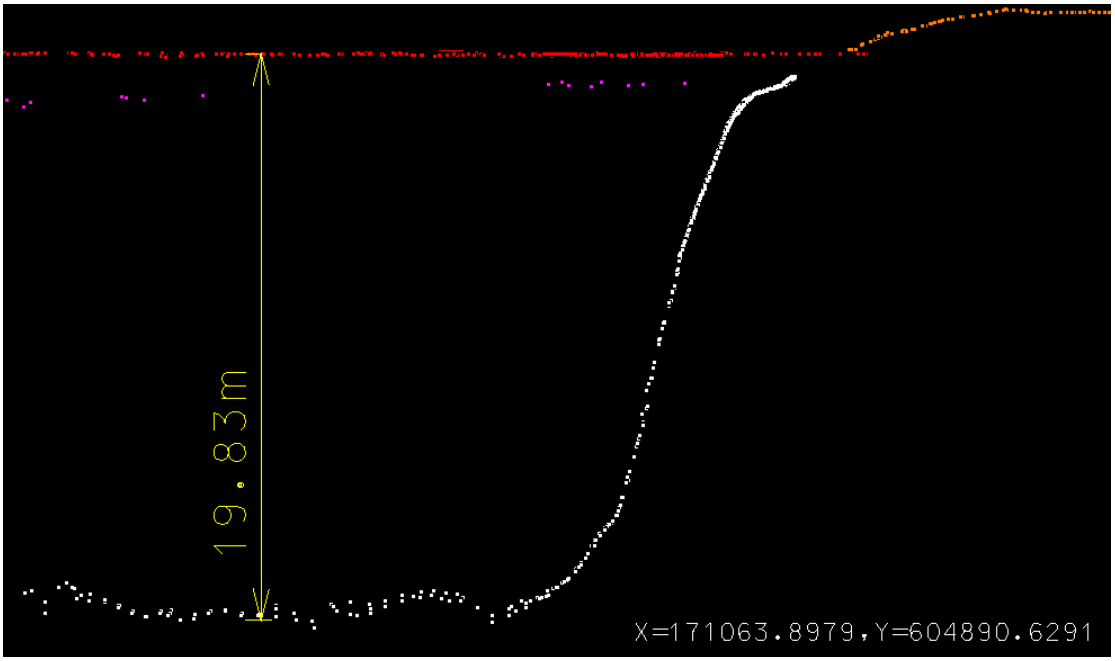
- 19NZE0118ml10_2_GP.txt
- Jarkus-VJ-2019_every100th.txt
- MO-NJ-2019_every100th.txt

De verschillen tussen de lasermetingen en de referentiedata zijn berekend en als verschilgrids (2 m cellen) en als .txt verschilbestanden als extra producten geleverd. Onderstaande figuren geven een representatief beeld van de resultaten, zoals die uit die vergelijkingen blijken, voor een aantal profielen.

Onderstaande figuren 32 en 33 laten het resultaat zien in een profiel over het gebied ten zuidwesten van Ameland, met dieptes tot 20 meter.
De bathymetrische lasermetingen zijn in de verwerking geclassificeerd als onbetrouwbaar. De reflecties zijn duidelijk niet afkomstig van de bodem, maar van een “layer” op een diepte van zo’n 2 meter.

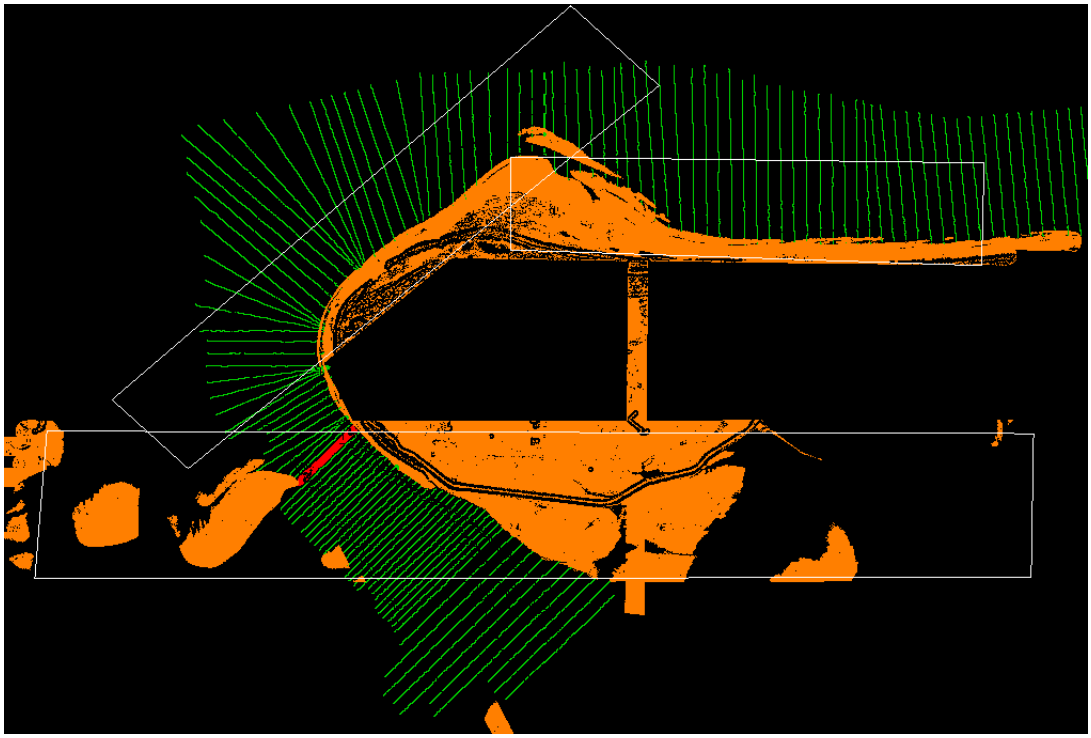


Figuur 32: de locatie van de referentieprofielen, met in rood een profiel dat voor de vergelijking is gebruikt.

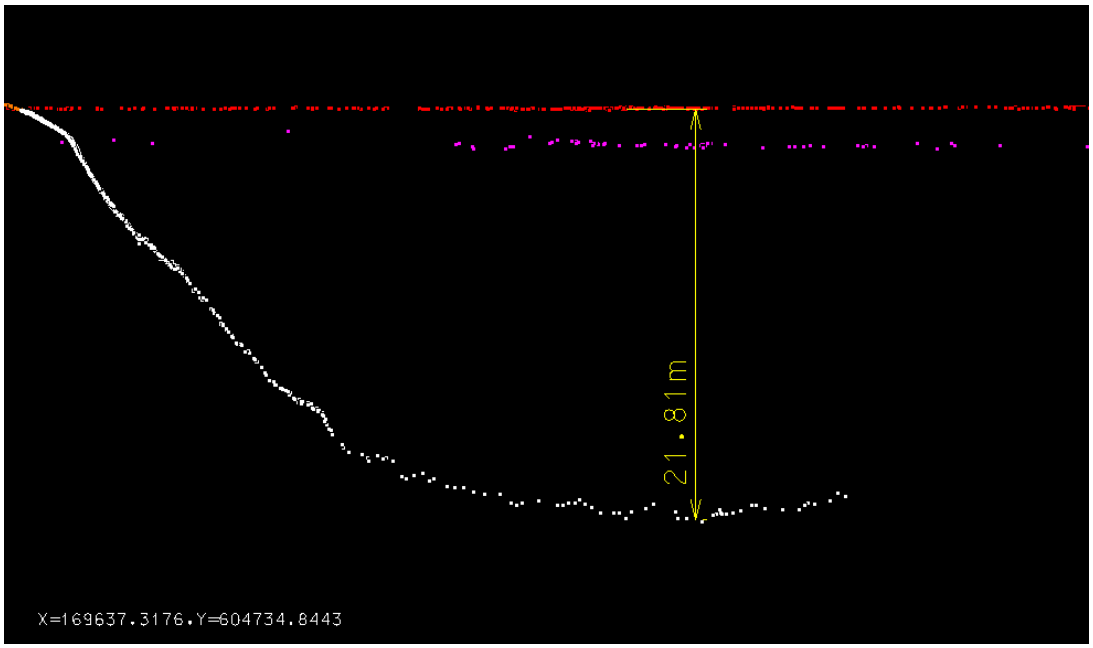


Figuur 33: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), de laag betrouwbare laserreflecties (paars) en de bodem uit Jarkusprofiel (wit)

De figuren 34 en 35 laten vergelijkbare resultaten zien voor een profiel in hetzelfde gebied.

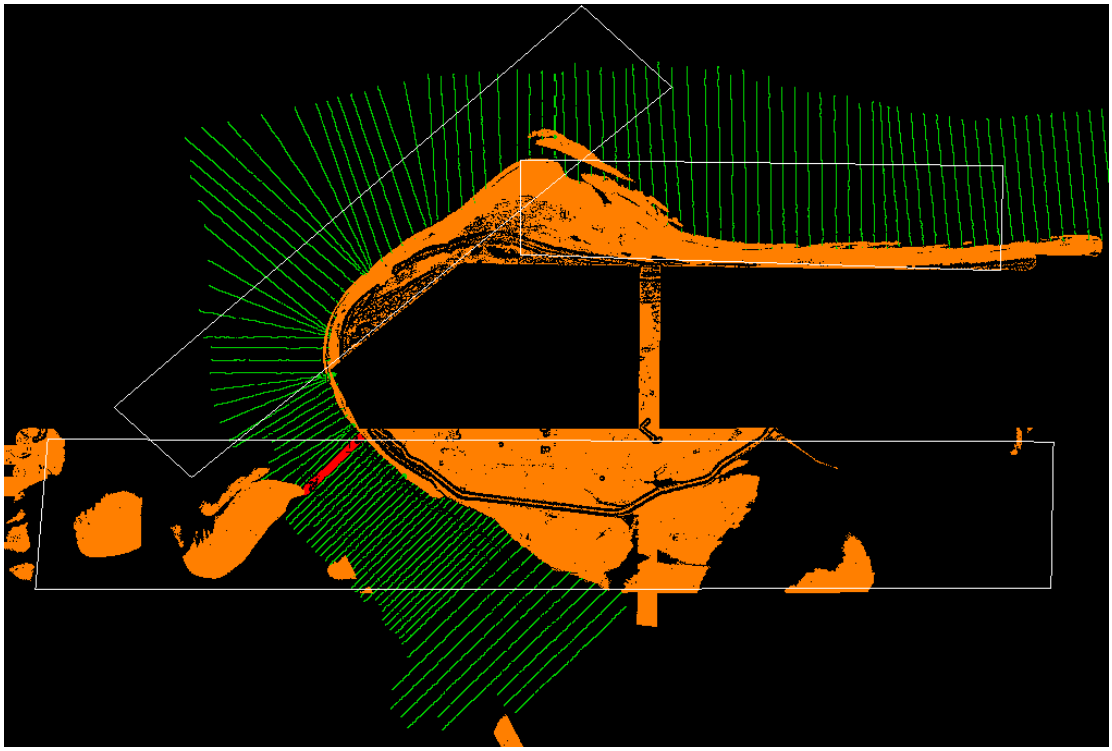


Figuur 34: de locatie van de referentieprofielen, met in rood een profiel dat voor de vergelijking is gebruikt.

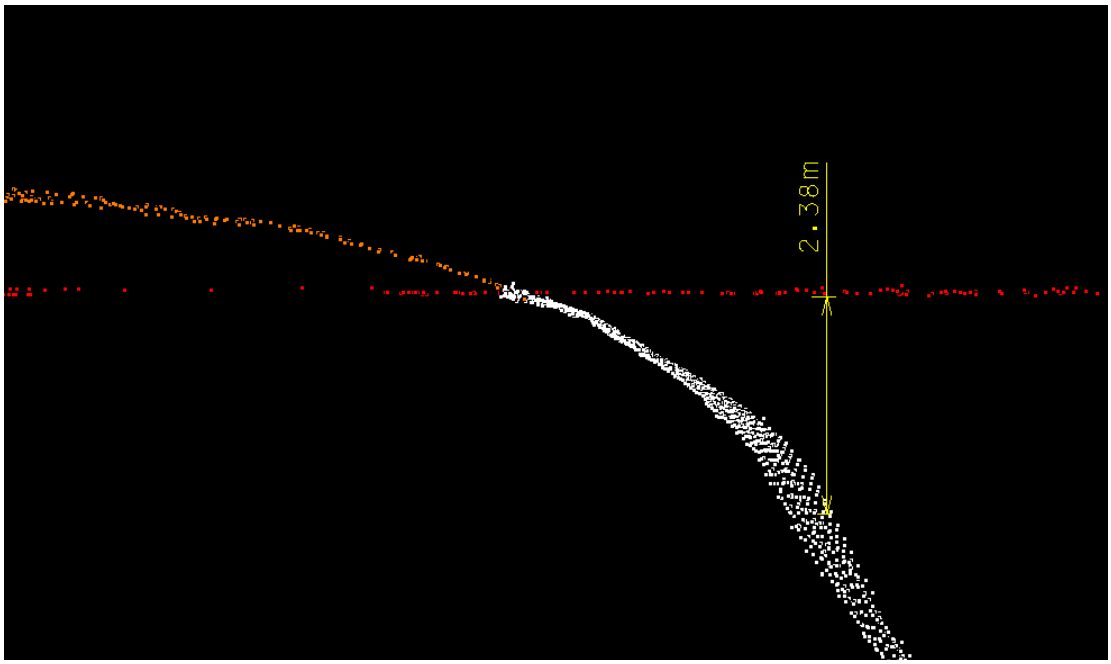


Figuur 35: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), de laag betrouwbare laserreflecties (paars) en de bodem uit Jarkusprofiel (wit)

Figuur 37 laat zien dat met de laser nauwkeurig het land en de overgang land/water wordt bepaald en goed aansluit op het Jarkus profiel. Betrouwbare metingen van de onderwaterbodem worden ook hier niet verkregen.

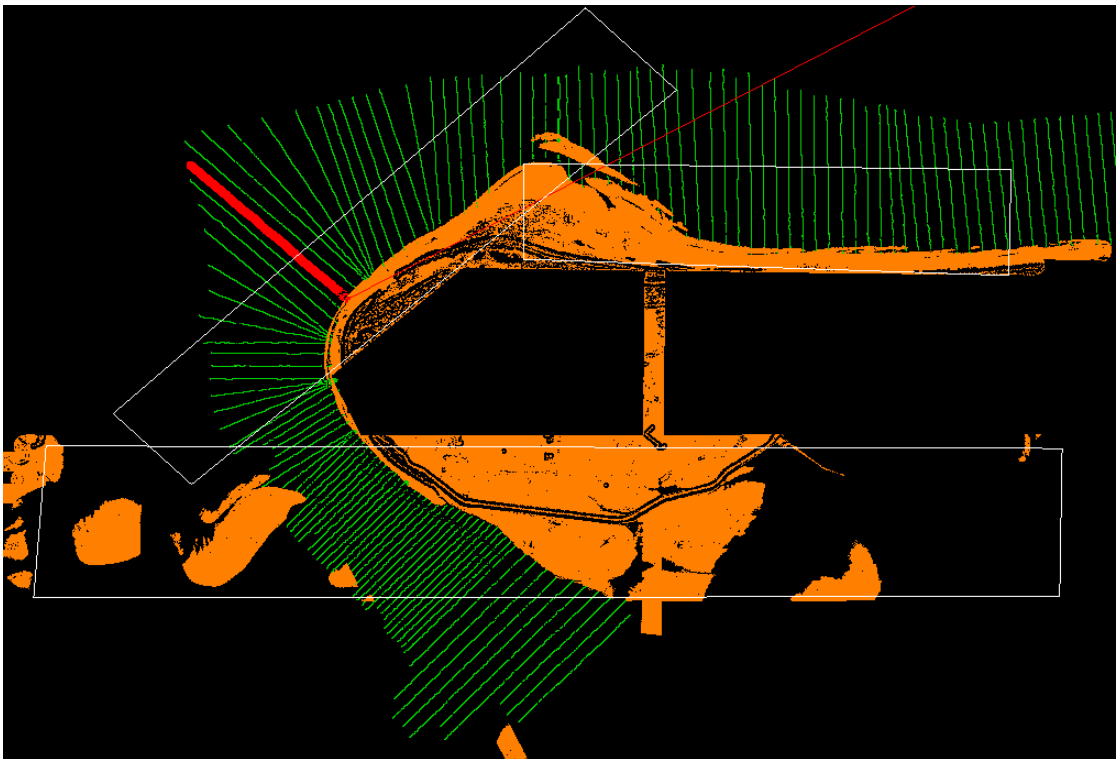


Figuur 36: de locatie van de referentieprofielen, met in rood een profiel dat voor de vergelijking is gebruikt.

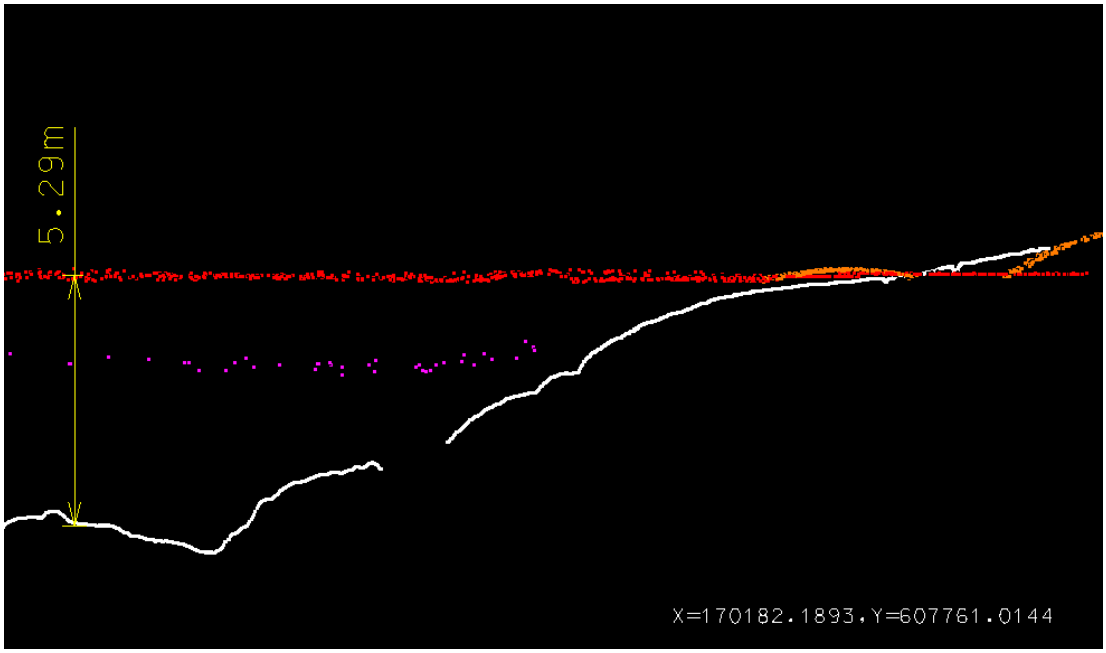


Figuur 37: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), de topografische laserdata van het strand (in oranje) en de bodem uit Jarkusprofiel (wit)

Figuur 38 en 39 toont het resultaat in een profiel ten noordwesten van Ameland. De waterdiepte loopt hier op tot ruim 5 meter.
De lasermetingen leveren een nauwkeurige meting van het strand en de land/water overgang. De onderwaterbodem kan ook hier niet worden bepaald. De, als onbetrouwbaar geclassificeerde, lasermetingen komen van reflecties op een diepte van rond de 2 meter.

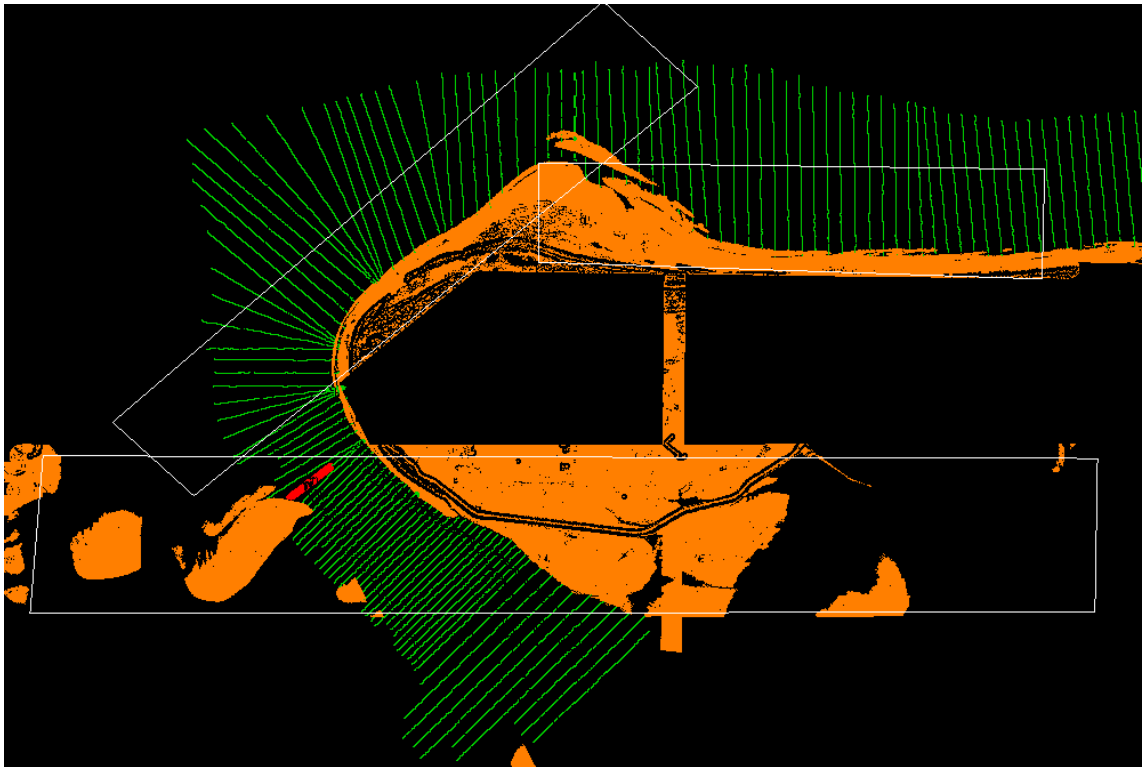


Figuur 38: de locatie van de referentieprofielen, met in rood een profiel dat voor de vergelijking is gebruikt.

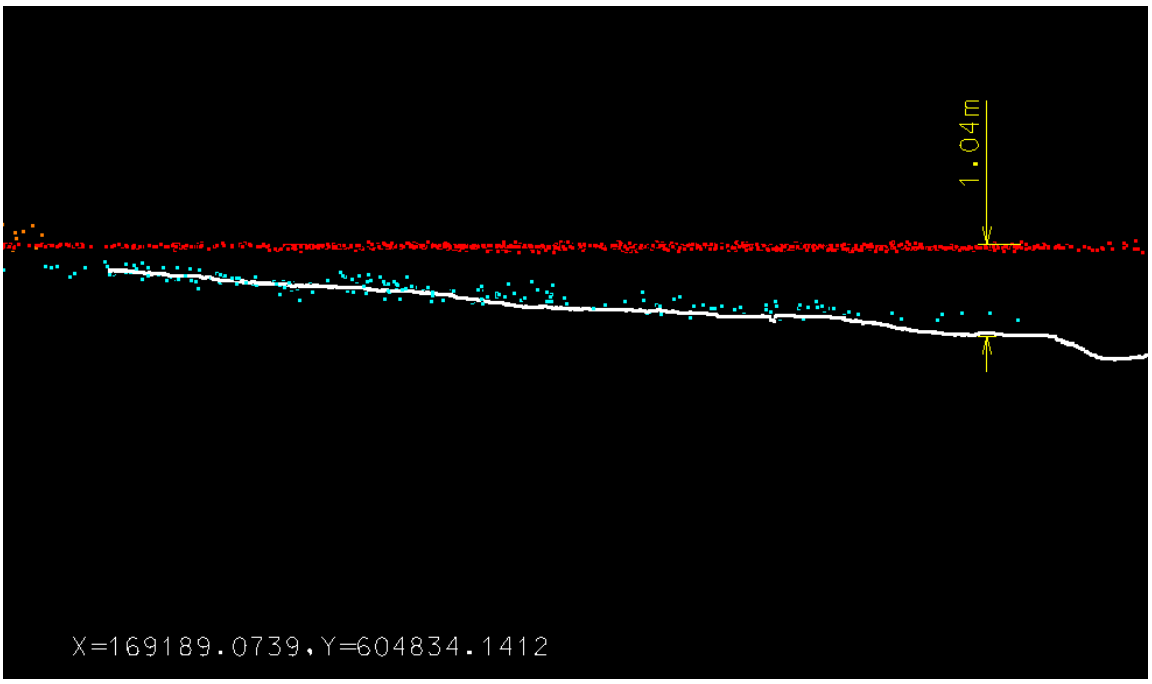


Figuur 39: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), de topografie uit laser (in oranje) de laag betrouwbare laserreflecties (paars) en de bodem uit Jarkusprofiel (wit)

Figuur 41 toont het resultaat van als betrouwbaar geclassificeerde lasermetingen. Deze blijken inderdaad goed overeen te komen met de referentie gegevens. In dit voorbeeld betreft het waterdieptes tot ongeveer 1 meter op de kop van de zandplaten. Deze ondiepe gebieden kunnen moeilijk op een andere manier worden ingemeten



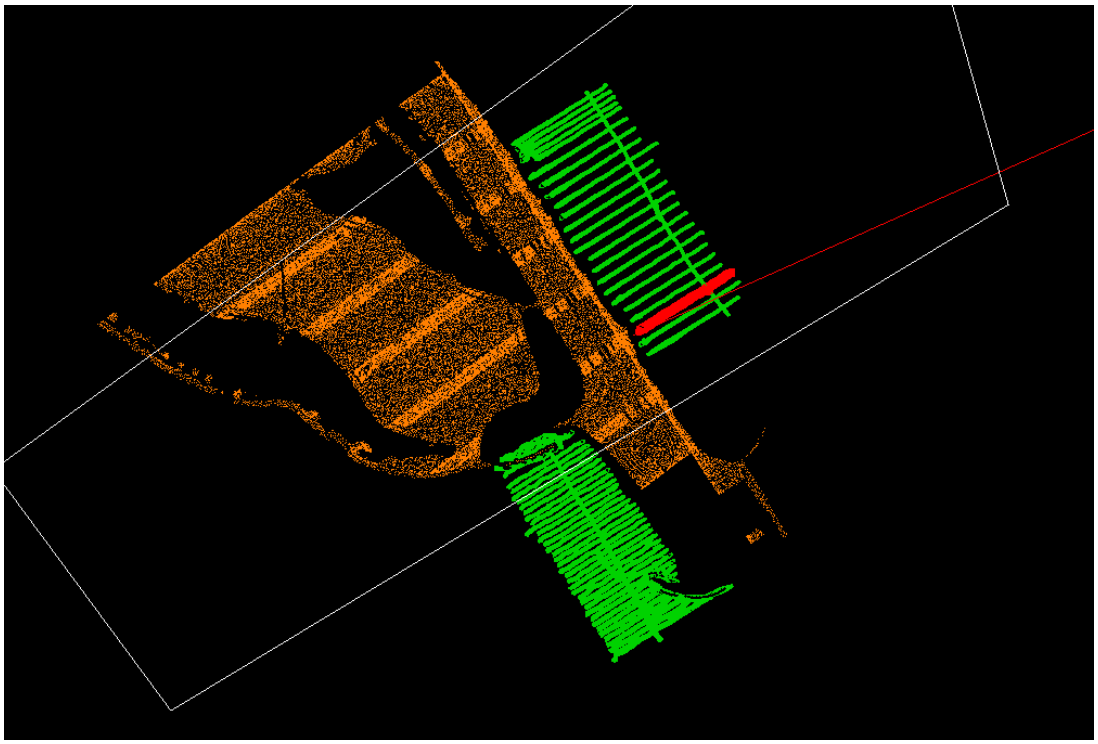
Figuur 40: de locatie van de referentieprofielen, met in rood een profiel dat voor de vergelijking is gebruikt



Figuur 41: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), de betrouwbare laserreflecties van de bodem (blauw) en de bodem uit Jarkusprofiel (wit)

4.2.2 Projectgebied Houtribdijk

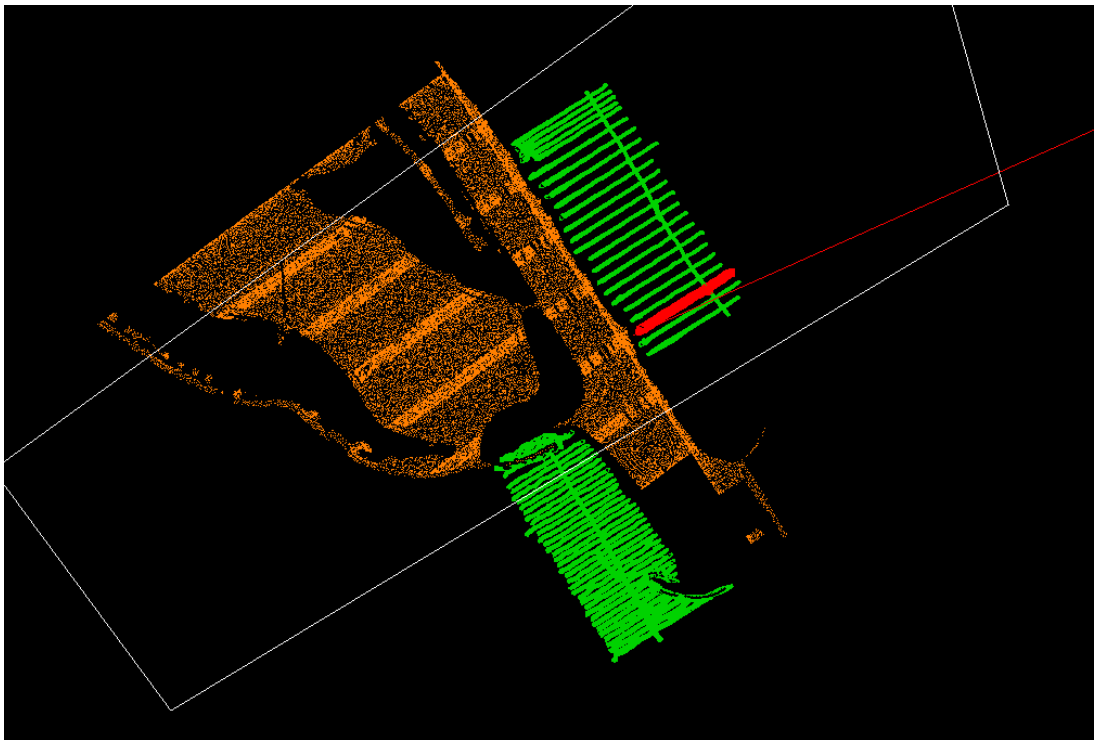
Voor het projectgebied Houtribdijk zijn in eerste instantie grids, ingewonnen met een PING DSP op stukken in het Markermeer en IJsselmeer beschikbaar gesteld. De data is ingewonnen rond 14 november 2019. Deze data is weergegeven (in groen) in figuur 42a. Vervolgens zijn ook referentiedata van ondiepe stukken langs de Houtribdijk geleverd en voor verdere analyse gebruikt. De locatie van deze profielen zijn in figuur 42b weergegeven.



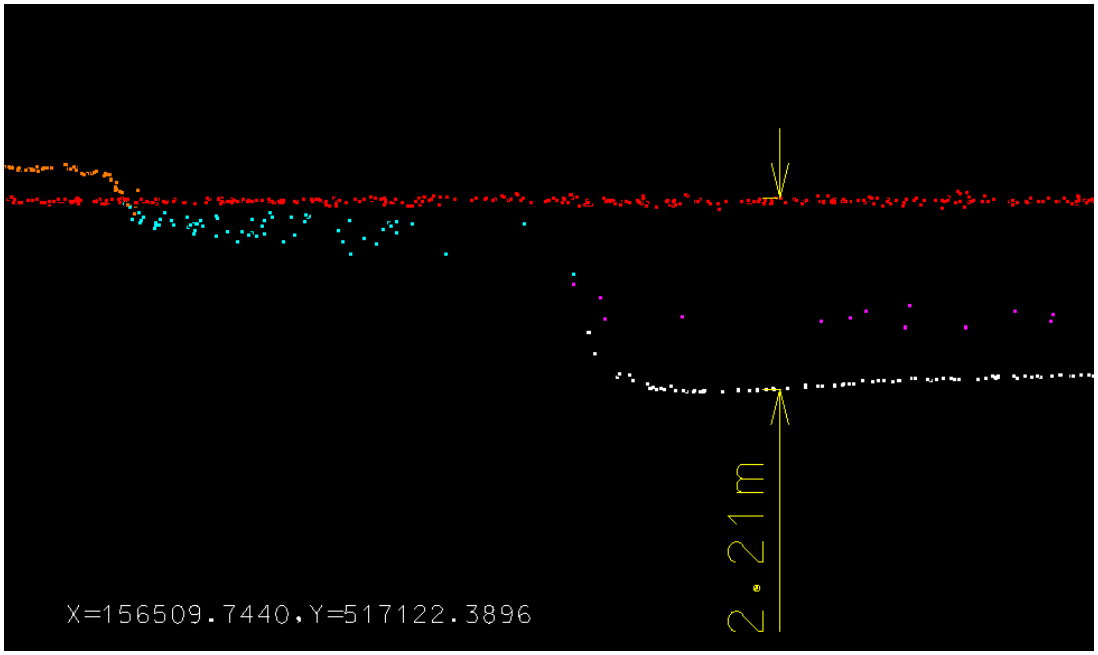
Figuur 42a: de locatie van de referentiegrids

Figuur 42b: de locatie van de referentieprofielen in de ondiepe delen

Onderstaande figuur 43b laat het verschil zien tussen de lasermetingen en een referentieprofiel aan de IJsselmeer kant van de Houtribdijk.



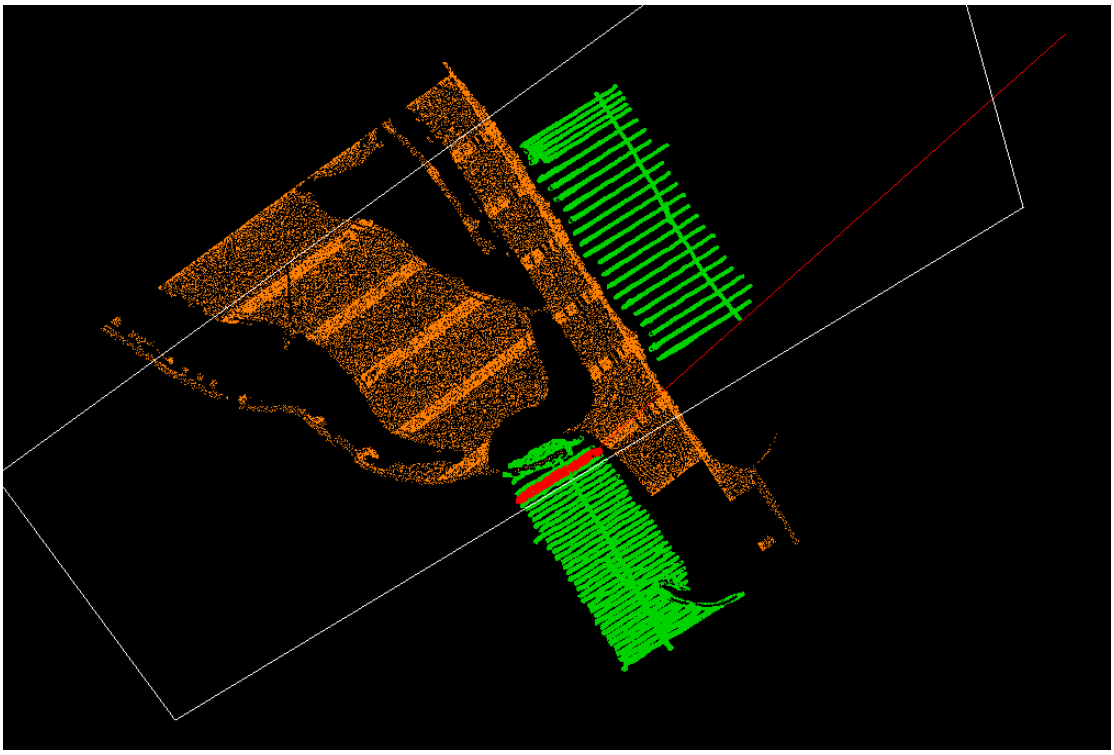
Figuur 43a: locatie van de referentieprofielen, met in rood een profiel dat voor vergelijking is gebruikt.



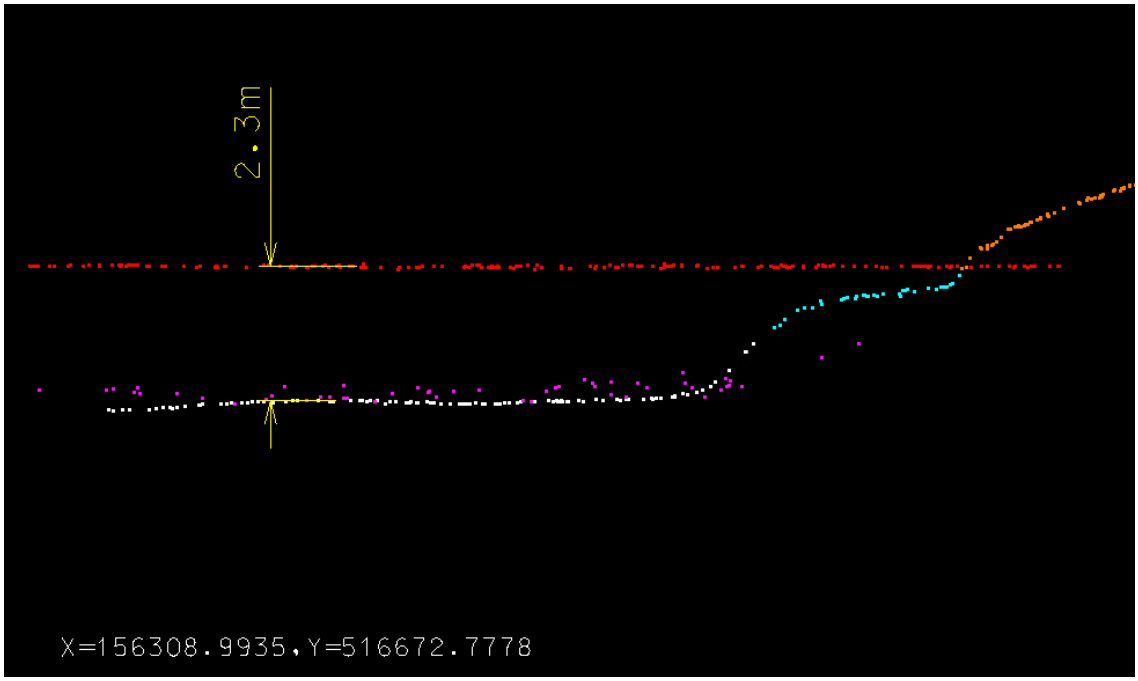
Figuur 43b: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), de topografie uit laser (oranje), betrouwbare laserreflecties van de bodem (blauw), de laag betrouwbare laserreflecties (paars) en de bodem uit PING DSP (wit)

Figuur 43b laat zien dat de als niet betrouwbaar geclassificeerde laserdata inderdaad niet overeenkomen met de referentie data. Betrouwbare laserdata (in blauw) komt alleen in het ondiepere deel voor. In deze dataset is hiervoor echter geen referentiedata beschikbaar.

Onderstaande figuur laat het verschil zien tussen de lasermetingen en een referentieprofiel aan de Markermeer kant van de Houtribdijk.



Figuur 44a: locatie van de referentieprofielen, met in rood een profiel dat voor vergelijking is gebruikt.

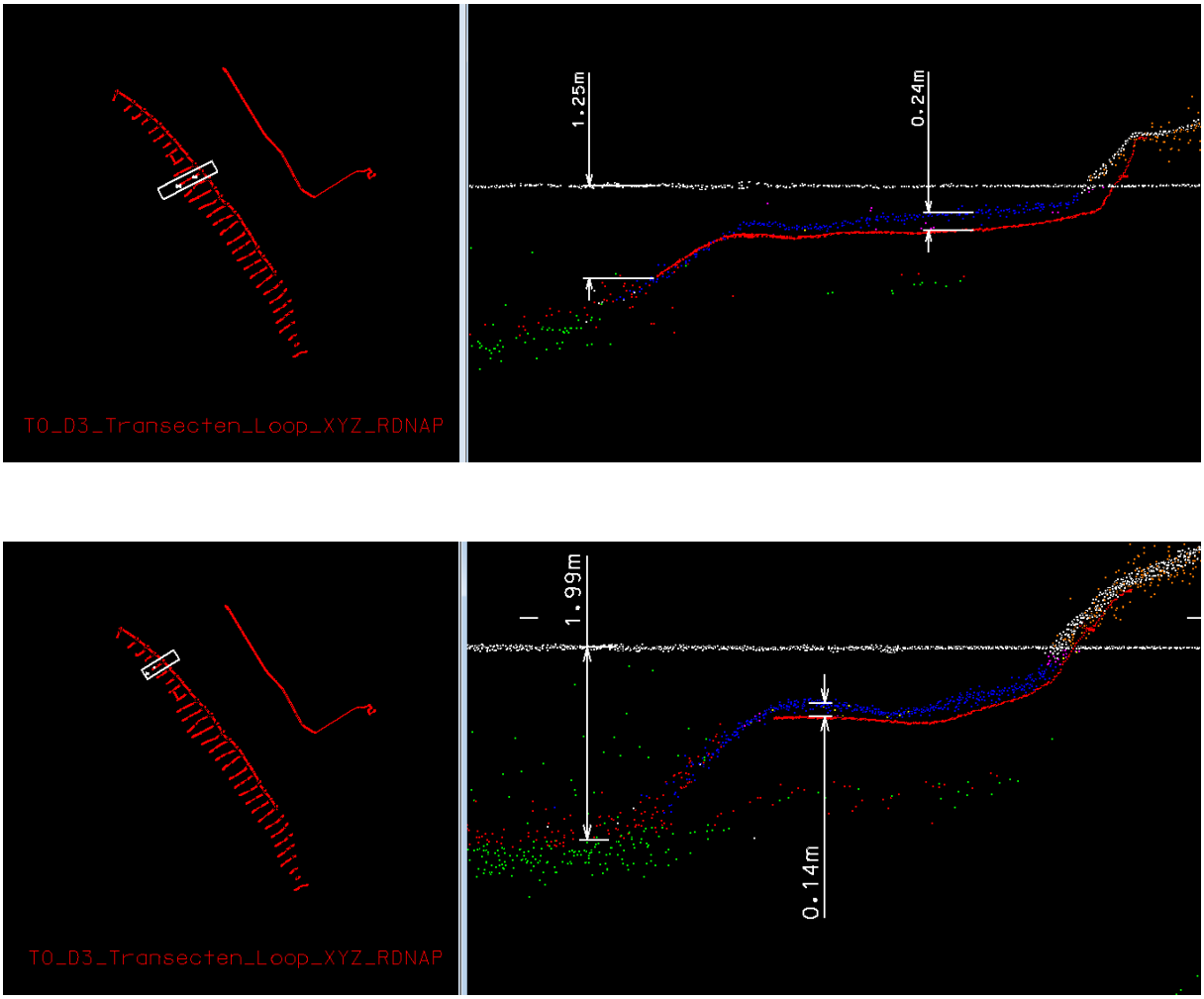


Figuur 44b: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), de topografie uit laser (oranje), betrouwbare laserreflecties van de bodem (blauw), de laag betrouwbare laserreflecties (paars) en de bodem uit PING DSP (wit) referentiemetingen

Opvallend is dat aan deze kant van de dijk de als laag betrouwbaar geclassificeerde laserreflecties (paars) in dit profiel toch goed overeenkomen met de referentiemetingen tot waterdieptes van 2,30m. Als betrouwbare geclassificeerde laserdata (in blauw) komt alleen

in het ondiepere deel voor. In deze dataset is hiervoor echter geen referentiedata beschikbaar. De figuur laat ook zien dat de betrouwbare bathymetrische en topografische laserdata goed aansluiten en een compleet beeld van de land/ water overgang geven.

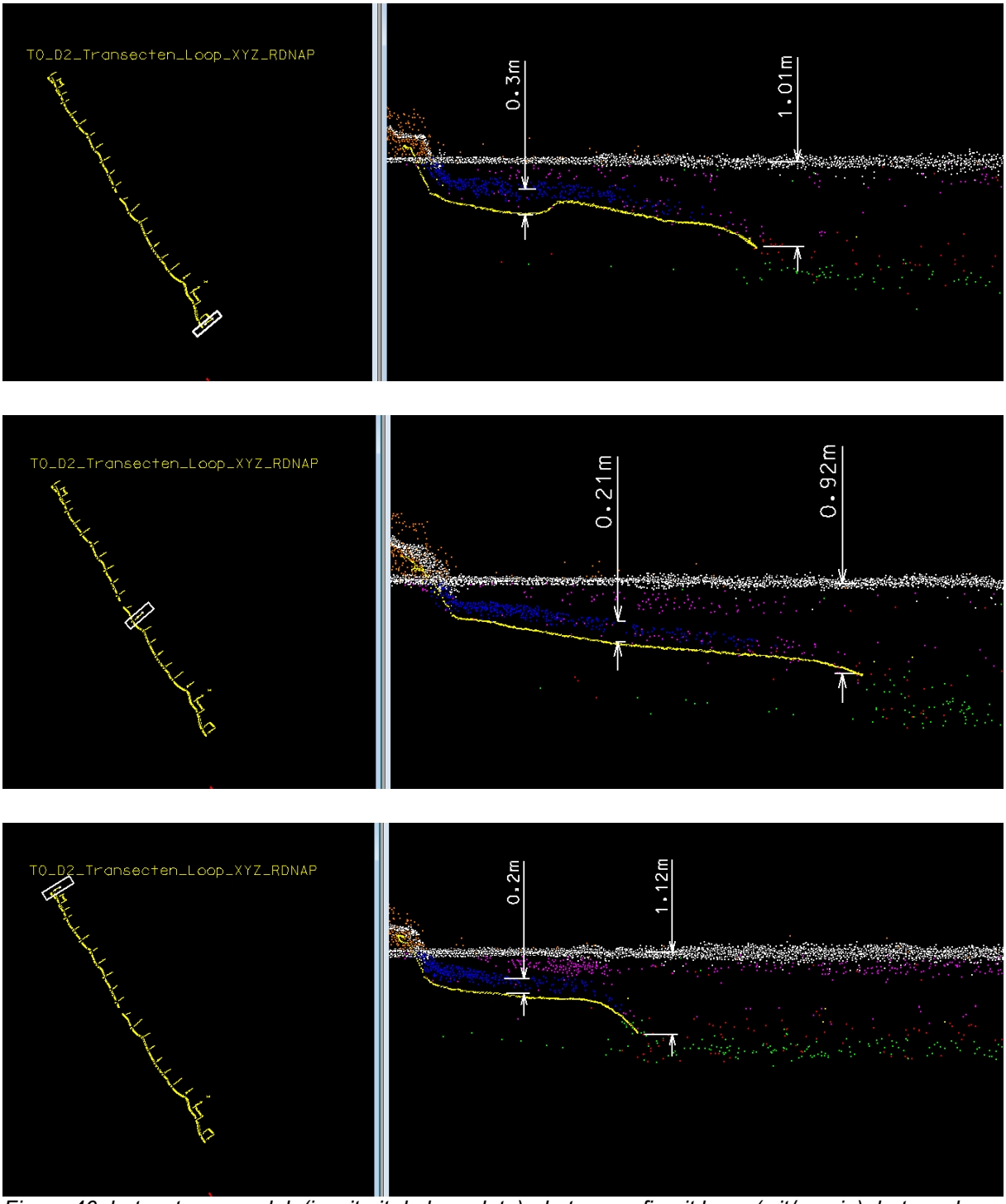
Voor een analyse van de laser resultaten voor de ondiepe delen aan beide zijden langs de Houtribdijk zijn aparte referentiemetingen gebruikt.
Onderstaande figuur laat voor 2 profielen de resultaten zien aan de Markermeer kant van de dijk.



Figuur 45: het wateroppervlak (in wit uit de laserdata), de topografie uit laser (wit/oranje), betrouwbare laserreflecties van de bodem (blauw), overige laserreflecties (groen) en de bodem uit referentieprofielen in rood

De bovenstaande voorbeelden laten zien dat laserbathymetrie hier betrouwbare diepte informatie levert tot aan de maximale diepte van de referentieprofielen (in dit voorbeeld tot 1,25m).

Onderstaande figuur toont resultaten voor 3 profielen aan de IJsselmeer kant van de dijk.



Figuur 46: het wateroppervlak (in wit uit de laserdata), de topografie uit laser (wit/oranje), betrouwbare laserreflecties van de bodem (blauw), overige laserreflecties paars en groen en de bodem uit referentieprofielen in geel

De laserbathymetrie levert ook hier betrouwbare diepte informatie tot de maximale diepte van de referentieprofielen (in dit geval 1,12m). Opvallend is wel dat de spreiding van de lasermetingen groter is dan bij de profielen aan de Markermeer kant van de dijk. Ook zien we hier een groot aantal reflecties vanuit de waterkolom (in paars) die, terecht, als niet-betrouwbaar geclassificeerd zijn. Het aantal reflecties vanuit de waterkolom is ook duidelijk groter dan bij resultaten aan de Markermeer kant. Dit lijkt een gevolg van verschil in waterkwaliteit: troebeler aan IJsselmeerzijde.

Voor alle vier referentiedatasets zijn de verschillen met de lasermetingen berekend en verder geanalyseerd. De resultaten zijn in beide onderstaande tabellen weergegeven.

Allereerst zijn voor ieder referentiegebied de verschillen tussen de referentie data en alle laserwaarnemingen (dus inclusief de als niet-betrouwbaar geclassificeerde metingen) berekend en geanalyseerd. Tabel 47 laat de resultaten zijn.
Voor de referentiegebieden DTM_D2 en DTM_D3 zijn alle lasermetingen bathymetrische metingen. Voor de transecten D2 en D3 zijn een deel van de lasermetingen ook topografische metingen.

	DTM_D2_all IJsselmeer kant	DTM_D3_all Markermeer kant	D2_transect_all IJsselmeer kant	D3_transect_all Markermeer kant
totaal aantal LiDAR punten voor vergelijking	22345	12835	20812	16964
aantal bathymetrische LiDAR punten voor vergelijking	22345	12835	18734	12022
maximale LiDAR waarde (meter)	-1,00	-1,429	0,267	3,518
minimale LiDAR waarde (meter)	-2,12	-2,825	-1,67	-2,339
gemiddelde verschil in diepte/hoogte (m)	0,564	0,375	0,154	0,08
standaard afwijking van het verschil (m)	0,386	0,202	0,154	0,139

Tabel 47: resultaten van verschillen tussen referentiemetingen en alle lasermetingen

De resultaten bevestigen het beeld van de resultaten in de afzonderlijke profielen hierboven. Voor de transecten D2 en D3 worden goede resultaten bereikt: een gemiddeld verschil van 15cm respectievelijk 8cm en een standaardafwijking van 15cm respectievelijk 14 cm.

Vervolgens zijn voor ieder referentiegebied de verschillen tussen de referentie data en de als betrouwbaar geclassificeerde bathymetrische laserwaarnemingen (valid_only in de tabel) berekend en geanalyseerd. Omdat het percentage betrouwbare lasermetingen voor de referentiegebieden DTM_D2 en DTM_D3 minder dan 1% bedroeg, zijn deze niet verder geanalyseerd.
Tabel 48 laat de resultaten zijn.

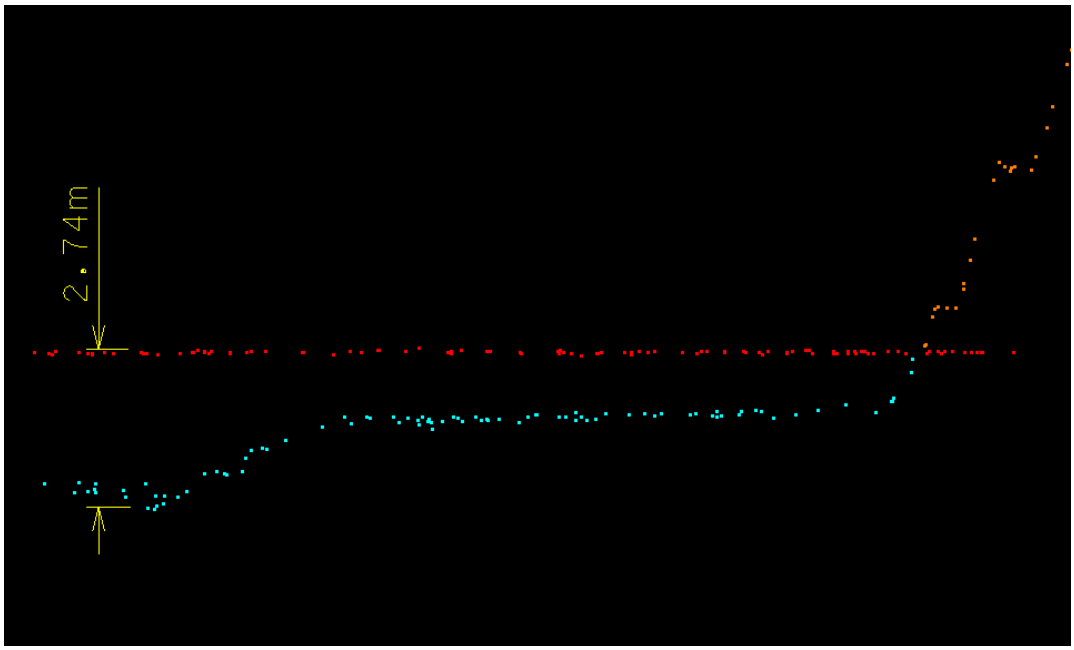
	D2_transect_validonly	D3_transect_validonly
totaal aantal bathymetrische LiDAR punten	18734	12022
totaal aantal betrouwbare bathymetirsche LiDAR punten gebruikt voor vergelijking	12409	9908
% betrouwbare bathymetrische lidar t.o.v. totaal	66%	82%
maximale LiDAR waarde (m)	-0,141	-0,326
minimale LiDAR waarde (m)	-1,232	-1,813
gemiddelde verschil in diepte	0,161	0,079
standaard afwijking (m)	0,167	0,096

Tabel 48: resultaten van verschillen tussen referentiemetingen en de betrouwbare bathymetrische lasermetingen

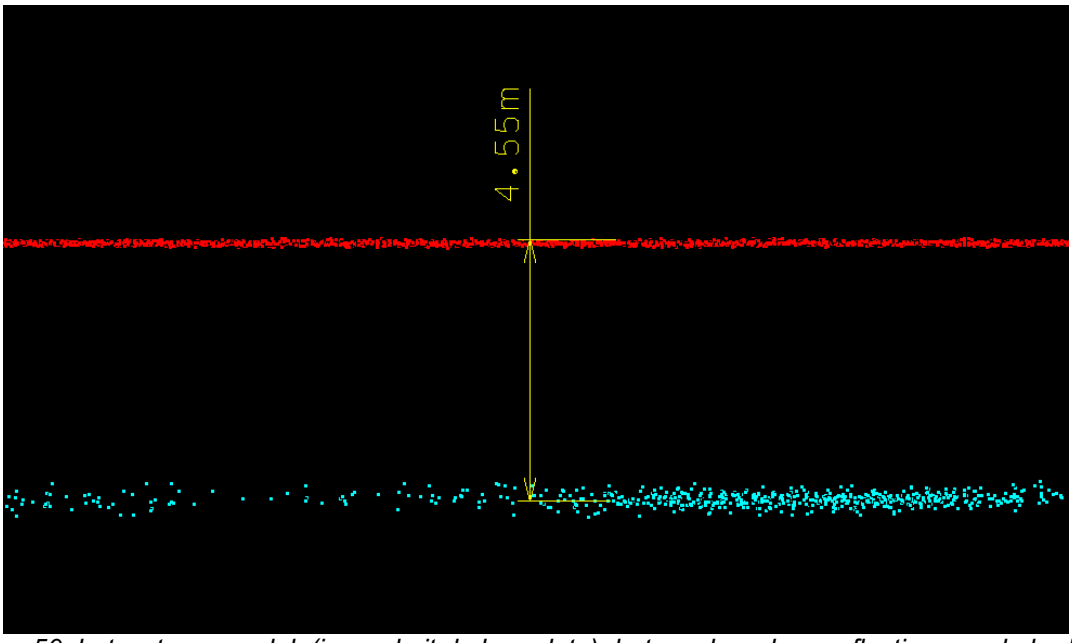
De resultaten laten zien dat in beide (relatief) ondiepe gedeelten betrouwbare bathymetrische resultaten worden verkregen met de laser. De grootste dieptes in de gebieden waren 1,23m. en 1,81m. voor respectievelijk transect D2 en transect D3.
Wel is er een duidelijk verschil in kwaliteit tussen beide gebieden. Resultaten in het gebied aan de Markermeer kant (transect D3) levert een duidelijk hogere nauwkeurigheid (standaardafwijking 10cm) dan aan de IJsselmeer kant (transect D2) (standaardafwijking 17 cm). Het gemiddelde verschil met de referentie data bedraagt 8 cm en respectievelijk 16cm. In transect_D3 zijn 82% van alle bathymetrische lasermetingen geclassificeerd als betrouwbare metingen; in transect D2 is dit 66%.
De verschillen in kwaliteit tussen beide zijden van de Houtribdijk zijn mogelijk een gevolg van verschil in waterkwaliteit (zie ook de verschillen in reflecties in de waterkolom) en verschillen in bodemsamenstelling/materiaal en bodemruwheid.

4.2.3 Gebied Urk

Omdat de Urk-lijn oorspronkelijk alleen als testlijn is gevlogen, zijn van dit gebied (nog) geen referentiegegevens beschikbaar. De resultaten in onderstaande figuren laten zien dat met een hoge mate van betrouwbaarheid de bodem tot een diepte van 5 m kon worden ingemeten.



Figuur 49: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), de topografie uit laser (oranje), betrouwbare laserreflecties van de bodem (blauw)



Figuur50: het wateroppervlak (in rood uit de laserdata), betrouwbare laserreflecties van de bodem (blauw)

4.2.4 Conclusies

Op basis van de bovenbeschreven analyses kunnen volgende conclusies getrokken worden:

1. Ameland/Waddenzee:
    a. Betrouwbare bathymetrische lasermetingen van de bodem zijn alleen verkregen in ondiepe gebieden tot zo'n 1 meter waterdiepte. Het gaat daarbij dan vooral om gebieden rondom wadplaten (gebieden die overigens moeilijk op een andere manier kunnen worden ingemeten).
    b. In de overige diepere delen (en geulen) bleek het niet mogelijk de bodem betrouwbaar in te meten. Het merendeel van de returnsignalen was afkomstig van reflecties uit de waterkolom vanaf een diepte van zo'n 2 meter.
    c. Land/water overgangen en hoogte van het wateroppervlak kunnen nauwkeurig met laserbathymetrie worden bepaald.
    d. Er een goede aansluiting van de topografische laserdata en de ondiepe bathymetrische laserdata op de metingen van de onderwaterbodem, zoals bepaald met de referentiesystemen.
    e. Met het Chiroptera 4X systeem worden ook de topografie en de drooggevallen gebieden nauwkeurig vastgelegd.
2. Ameland/Noordzee:
    a. Aan de Noordzee kant van Ameland bleek het niet mogelijk om de onderwaterbodem betrouwbaar in te meten. Ook hier was het merendeel van de returnsignalen afkomstig van reflecties uit de waterkolom van een diepte van zo'n 2 meter.
    b. Land/water overgangen en hoogte van het wateroppervlak kunnen nauwkeurig met laserbathymetrie in dit gebied worden bepaald.
    c. Ook hier is er een goede aansluiting van de topografische laserdata van het strand op de metingen van de onderwaterbodem, zoals bepaald met de referentiesystemen.
3. Houtribdijk:
    a. De resultaten van het testgebied bij de Houtribdijk laten zien dat in dit gebied dieptes tot ongeveer 2 meter met laserbathymetrie betrouwbaar gemeten kunnen worden.
    b. Het verschil met de referentiemetingen bedraagt gemiddeld 8 cm aan de Markermeer kant en 16 cm aan de IJsselmeer kant. De standaardafwijking voor de verschillen bedraagt respectievelijk 10cm en 17 cm.Waarschijnlijk speelt bodemsamenstelling en ruwheid een rol bij het verschil tussen beide kanten van de dijk.
    c. Tot waterdiepte van 2 meter zijn 66% (IJsselmeer kant) tot 82% (Markermeer kant) van alle bathymetrische metingen bij de processing geclassificeerd als betrouwbare (correcte) metingen van de onderwaterbodem. Het verschil in percentage is een gevolg van het verschil in waterkwaliteit.
    d. De combinatie van een topografische- en bathymetrische laser in het Chiroptera 4X systeem maakt het mogelijk om in dit gebied "naadloos" en nauwkeurig de bovenwater- en onderwaterbodem vast te leggen tot diepte van ongeveer 2 meter.

4. Urk:
    a. De resultaten van de metingen rond Urk laten zien dat bij goede water condities de bodem van het IJsselmeer (in ieder geval) tot een diepte van 5 meter betrouwbaar kan worden ingemeten met laserbathymetrie.
5. De bathymetrische data die bij de processing geclassificeerd is als betrouwbaar komt goed overeen met de referentiegegevens en is een correcte weergave van de onderwaterbodem. Het merendeel van de data die geclassificeerd is als laag betrouwbaar blijkt inderdaad geen juiste representatie van de onderwaterbodem. Dit bevestigt dat de classificatie algoritmen ook in deze lastige gebieden correct werken.

5 Opgeleverde dataproducten

Als onderdeel van de eindlevering zijn de volgende eindproducten op harddisc aangeleverd:

Levering 1:

a. Geometrisch correcte en geclassificeerde LiDAR dataset (LAS 1.4 format) (de refractiecorrectie is hierin al toegepast). Classificatie in de klassen: grond, onderwaterbodem “higher confidence level”, onderwaterbodem “lower confidence level”, wateroppervlakte, vegetatie, bebouwing en overig.
b. Digitaal Terrein Model (ESRI-Grid) van grond en onderwaterbodem. Het DTM is zowel apart als gecombineerd geleverd voor de onderwaterbodem en de grond
c. Digitaal Oppervlakte Model (ESRI-Grid) van het wateroppervlak, de vegetatie en de bebouwing.
d. Orthofoto’s

Levering 2:

e. Geometrisch correcte dataset met alle ingewonnen ruwe data (Las 1.2 format). De refractiecorrectie is hierin al toegepast.
f. Voor de Waddenzee: verschillen tussen de bathymetrische data en de referentiedata als grid en als txt bestanden
g. Voor het gebied Houtribdijk: verschillen tussen de laserdata en de referentiedata als txt bestand voor alle topografische en bathymetrische data en voor alleen de als betrouwbaar geclassificeerde bathymetrische data.
h. Deze eindrapportage

6 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten tot nu toe, is het aan te bevelen om:

1. Voor de Waddenzee een nadere analyse uit te voeren naar de combinatie van de topografische en bathymetrische laserdata voor het vastleggen van de wadplaten en de onderwaterbodem rondom de wadplaten tot diepte onderwater van minimaal 1 meter. Er was slechts in beperkte mate referentie data beschikbaar van juist die (ondiepe) gebieden waar bathymetrische laserdata als betrouwbaar geclassificeerd is. Aanbevolen wordt om dit met bestaande referentiedata nader te onderzoeken. Juist deze combinatie is met andere meettechnieken niet (goed) mogelijk vanwege de geringe diepte.
2. Voor de Waddenzee de mogelijkheid te onderzoeken om automatisch de land/water grenzen te bepalen uit de gecombineerde topografische- en bathymetrische data.
3. Voor het gebied langs Houtribdijk te overwegen om de gecombineerde topografische- en bathymetrische laser in te zetten als (aanvullende) meettechnologie voor monitoring van gebiedsontwikkeling voor ondiepe delen, overgangsgebied nat/droog en droge delen. Eventueel in combinatie met gelijktijdige opnames van RGB(N) luchtfoto's.
4. Voor het gebied Urk de bathymetrische laserdata te vergelijken met referentiedata.
5. Voor het gehele IJsselmeer te onderzoeken wanneer en waar de watercondities vergelijkbaar zijn met die bij Urk tijdens de metingen. Het is te verwachten dat afhankelijk van windrichting en windsterkte zich op verschillende plaatsen in het IJsselmeer vergelijkbare omstandigheden voordoen. Als eerste stap zou hiervan een beter beeld kunnen worden verkregen door analyse van satellietbeelden (bijvoorbeeld van Planet Labs.). Dit zou uitsluitsel moeten geven over de mogelijkheden om laser bathymetrie voor het gehele IJsselmeer toe te passen.