

# METEN VAN WATERDIEPTE MET GROENE LIDAR

HULPMIDDEL OM BAGGERDIKTE TE BEPALEN?



RAPPORT

2019  
39

METEN VAN WATERDIEPTE MET GROENE LIDAR  
HULPMIDDEL OM BAGGERDIKTE TE BEPALEN?

**RAPPORT**

2019

**39**

ISBN 978.90.5773.857.9



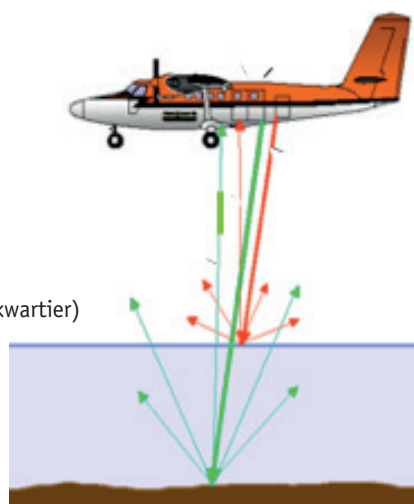
# COLOFON

UITGAVE Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer  
Postbus 2180  
3800 CD Amersfoort

AUTEUR Ellis Penning (Deltares)  
Martijn Visser (Deltares)  
Jeroen Leusink (Het Waterschapshuis)  
Lennart van Tol (Het Waterschapshuis)

## BEGELEIDINGSCOMMISSIE

Hans van Leeuwen (STOWA)  
Edwin ter Hennepe (Waternet)  
Tamara Labrović (Gemeente Rotterdam)  
Olaf Borgonjen (Waterschap Vechtstromen)  
Jean Pierre van Aert (Waterschap Brabantse Delta)  
Dick Sundermeijer (Gemeente Rotterdam)  
Willem Rijn (Waterschap Scheldestromen)  
Leo Harren (Waternet)  
Leendert de Ruiter (Hoogheemraadschap van Rijnland)  
Maarten Hoetmer (Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier)  
Rinse Wilmink (Rijkswaterstaat)  
Ben Dierckx (Rijkswaterstaat)  
Wim Visser (Rijkswaterstaat)  
Searp Wijbenga (Gasunie)  
Jan Ribberink (Gasunie)



DRUK Kruyt Grafisch Adviesbureau  
STOWA STOWA 2019-39  
ISBN 978.90.5773.857.9

Copyright Teksten en figuren uit dit rapport mogen alleen worden overgenomen met bronvermelding.  
Disclaimer Deze uitgave is met de grootst mogelijke zorg samengesteld. Niettemin aanvaarden de auteurs en de uitgever geen enkele aansprakelijkheid voor mogelijke onjuistheden of eventuele gevolgen door toepassing van de inhoud van dit rapport.

# TEN GELEIDE

## **METEN VAN DIEPTE VAN WATERGANGEN MET GROENE LIDAR**

Groene LiDAR, Laser Imaging Detection And Ranging, is een methodiek waarmee waterdieptes en bodemhoogtes kunnen worden bepaald. Daarmee biedt het mogelijkheden dieptes van watergangen in te schatten en te kijken of er gebaggerd moet worden. Uit deze studie blijkt dat in ongeveer de helft van de gevallen de waterbodem betrouwbaar ingemeten kan worden. De methode moet echter verder ontwikkeld worden om in de praktijk toe te gaan passen.

Ongeveer een keer in de 10 jaar worden watergangen gebaggerd. Baggeren zorgt ervoor dat water goed aan- en afgevoerd kan worden en het water meer zuurstof, ruimte en licht krijgt. In de legger van het waterschap staat de gewenste diepte en breedte van de watergangen beschreven.

Om te bepalen of gebaggerd moet worden, wordt de hoogte van de waterbodem gemeten en vergeleken met de gewenste waterdiepte volgens de legger. Gezocht wordt naar methoden om dit sneller en goedkoper te doen. Metingen met LiDAR bieden mogelijk een uitkomst. Ook voor het opsporen van onderwatersperringen, het bepalen van vaardieptes en de ontwikkeling van zandplaten in het estuariene gebied is LiDAR wellicht interessant.

In deze studie is gekeken of het meten met een groene LiDAR mogelijkheden biedt om dieptes van watergangen te bepalen. Het is hierbij belangrijk dat het water helder is en er geen waterplanten aanwezig zijn. Dan kan met groene LiDAR de diepte van de waterlaag worden gemeten tot anderhalf keer het doorzicht. Metingen vinden plaats vanuit een vliegtuig.

Uit de studie blijkt dat bij een gemiddelde waterdiepte tussen de 1 en 2 meter ongeveer in de helft van het oppervlak aan waterbodems betrouwbaar ingemeten kan worden. De kosten voor het inwinnen en verwerken van de data liggen in vergelijkbare orde-grootte als traditionele handmatige metingen. Het voordeel is dat groene laser een vlakdekkend beeld geeft van het ingemeten gebied en mogelijk efficiëntie in het baggerproces in het veld kan betekenen.

Voorgesteld wordt om voor de verdere ontwikkeling aan te sluiten bij een concrete (bagger) praktijksituatie waarbij reguliere metingen vergeleken kunnen worden met de resultaten van de groene laser en waarin veel aandacht is voor het verder verbeteren van de dataverwerking.

Joost Buntsma  
Directeur STOWA

# SAMENVATTING

Bathymetrische LiDAR (ook wel groene LiDAR genoemd) is een meettechniek waarmee in ondiepe wateren bathymetrische metingen kunnen worden verricht, tot een diepte ongeveer gelijk aan – tot anderhalf keer - het doorzicht. Om te bezien of deze techniek ook geschikt is voor de Nederlandse situatie is in april 2018 een pilot-vlucht uitgevoerd waarin zes verschillende watersystemen zijn ingemeten met de Riegl VQ-880-G vanuit een vliegtuig. De watersystemen verschillen van elkaar in water- en bodemkarakteristieken en liggen verspreid door Nederland bij enkele van de deelnemende beheerders.

De ingemeten data is verwerkt door het Waterschapshuis, in samenwerking met de inwinnende Oostenrijkse partij AHM en Deltares, en vergeleken met grondvalidatiedata ingemeten door de deelnemende waterbeheerders. Ook is er een vergelijking gemaakt met twee andere meetinstrumenten die een groene LiDAR component bevatten, en die in dezelfde periode als de pilot zijn ingemeten voor het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) met de Riegl VQ-1560i-DW en de Sigma Space Single Photon LiDAR.

De maximaal behaalde dieptemeting ligt rond de 5.24 meter (in het Grevelingenmeer) en veel recreatiewateren tot een diepte van 3 meter kon de bodem ook (gedeeltelijk) worden ingemeten. In de diepe vaargeulen van de Nieuwe Maas en Waal werd gemeten tot zo'n 2 meter diepte. In veel andere, kleinere watersystemen wordt met de LiDAR vaak niet dieper dan 1 meter gemeten, en wordt ook geen consistent beeld ingewonnen: dat wil zeggen, soms wordt een deel van een watergang goed gemeten, maar een zeer vergelijkbaar aanliggende watergang niet. De conische scan-hoek van het meetinstrument heeft hier mogelijk een rol gespeeld. Door deze hoek wordt een deel van een smalle watergang niet 'geraakt'.

Het verwerken van de data bleek lastiger dan op voorhand verwacht. Gebruikmakend van het software programma TerraScan is de dataverwerking grotendeels geautomatiseerd, al bleef handmatige controle noodzakelijk. Het scheiden van de totale pointcloud in de klassen 'waterbodem', 'wateroppervlakte', 'droge bodem', 'vegetatie' en 'ruis' kon uiteindelijk voor alle gebieden deels worden uitgevoerd, met een gemiddeld percentage met zekerheid ingemeten bodems van 45% van het totale gemeten wateroppervlakte (minimaal 20% in de regio Oss; maximum 68% in de Grevelingen). Hierbij blijkt dat de punt dichtheid per m<sup>2</sup> een belangrijk aspect is in het succesvol zijn van de inmeting. Een te lage punt dichtheid resulteert in een lagere zekerheid of de bodem daadwerkelijk is gemeten, doordat de bodempunten dan moeilijker van de ruis te onderscheiden zijn. Dit was zeer duidelijk te zien in een voorbeeld binnen Rotterdam, waar binnen één watersysteem zowel deels succesvolle bodemmetingen als ook onsuccesvolle metingen werden gerealiseerd, die gekoppeld konden worden aan deze punt dichtheid. Zonder overlapping zijn er punt dichtheden behaald van 150 punten per m<sup>2</sup>. De maximale punt dichtheden die zijn behaald met overlapping lopen op tot 400 punten per m<sup>2</sup>. Om een bodem met voldoende zekerheid te kunnen detecteren is er op het oog bepaald dat een minimale punt dichtheid nodig is van 20 punten per m<sup>2</sup>. Hierop is het automatische classificatie algoritme vervolgens afgesteld.

Echter, andere algoritmen waarbij ook aanvullende karakteristieken van het signaal worden gebruikt zouden tot een beter overall resultaat kunnen leiden, en er wordt aanbevolen hier in een vervolg op te sturen.

Met het nu gebruikte geautomatiseerde algoritme zijn de resultaten niet consistent genoeg om te kunnen zeggen in welke wateren de groene LiDAR altijd werkt. Hoewel er werd aangegeven dat waterkwaliteit van groot belang is bij de metingen, kon uit de beschikbare veldvalidatiedata geen goede relatie worden afgeleid met betrekking tot het meetsucces en het doorzicht, danwel ook de kleur van de waterbodem. Op plekken met een goede waterkwaliteit en zandige bodem werden plekken zowel succesvol als onsuccesvol ingemeten (De Vecht). Ook op plekken met een beperkte secchi-diepte werden toch diepe waarnemingen succesvol ingewonnen (Westerschelde).

In vergelijking met de twee andere inwinmethoden die zijn geprobeerd geeft de VQ880 een beduidend beter resultaat. Dit komt door de gebruikte lagere vlieghoogte en de hoge puntichtheid die is nagestreefd. De samenvoeging met het inmeten van het AHN (dat met de VQ1560 het beste kan worden uitgevoerd) valt daarmee af als een mogelijke manier om deze methode eenvoudig en kosteneffectief landsdekkend in te zetten.

De kosteneffectiviteit van de groene LiDAR is vergelijkbaar met die van handmatige inmetingen, al blijft dit een inschatting op basis van de weinige gegevens die hierover voorhanden waren. Multibeam-metingen vanaf een boot zal als aanvulling op de goed toegankelijke stukken dieper dan 1 meter moeten blijven gelden, waardoor een vergelijking op basis van kosten met deze methode minder noodzakelijk is.

De technische resultaten van de studie zijn besproken tijdens een workshop om te beschouwen of de techniek voldoende bruikbaar is voor verdere uitwerking in een vervolgtraject. Een belangrijke conclusie uit dit gesprek was dat het voor de schouw van ondiepe systemen niet per se nodig is om de bodem te meten: ook de informatie die volgt uit het alleen hebben van ruis beneden het wateroppervlak is al een waardevolle aanvulling op de nu beschikbare informatie. Immers, als de bodem niet is gemeten is het in ieder geval dieper dan de ruis, is dan de aanname. Dit moet echter nog wel worden geverifieerd, omdat er in dit stadium nog geen uitgebreide aandacht is besteed aan de mate waarin ruis kan worden beschouwd als waardevolle data.

Het is aan te bevelen om een vervolg te koppelen aan een specifiek doel, bijvoorbeeld schouwactiviteiten, zodat kan worden bekeken of inderdaad het 'niet meten van de bodem' gekoppeld kan worden aan de minimaal na te streven diepte van de watergang (voor baggerbezwaar). Tijdens een dergelijk vervolg zou ook meer aandacht moeten zijn voor verschillende technische aspecten, zoals de technische instellingen waarmee wordt ingewonnen en of 's nachts vliegen een beter resultaat geeft. Ook het verkrijgen van consistente en nauwkeurige validatiedata en aanvullende analyse van het signaal of mogelijk zelfs van de *Full Waveform* van het signaal kan de hoeveelheid succesvolle locaties laten toenemen.

# DE STOWA IN HET KORT

STOWA is het kenniscentrum van de regionale waterbeheerders (veelal de waterschappen) in Nederland. STOWA ontwikkelt, vergaart, verspreidt en implementeert toegepaste kennis die de waterbeheerders nodig hebben om de opgaven waar zij in hun werk voor staan, goed uit te voeren. Deze kennis kan liggen op toegepast technisch, natuurwetenschappelijk, bestuurlijk-juridisch of sociaalwetenschappelijk gebied.

STOWA werkt in hoge mate vraaggestuurd. We inventariseren nauwgezet welke kennisvragen waterschappen hebben en zetten die vragen uit bij de juiste kennisleveranciers. Het initiatief daarvoor ligt veelal bij de kennisvragende waterbeheerders, maar soms ook bij kennisinstellingen en het bedrijfsleven. Dit tweerichtingsverkeer stimuleert vernieuwing en innovatie.

Vraaggestuurd werken betekent ook dat we zelf voortdurend op zoek zijn naar de 'kennisvragen van morgen' – de vragen die we graag op de agenda zetten nog voordat iemand ze gesteld heeft – om optimaal voorbereid te zijn op de toekomst.

STOWA ontzorgt de waterbeheerders. Wij nemen de aanbesteding en begeleiding van de gezamenlijke kennisprojecten op ons. Wij zorgen ervoor dat waterbeheerders verbonden blijven met deze projecten en er ook 'eigenaar' van zijn. Dit om te waarborgen dat de juiste kennisvragen worden beantwoord. De projecten worden begeleid door commissies waar regionale waterbeheerders zelf deel van uitmaken. De grote onderzoeklijnen worden per werkveld uitgezet en verantwoord door speciale programmacommissies. Ook hierin hebben de regionale waterbeheerders zitting.

STOWA verbindt niet alleen kennisvragers en kennisleveranciers, maar ook de regionale waterbeheerders onderling. Door de samenwerking van de waterbeheerders binnen STOWA zijn zij samen verantwoordelijk voor de programmering, zetten zij gezamenlijk de koers uit, worden meerdere waterschappen bij één en het zelfde onderzoek betrokken en komen de resultaten sneller ten goede aan alle waterschappen.

De grondbeginselen van STOWA zijn verwoord in onze missie:

*Het samen met regionale waterbeheerders definiëren van hun kennisbehoeften op het gebied van het waterbeheer en het voor én met deze beheerders (laten) ontwikkelen, bijeenbrengen, beschikbaar maken, delen, verankeren en implementeren van de benodigde kennis.*

# METEN VAN WATERDIEPTE MET GROENE LIDAR

## HULPMIDDEL OM BAGGERDIKTE TE BEPALEN?

### INHOUD

	TEN GELEIDE	
	SAMENVATTING	
	DE STOWA IN HET KORT	
<b>1</b>	<b>INTRODUCTIE</b>	<b>1</b>
	1.1 Rationale	1
	1.2 Beoogde toepassingen in Nederland	2
	1.3 Doel van deze studie	3
<b>2</b>	<b>METHODE</b>	<b>4</b>
	2.1 Proces voorafgaand aan de pilot	4
	2.2 Ingevlogen Pilot	4
	2.3 Data en dataverwerking	5
	2.3.1 Data	5
	2.3.2 Inwinning	6
	2.3.3 Strookvereffening	6
	2.3.4 Classificatiestappen binnen het onderzoek	7
	2.3.5 Full Waveform Analyse voor toekomstige verbetering van analyseresultaten	8
<b>3</b>	<b>RESULTATEN</b>	<b>10</b>
	3.1 Resultaten algemeen	10
	3.1.1 Punt dichtheid	13
	3.2 Resultaten per gebied	15
	3.2.1 Validatie	16
	3.3 Vergelijking met andere technieken	19
	3.3.1 Technische vergelijking Riegl VQ-880-G, Riegl VQ-1560i en Single Point Laser (SPL)	19
	3.3.2 Kostenvergelijking met andere technieken	20
<b>4</b>	<b>TECHNISCHE CONCLUSIES VOLGEND UIT DE PILOT RESULTATEN</b>	<b>22</b>



<b>5</b>	<b>DISCUSSIE OVER VERDERE INBEDDING VAN GROENE LIDAR VOOR NEDERLANDSE WATERSYSTEMEN</b>	<b>25</b>
5.1	Stip op de horizon voor groene LiDAR voor Nederlandse toepassingen	25
5.2	Sterke-Zwakte analyse	26
5.3	Kosten-baten overzicht	28
5.4	Aanbevelingen voor vervolgstappen ten behoeve van inbedding van groene LiDAR	28
5.5	Landingsbaan voor groene LiDAR in Nederlandse toepassingen	29
<b>6</b>	<b>REFERENTIES</b>	<b>31</b>
BIJLAGE 1	VERSLAG GROENE LIDAR PILOT NEDERLAND - WORKSHOP	32

# 1

## INTRODUCTIE

### 1.1 RATIONALE

Bathymetische LiDAR (ook wel ‘groene LiDAR’ genoemd) biedt de mogelijkheid om in ondiep water de waterdiepte in te meten vanuit de lucht, mits het doorzicht voldoende goed is (dieptemetingen tot ongeveer  $1-1.5 \cdot$  doorzicht). Reeds in 2015 zijn door Waternet eerste proeven uitgevoerd voor het inmeten van ondiepe sloten in het veenweidegebied nabij Vinkeveen (Van der Vecht & Chantilon, 2015). De resultaten van deze proeven waren echter voor een groot deel van het gebied onsuccesvol, mogelijk doordat de donkere baggerbodem het signaal niet voldoende terugkaatst, maar sluitende conclusies hierover konden niet getrokken worden. Aanvullende analyses met gele LiDAR in laboratorium opstelling gaven betere resultaten, maar gele LiDAR is nog niet als een markt-klaar instrument beschikbaar en zal dit naar verwachting de komende paar jaar nog niet worden (Vasquez, 2017). Infrarode LiDAR (ook wel ‘rode LiDAR’ genoemd, zoals gebruikt wordt voor het invliegen van het Actuele Hoogtebestand Nederland kan slechts tot het wateroppervlakte meten en daarmee blijft de groene LiDAR voorlopig als enige airborne techniek beschikbaar die ook ondiepe bathymetrien kan inmeten. Omdat het niet duidelijk is hoeverre dit instrument goed werkt binnen de verschillende watertypen in Nederland en in hoeverre het bodemtype deze metingen beïnvloedt is in 2018 een pilot gestart naar de algemene toepassingskansen voor groene LiDAR in Nederland. Dit onderzoek beoogt duidelijkheid te creëren over de technische kansen voor dit meetinstrument, én of/ hoe een inbedding in huidige reguliere monitoring in het veld, maar ook koppeling met de reguliere monitoring van het AHN kan zorgen voor een verbetering van de traditionele methoden om waterdiepten te meten in ondiepe wateren.

Ondiepe wateren vormen een belangrijk onderdeel van Nederlandse watersystemen, zowel voor water aan- en afvoer, als voor ecologische waarden. Zowel langs de kust als in het binnenland is er dan ook behoefte aan nauwkeurige en efficiënte meetmethoden om deze belangrijke gebieden in kaart te brengen. De huidige manier om ondiepe wateren in te meten is arbeidsintensief. Voor ondiepe<sup>1</sup> sloten in het veenweidegebied bijvoorbeeld wordt middels handmatige puntmetingen elke 200 meter een watergang in kaart gebracht. Op basis van deze metingen worden baggerplannen gemaakt voor ondiepe watergangen. Ook voor de ondiepe rijkswateren en beeksystemen is behoefte aan een efficiëntere inwintechniek.

Naast het handmatig meten van de ondiepe wateren, wordt het bodem-/grondmodel van diepere wateren al middels multibeam sonarsystemen op schepen ingewonnen. Deze schepen kunnen de ondiepe wateren helaas lastig tot niet bereiken (zowel als gevolg van ondiepte, als ook door de vele bruggetjes en duikers die in ondiepe wateren blokkades vormen), en daarnaast zijn deze multibeam systemen niet geschikt voor ondiepe wateren (ondieper dan  $\sim 1$  meter wordt als problematisch beschouwd). Daarom is de vraag of er vanuit de lucht een alternatieve, snelle en

1 Met ‘ondiepe systemen’ worden watersystemen bedoeld die gemiddeld genomen minder dan 1 meter diep zijn (omdat in deze systemen een multibeam-meting niet nauwkeurig kan worden ingezet), of watersystemen waar met een single- of multibeam instrument op een boot slecht toegang kan worden verkregen of waar diepte limiterend is in het uitvoeren van automatische metingen vanaf een boot.

nauwkeurige werkwijze kan worden gevonden die dit gat in metingen vult. De groene LiDAR is daarbij een goede kanshebber omdat groene LiDAR als commercieel beschikbaar instrument tot een waterdiepte van ongeveer 1.5\* het doorzicht in ondiepe wateren kan meten.

Er zijn verschillende groene LiDAR systemen beschikbaar, zowel op een drone als op een vliegtuig. Omdat een drone slechts kleine stukken kan invliegen per dag (enkele kilometers/dag), gaat de voorkeur uit naar een instrument dat een groter bereik heeft. De vliegtuigtoepassing met de RIEGL VQ-880-G heeft een bereik van ongeveer 200 km/dag als het een lengte-traject betreft (Elbe-case study), of een 300-600 km<sup>2</sup> als het een netto invliegeterrein betreft (pers. comm. F. Steinbacher AHM), afhankelijk van het gekozen gebied en vluchtpad en is daarmee een aantrekkelijkere optie om grotere gebieden in te vliegen. Voor meer achtergrondinformatie over de technische werking van groene LiDAR wordt verwezen naar het Bijlage Rapport - Van Tol (2019).

## 1.2 BEOOGDE TOEPASSINGEN IN NEDERLAND

Er zijn veel verschillende praktische redenen om de groene LiDAR toepassing nu verder uit te werken voor toepassingen in het waterbeheer, die hieronder benoemd worden. Daarnaast bestaat er momenteel ook de wens bij Het WaterschapsHuis (HWH) om de frequentie van het Actueel Hoogtebestand Nederland (AHN) van eens in de 6 jaar te updaten naar 1x per jaar. Via HWH wordt het AHN reeds een tiental jaren als succesvolle toepassing voor het afleiden van hoogte-informatie voor waterbeheer in alle geledingen van de waterschapsorganisatie gebruikt. In 2019 wordt de AHN-3 voor heel NL opgeleverd. Dit is in de afgelopen 6 jaar telkens met 17% van NL gerealiseerd en het opnemen/verwerken wordt aanbesteed aan derden conform duidelijke criteria en vervolgens gespecificeerd door HWH.

Als aan deze metingen ook een groene component kan worden toegevoegd, geeft dit nieuwe mogelijkheden voor andere toepassingen, waardoor de business case AHN (hoogtemonitoring middels rode laser (boven water)) sterker onderbouwd wordt, gezien ook de toename van de informatie-inwinning en verwerkingskosten.

Belangrijke kansen die ontstaan bij verhoging van de opname frequentie van het AHN zijn:

1. Jaarlijkse update van leggerbestanden (watergangen, kunstwerken, etc.)
2. Maaiveld dalings indicaties (zoals zetting/zakking veenweidegebieden) sneller opnemen in de modellen voor hydrologie/sturing, wateropgaaf (proces ondersteuning)
3. Snellere update van de status van keringen (dwarsprofielen), beheer & onderhoud
4. Illegale onderbemalingen/peilafwijkingen
5. Illegale bebouwing op/langs water
6. Slecht functionerende duikers door peilverschillen tussen duikers
7. Ondersteuning van het jaarlijkse schouw-proces (indicatoren, erosie, hellingen, dwarsprofiel, etc.)

Het hebben van een gecombineerde groen-rode laser dataset van hoogtes zowel boven als onder water vanuit de groene en rode LiDAR geeft (bij bewezen succes) veel aanvullende mogelijkheden voor waterbeheer:

- Optimaliseren van de bagger-onderhoudswerkzaamheden en het mogelijk controleren van aannemers op het daadwerkelijk verwijderde volume aan bagger
- Afwegen noodzaak tot onderhoud van oevers en waterbodems van waterlopen (baggeren, oeveronderhoud)

- Opsporen eerste stadia van verlanding/ demping
- Illegale stuwtjes en onderwatersperringen
- Inventariseren status van onderwater-oeveren en begroeiing, veranderingen in legger
- Integrale monitoren duinhoogte/ strand en zandbanken/ intergetijdegebied / kwelders / schorren /slikken/ondiepe kustzone

Aspecten als de daadwerkelijk te behalen nauwkeurigheid blijven een belangrijk aandachtspunt in deze metingen vanuit de lucht, en moeten in vergelijking met de standaardmethoden voldoende nauwkeurigheid opleveren.

### 1.3 DOEL VAN DEZE STUDIE

Het doel van deze studie is om:

1. In kaart te brengen waar metingen met de groene LiDAR succesvol zijn en waar niet, en daarbij een relatie te leggen tot de bodem- en watergesteldheid, diepte, etc.
2. Te evalueren hoe goed de groene LiDAR metingen zijn, gebruikmakend van grondvalidatiemetingen van de betreffende locaties en van andere referentiedata zoals AHN2 en AHN3, (bathymetrische) referentiemetingen uit Rotterdam, landmeetkundige referentiemetingen, etc.
3. Te beschouwen in hoeverre de groene LiDAR uit de pilots om inzicht te krijgen in de karakteristieken van nieuw beschikbare instrumenten (Riegl 1560i DW, Single Photon LiDAR) die mogelijk ingezet kunnen worden voor AHN4, zich verhouden tot de groene LiDAR die speciaal voor ondiepe bathymetrische metingen beschikbaar is (Riegl VQ880)
4. Te beschouwen hoe bruikbaar de inzet van groene LiDAR is in relatie tot de huidige standaard werkwijze voor het inmeten van ondiepe waterbodems, rekening houdend met vereiste criteria zoals nauwkeurigheid van de meetgegevens.
5. Het beschrijven van een mogelijke businesscase voor de inzet van groene LiDAR voor verschillende beheervraagstukken in Nederlandse wateren incl. de bijbehorende landingsbaan voor implementatie van dit proces.

Om deze uitdaging in dit onderzoek aan te kunnen gaan is de volgende hoofdvraag opgesteld:

- Waar kan in Nederland met behulp van groene LiDAR de waterbodem gemeten worden, tot welke diepte en met welke dichtheid?

Om hier een goed antwoord op te kunnen geven zijn de volgende deelvragen opgesteld:

- Wat voor geometrische kwaliteit en puntdichtheid kan er op de waterbodem behaald worden?
- Welke inwinningsfactoren hebben invloed op het resultaat van de meting?
- Welke omgevingsfactoren hebben invloed op het resultaat van de meting?
- Wat voor optimalisatie kan er met de postprocessing bereikt worden?

In een samenwerkingsverband tussen Het Waterschapshuis, Deltares, Stowa en Waternet is een pilot georganiseerd waarbij de mogelijkheden worden bekeken van groene LiDAR voor de ondiepere Nederlandse binnenwateren. De pilot is gefinancierd door Stowa, Rijkswaterstaat, verschillende waterschappen, RWS, de GasUnie en de Gemeente Rotterdam (volledige lijst van deelnemers in bijlage 1).

Uit de pilot komt informatie of, en voor welke gebieden in Nederland met de groene LiDAR waterbodem gedetecteerd kan worden, waarom dit wel of niet werkt en of de techniek mogelijkheden biedt voor de toekomst.

# 2

## METHODE

In dit hoofdstuk beschrijven we het proces en de gebruikte methoden om tot de voorliggende resultaten te komen.

### 2.1 PROCES VOORAFGAAND AAN DE PILOT

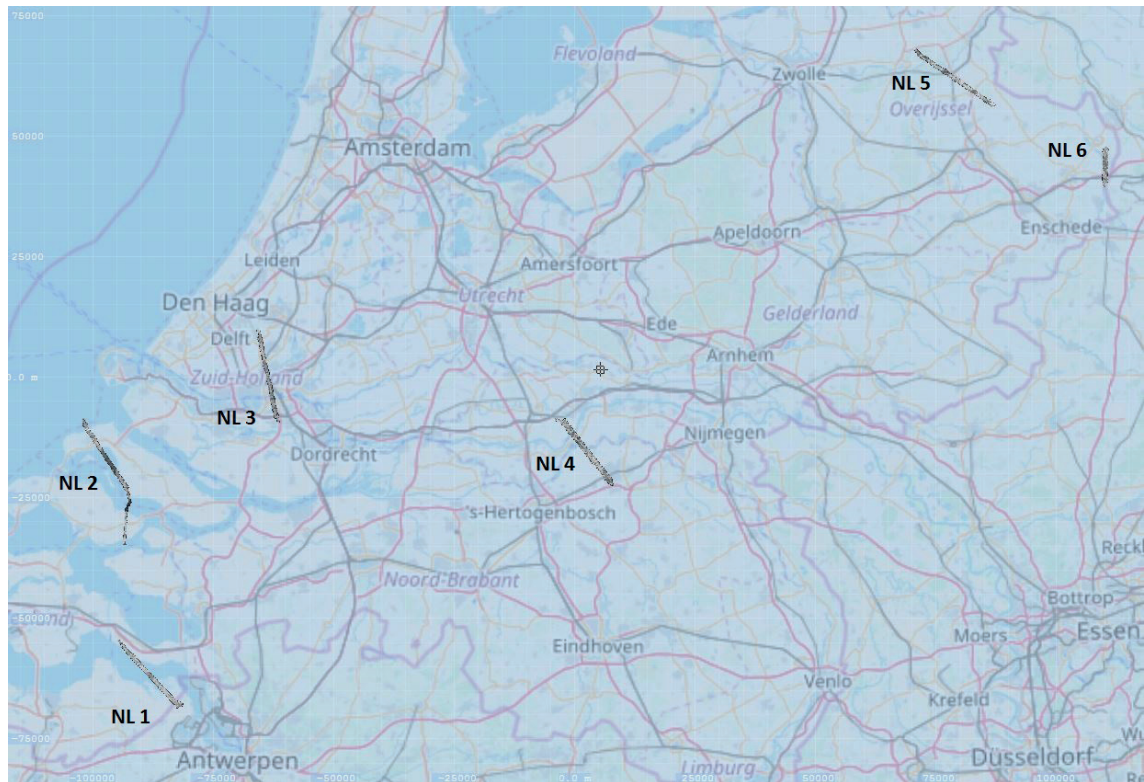
In 2015 heeft Waternet een groene LIDAR pilot uitgevoerd die zich heeft gefocust op het veenweide gebied bij Wilnis, waar weinig locaties succesvol konden worden ingemeten. Dit werd toegeschreven aan een te laag doorzicht van het water gedurende hun vlucht in april (Van der Vegt en Chatillon, 2015). Andere mogelijke belemmerende factoren in dit resultaat is de donkere veenweide bodem, omdat een aantal zandige/harde oevers beter was ingemeten (pers. comm. Waternet). Eind 2017 is gestart met de discussie om als eerste stap in kaart te gaan brengen in welke watertypen de groene LIDAR techniek resultaten kunnen halen en waar het problematisch is. De resultaten van zo'n pilot moeten goed gekoppeld kunnen worden aan de bodem- en wateromstandigheden in het veld. Er is dan ook gekozen voor het opzetten van een pilot voor het uitvoeren van een testvlucht met een groene LiDAR. Er zijn in samenspraak met betrokken partijen 6 pilot locaties gekozen met verschillende water- en bodemtypen om zo te komen tot een inzicht waar de groene LiDAR toepassing mogelijk kan zijn. Het streven was om in het vroege voorjaar een vlucht over deze locaties uit te voeren.

Tevens zijn (in een parallel proces) begin 2018 drie pilot-gebieden voor het nieuwe AHN ingevlogen gebruikmakend van een rode laser, met een groene component (Riegl VQ-1560i-DW). Drie van deze locaties komen (deels) overeen met testgebieden vanuit de groene LiDAR-proef (Rotterdam (NL 3), Westerschelde (NL 1) en Brabant/Rivierenland (NL 4)).

### 2.2 INGEVLOGEN PILOT

Op 16 april 2018 is er in opdracht van HWH door de Oostenrijkse partij AHM met een groene laser met een rode component (Riegl VQ-880) de additionele set van 5 pilotgebieden ingevlogen (Figuur). Een beoogde 6<sup>e</sup> locatie in het veenweide gebied onder Amsterdam kon door luchtverkeersbelemmeringen vanuit Schiphol helaas niet worden ingevlogen. De keuze voor een vlucht in maart-april komt voor uit het feit dat doorgaans in het vroege voorjaar (nog zonder begroeiing door waterplanten) helder water wordt aangetroffen, en dit biedt dan ook een goede kans om deze metingen uit te voeren specifiek in dit seizoen. Tevens moest rekening worden gehouden met het getijde-systeem ten tijde van invliegen (laag tij geeft beter resultaat door minder grote waterkolom), wat maakte dat er niet eerder in het voorjaar is gevlogen. Tegelijkertijd met de gevlogen pilot is er door de betrokken waterschappen validatiedata verzameld (o.a. doorzicht, handmatige inwinning van waterdiepte en een beschrijving van het bodemtype) De data van deze groene LiDAR vlucht vervolgens verwerkt door het waterschapshuis in samenwerking met AHM en Deltares.

FIGUUR 2.1 OVERZICHT VAN INGEVLOGEN LOCATIES MET DE GROENE LIDAR



## 2.3 DATA EN DATAVERWERKING

### 2.3.1 DATA

Er is gebruik gemaakt van discrete LiDAR data (punten-geen full wave form) voor de analyses. Het standaard gebruikte bestandsformaat voor LiDAR data is een LAS<sup>2</sup>-file. Daarnaast zijn er ook LAZ-files (welke gebruikt zijn voor de pilot), dit zijn gecomprimeerde LAS-files. In een LAS of LAZ-bestand is alle XYZ-data opgeslagen, afhankelijk van de instellingen tijdens de survey kunnen er ook nog andere kenmerken in opgeslagen worden, zoals:

- Intensiteit
- Number of returns
- Return number
- Scanhoek (Voor de scans tijdens de testpilot van de RiegI VQ880-G is een vaste scanhoek van 20 graden (vanaf het nadir) gebruikt.
- Scanrichting (niet altijd van toepassing)
- Gps-tijd
- Punt classificatie<sup>3</sup>

In de post-processing kunnen LiDAR punten geclassificeerd worden in verschillende klassen. Zo kan er onderscheid gemaakt worden tussen bijvoorbeeld grond, water, bebouwing, vegetatie, etc. Iedere klasse is gecodeerd met een nummer, deze nummers zijn voor de LAS versies 1.1 t/m 1.4 voor gedefinieerd in vaste klassen. De klassen die hiervan gebruikt zijn tijdens het onderzoek zijn weergegeven in Tabel 2.1

2 [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS\\_1\\_4\\_r13.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS_1_4_r13.pdf)

3 Voor technische details van de volledige dataverwerking zie Van Tol, 2019

TABEL 2.1

DE GEBRUIKTE KLASSEN VOOR DE CLASSIFICATIE VAN DE POINT CLOUD IN DEZE PILOT

0	Class 0	Alle punten voor geclassificeerd als geen grond
2	Ground	Grond
6	Building	Gebouwen
7	Low point	Voor ruis
9	Water	Wateroppervlak
16	Tree	Bomen
30	Long range	Waterbodem
31	Temp 1	Tijdelijke opslagklasse
32	Temp 2	Tijdelijke opslagklasse

Het LiDAR signaal tijdens de inwinning wordt beïnvloedt door verschillende aspecten, te weten: puls-energie, scansnelheid, puls-frequentie, lasergolflengte, vlieghoogte, field of view, footprint, scanpatroon en vliegsnelheid (zie Van Tol, 2019 voor de totale uitleg hierover en de invloeden van omgevingsaspecten als gevolg van reflectie, absorptie en refractie door het water op deze inwinning). Tijdens deze pilot is gewerkt met maar één configuratie, waardoor er geen analyses mogelijk waren op de invloed van deze aspecten op de behaalde resultaten. Ook wordt het LiDAR signaal beïnvloedt door verschillende omgevingsaspecten zoals de reflectie die afhankelijk is van de stand van de zon (en tijdens de dag verschilt) en bijvoorbeeld de 'ruwheid' van het wateroppervlak – denk aan golven. Ook de refractie en absorptie in het water dragen bij aan het uitdoven van het signaal.

Voor de dataprocessing zijn hoofdzakelijk twee softwarepakketten gebruikt. Dit zijn HydroVish van AHM (<http://ahm.co.at/software/>) en Terrascan van Terrasolid (<http://www.terrasolid.com/products/terrascanpage.php>). Vooraf was gepland om in HydroVish te processen, maar doordat er nog een aantal bugs in het softwarepakket zaten is de overstap gemaakt naar Terrascan. De data die is aangeleverd voor het onderzoek is ingewonnen en vereffend door AHM. Details over de dataverwerking kunnen worden gevonden in Van Tol, 2019. Hieronder volgt een korte samenvatting van de gebruikte stappen.

### 2.3.2 INWINNING

Tijdens de LiDAR meting zijn aan boord van het vliegtuig een GPS (Global Positioning System) en IMU (Inertial Measurement Unit) aanwezig. Hierbij zorgt de IMU ervoor dat de schommelingen van het vliegtuig geregistreerd worden (de pitch, roll en yaw) en de GPS registreert de positie. Daarnaast is binnen het vlieggebied een GPS-basisstation opgesteld wat ervoor zorgt dat er RTK (Real Time Kinematic) verbinding gemaakt kan worden, zodat de positie nauwkeuriger bepaald kan worden.

Na de survey worden alle GPS en IMU-data verwerkt tot zgn. *trajectory files*. Een trajectory file bevat de gecorrigeerde vliegtuig positie en hoogte informatie. Deze trajectory file wordt vervolgens gecombineerd met de ruwe LiDAR data, waarna alles gecombineerd wordt tot een LAZ-file.

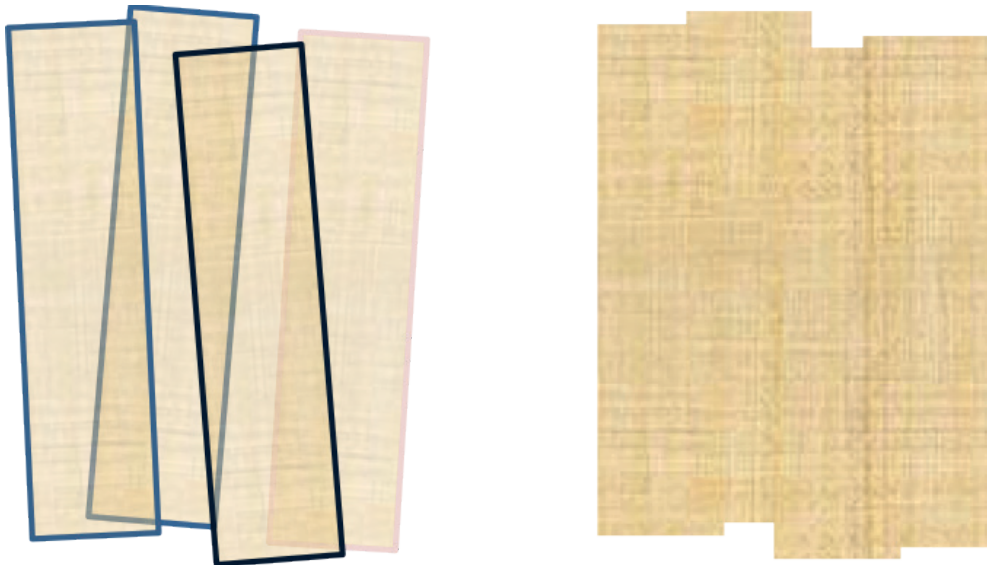
### 2.3.3 STROOKVEREFFENING

Nadat de LAZ-files geëxporteerd zijn moeten ze aan elkaar gekoppeld worden, de vliegstroken liggen immers nog los van elkaar en zijn nog geen eindproduct.

Ondanks de nauwkeurige oriëntatie kunnen de stroken nog kleine verticale verschillen bevatten, om deze verschillen eruit te halen wordt relatieve vereffening toegepast (Figuur 2.2).



FIGUUR 2.2 LINKS DE VLIESTROKEN VOOR RELatieve VEREFFENING EN RECHTS NA DE VEREFFENING



Als de vliegstroken gelijk liggen moet er alleen nog gezorgd worden dat deze ook gelijk liggen ten opzichte van het RD-NAP. Dit wordt gedaan door bekende punten in de data gelijk te leggen met punten uit het RD-NAP. Dit wordt ook wel absolute vereffening genoemd (Figuur 2.3).

FIGUUR 2.3 LINKS DE VLIESTROKEN VOOR ABSOLUTE VEREFFENING EN RECHTS NA VEREFFENING MET DE GROENE BLOKJES EEN BEKEND PUNT IN RD-NAP



#### 2.3.4 CLASSIFICATIESTAPPEN BINNEN HET ONDERZOEK

Het belangrijkste onderdeel van de dataverwerking is het classificeren van de pointcloud in de verschillende klassen die nodig zijn voor een goede eindevaluatie. Hierbij worden drie stappen onderscheiden (Zie Van Tol, 2019 voor details)

Stap 1: Onderscheid maken tussen grond, geen grond en ruis

Stap 2: Onderscheid maken tussen water(opervlak) en waterbodem

Stap 3: Bepalen of het LiDAR signaal bodem heeft gedetecteerd.



In elk van deze stappen worden punten toegewezen aan een nieuwe klasse en ten slotte wordt de bodem gefilterd op bodemdetectie. Dit is gedaan door het isolatie-punten filter te gebruiken. Er is bekeken welke instellingen overeenkomen met een op het oog zichtbare bodem (Figuur 24), dit ligt op een minimum van 10 punten binnen elke 3D straal van een halve meter en is daarmee een dichtheidsfilter. Wanneer er minder punten aanwezig zijn worden bodempunten automatisch overgezet naar de klasse tussenwater. Het filter is uitgebreid getest op verschillende soorten bodemtype en geeft een consistent resultaat.

Er is in de uiteindelijke verwerkingen geen rekening meer gehouden met de breking die optreedt bij het betreden van de waterkolom. In de HydroVish software kan gebruik worden gemaakt van een correctie voor de breking van het licht de waterkolom in, maar binnen de uiteindelijk gebruikte Terrascan is dit helaas niet het geval. We verwachten dat de resultaten hierdoor voor de diepere stukken enigszins afwijken van de werkelijk gemeten waarde, maar dit zou in vervolgotrajecten kunnen worden verbeterd door een brekings-index correctie toe te voegen aan het Terrascan algoritme.

FIGUUR 2.4 LINKS IS BODEMDETECTIE ZICHTBAAR EN RECHT IS GEEN BODEMDETECTIE ZICHTBAAR

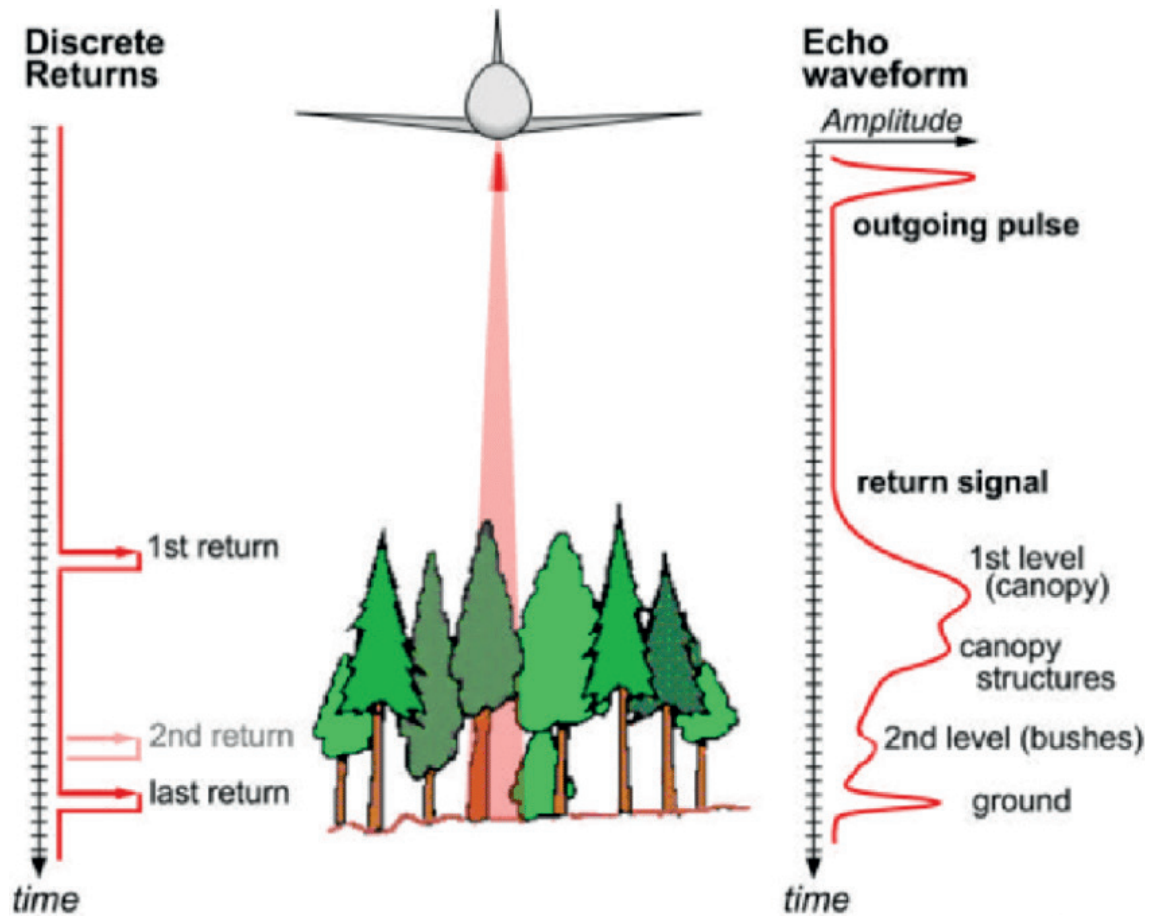


### 2.3.5 FULL WAVEFORM ANALYSE VOOR TOEKOMSTIGE VERBETERING VAN ANALYSERESULTATEN

Full Waveform LiDAR is een techniek waarbij het volledige tijdsverloop van een enkele lichtpuls wordt opgenomen [Krause, K. (2016)], in tegensstelling tot Discrete Return LiDAR waarbij alleen de looptijds-verschillen van de exacte punten van de returns worden opgenomen (Figuur 2.5). Het voordeel van Full Waveform LiDAR is dat de informatie uit het volledige waveform signaal gebruikt kan worden om geringe afwijkingen te analyseren ten opzichte van de onafhankelijke returns. Wat ervoor zorgt dat de nauwkeurigheid verhoogd kan worden.

Momenteel wordt er tijdens de inwinning een threshold ingesteld, waardoor niet het volledige signaal wordt opgenomen, maar alleen discrete punten en er dus een gedeelte van de data verloren gaat. Dit komt omdat harde schijven nog niet het volledige signaal tijdens de metingen op tijd weg kunnen schrijven. In de nabije toekomst gaat dit wel mogelijk worden en zal er dus meer data uit hetzelfde signaal gehaald kunnen worden (pers. comm. AHM). De kwaliteitswinst voor LiDAR data zal dan ook de komende jaren voor een deel te behalen zijn met FWA (Full Waveform Analyse) en verdere verbetering van data-analyse algoritmen in het algemeen en niet zo zeer op hardware matig gebied.

FIGUUR 2.5 LINKS HET DISCRETE RETURN SIGNAAL EN RECHTS HET FULL WAVEFORM SIGNAAL. DE DETECTIE VAN PIEKEN IN HET FULL WAVEFORM SIGNAAL RESULTEERT IN DE DISCRETE RETURN SIGNALEN



# 3

## RESULTATEN

### 3.1 RESULTATEN ALGEMEEN

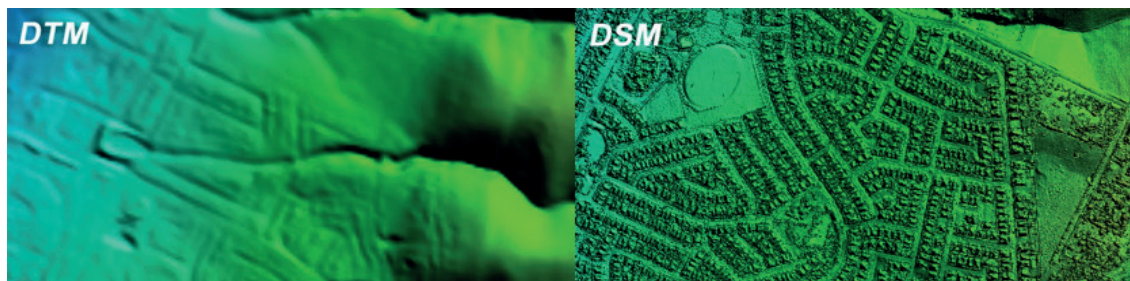
Op 16 April zijn de 6 pilotgebieden ingevlogen, waarbij de onderstaande vluchtparameters zijn gebruikt (Tabel 3.1)

TABEL 3.1 VLUCHTPARAMETERS TIJDENS DE PILOT

Vluchtparameters	
Datum	16 April
Vlieghoogte	400m
Vliegsnelheid	80-90 kts
Scanbreedte	300m
Pulsfrequentie	550khz
Scan Speed	80 lijnen per seconde
Field of view	20°
Laser beam divergence	1.1 mrad

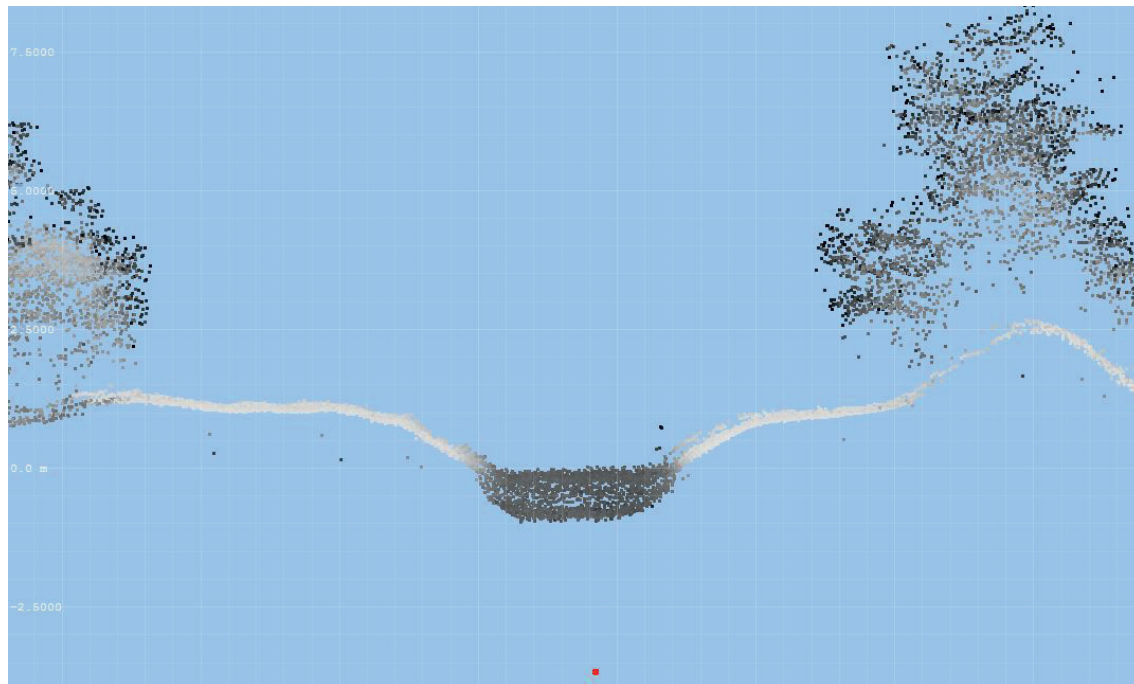
Het hoofdproduct uit een groene LiDAR meting is een puntenwolk, wat bestaat uit een verzameling punten die allemaal een eigen XYZ-oriëntatie hebben. In ondersteunende software kan de puntenwolk in een 3D perspectief gevisualiseerd worden om analyses te maken. Daarnaast kan de puntenwolk omgezet worden in een aantal afgeleide producten welke geschikt zijn voor de verwerking in GIS-systemen. Hoofdzakelijk zijn de afgeleide producten twee standaardmodellen, dit zijn het Digital Terrain Model (DTM) en het Digital Surface Model (DSM) (Figuur 3.1). De DTM is een model van het terrein waarin alle gebouwen, bomen en objecten boven de grond weg gefilterd worden. De DSM is een model waarin alle data behouden wordt. Voor dit onderzoek zijn de afgeleide producten minder van belang en ligt de focus vooral op het classificeren en filteren van de data om van hieruit een analyse te kunnen maken.

FIGUUR 3.1 HET VERSCHIL TUSSEN EEN DTM EN DSM

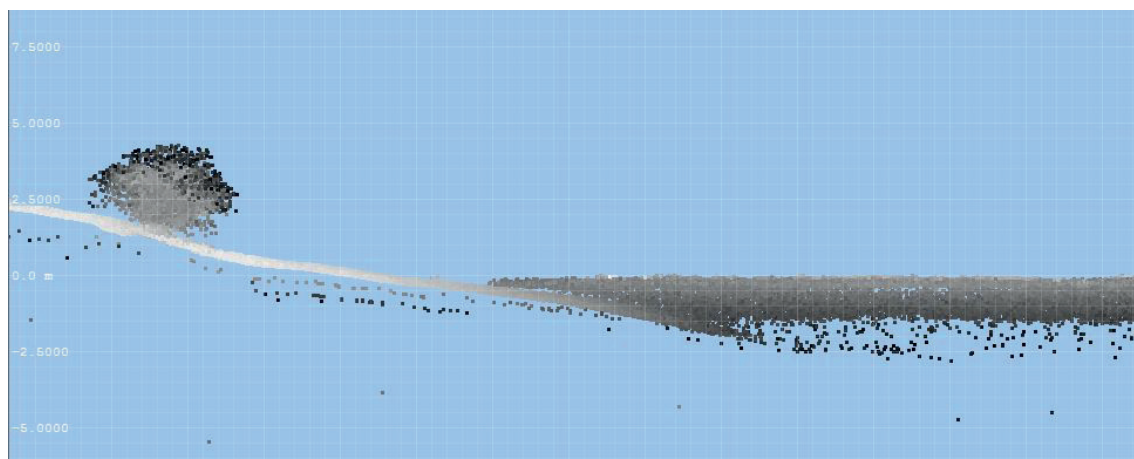


Een eerste blik op de ruwe point cloud uit de verschillende deelgebieden geeft al aan dat soms de bodem wel (Figuur 3.2), en soms ook maar matig (Figuur 3-3) en soms ook niet goed (Figuur 3.4) wordt gemeten.

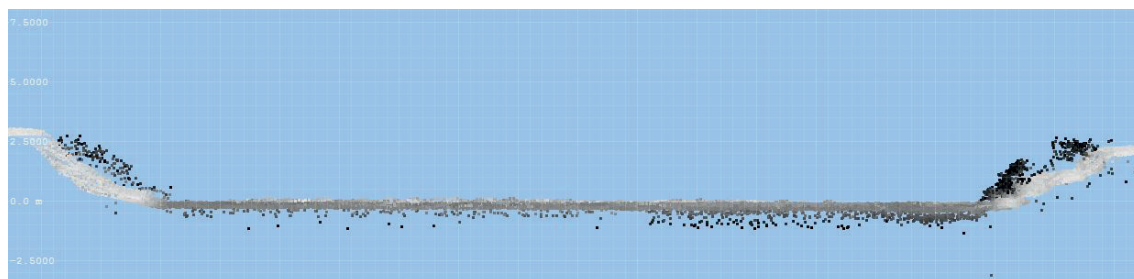
FIGUUR 3.2 LOCATIE 2- P2 – VOORBEELD VAN EEN GOEDE BODEMREGISTRATIE (1M DIEP)



FIGUUR 3.3 LOCATIE 4 P2A – VOORBEELD VAN EEN MATIG GOEDE BODEMREGISTRATIE (TOT ONGEVEER 2M DIEPTE, DAARNA GAAT HET SIGNAAL VERLOREN)



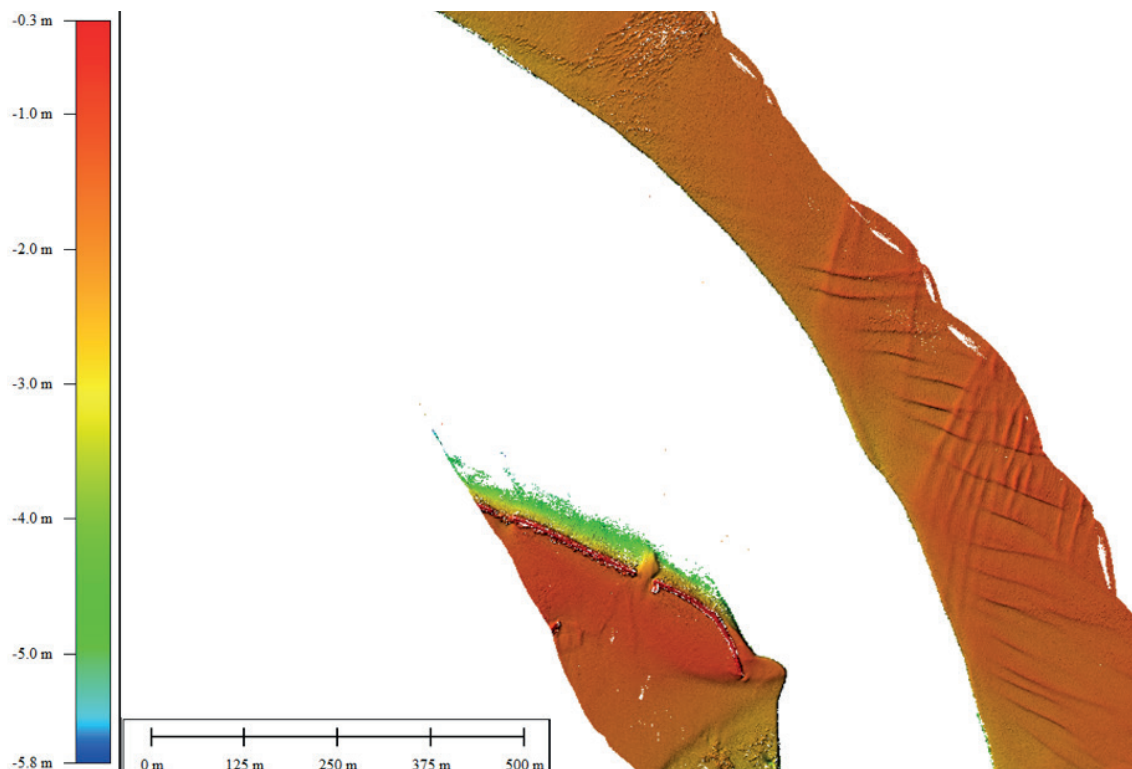
FIGUUR 3.5 LOCATIE 5 P2A – VOORBEELD MET MINDER GOEDE REGISTRATIE VAN HET BODEM PROFIEL (ENKEL HET WATEROPPERVLAK IS IN KAART GEBRACHT MAT WAT RUIS ONDER DE WATERSPIEGEL)



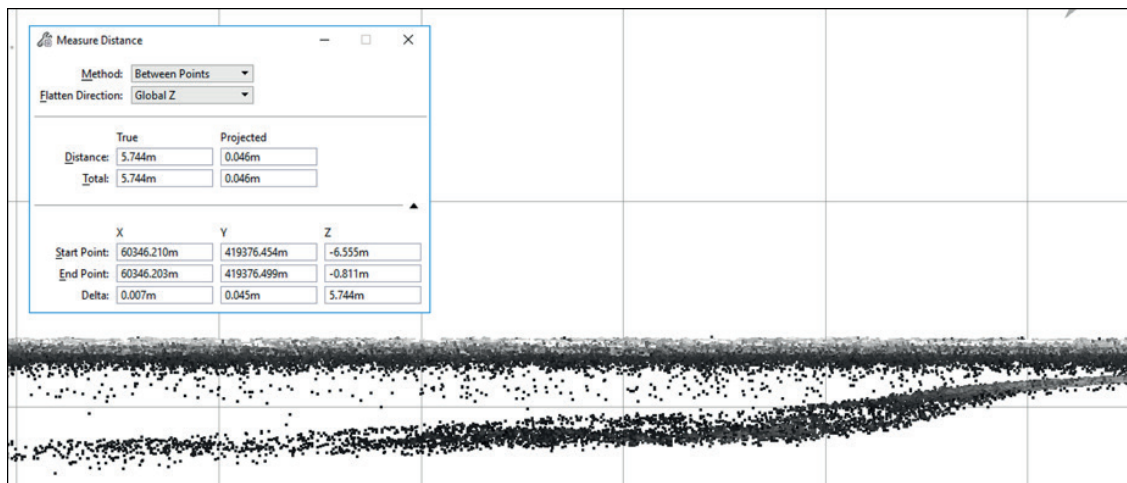
De maximaal behaalde gedetecteerde waterbodem diepte over de gehele pilot is 5,24m, gemeten in het Grevelingenmeer. Op sommige plekken zijn diepere punten behaald, alleen is het de vraag of het hierbij om bodem of ruis gaat. De diepste punten (Figuur 3.5) zijn gemeten aan de rand van een vaargeul, binnen de diepere vaargeul zelf komt geen signaal terug. De vaargeul zelf moet verder met multibeam ingemeten worden om tot een vlakdekkende kaart

van het gebied te komen. In (Figuur 3.6) is een dwarsdoorsnede te zien waaruit kan opgemaakt worden dat er punten zichtbaar zijn van 5,74m.

FIGUUR 3.5 EEN GEDEELTE UIT DE METING VAN HET GREVELINGENMEER (ZIE FIGUUR 3.7 VOOR HET TOTALE PLAATJE VAN HET GEBIED)



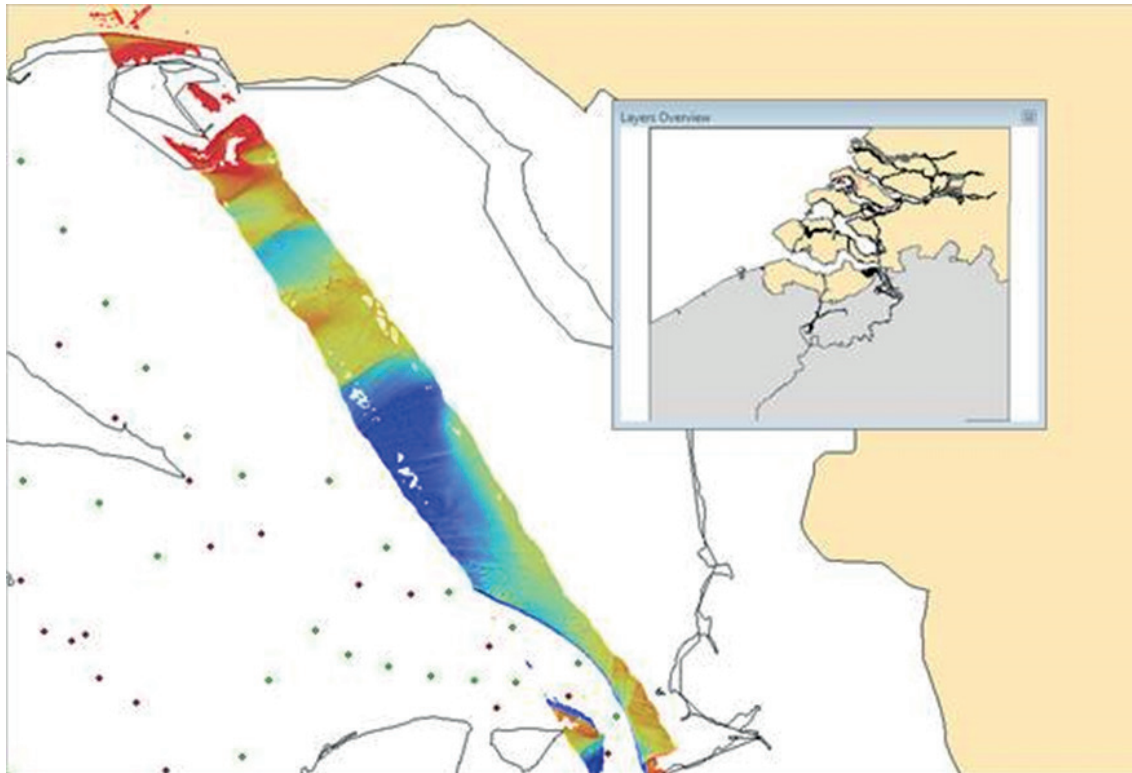
FIGUUR 3.6 EEN DWARSDOORSNEDE OP HET DIEPSTE PUNT IN HET GREVELINGENMEER



De eerste indruk van de bodemhoogte in het Grevelingenmeer komt goed overeen met de referentiemetingen, al neemt de fout wel toe met de diepte. Mogelijk komt dit doordat niet is gecorrigeerd voor de refractie van het lichtsignaal en dat dit op de diepere delen (zoals in het Grevelingen meer wordt aangetroffen) juist een rol gaat spelen. Daarnaast worden in het wateroppervlakte-bestand flinke hoogteverschillen gevonden van tot wel 1m hoog. Het is onzeker hoe dit te verklaren is. Mogelijk dat door zonnestraling reflectie en ruis optreedt die dit in de hand werkt, maar er is nu geen verdere analyse op gedaan. Het wordt aangeraden een vervolgstest te doen door ook 's nachts te vliegen om mogelijke effecten van zonnestraling uit te sluiten.



FIGUUR 3.7 TOTAAL OVERZICHT VAN HET INGEVLOGEN GEBIED, MET ENKELE REFERENTIEPUNTEN AANGELEVERD DOOR RWS



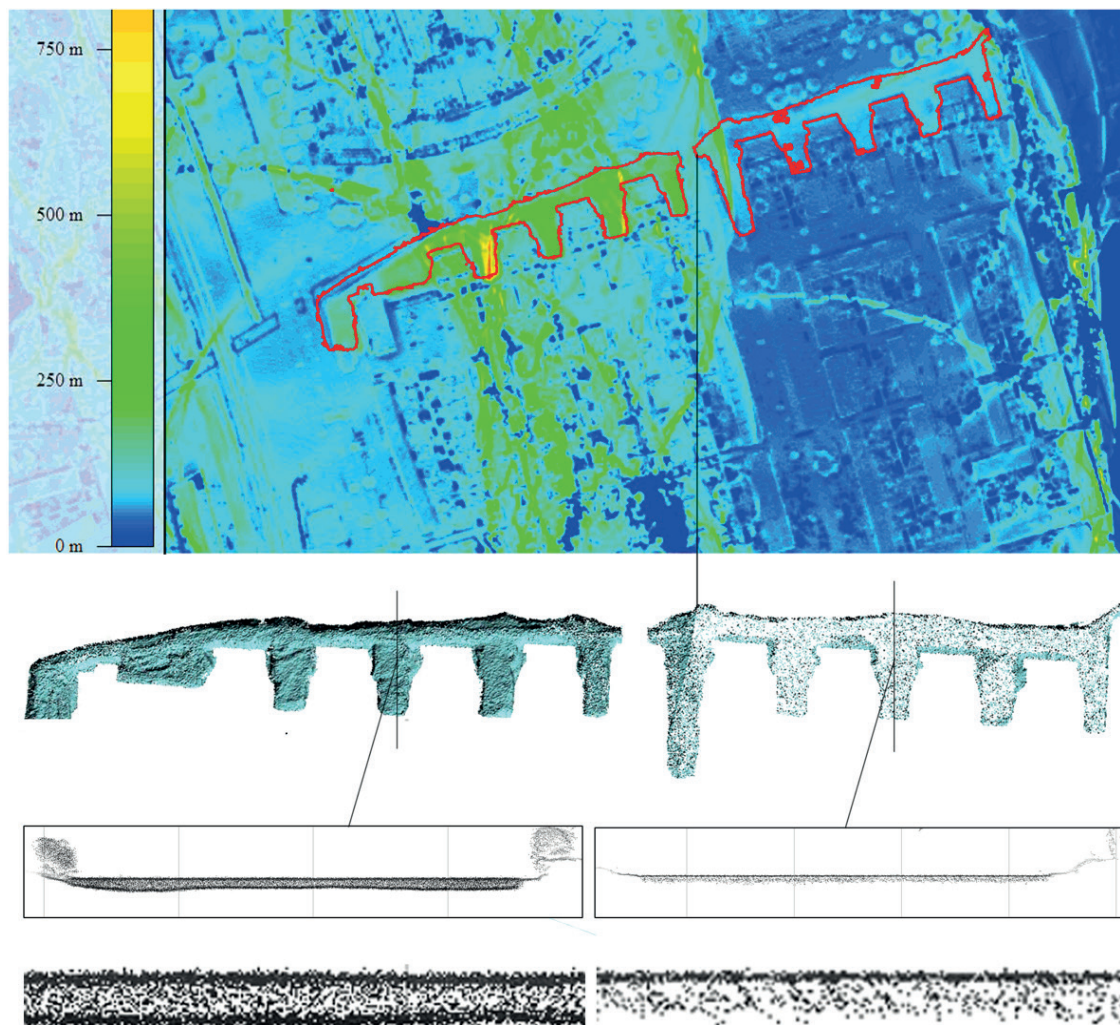
In diepe vaarwateren zoals de Nieuwe Maas en de Waal is geen bodem gemeten. Wel komt er signaal terug tot een diepte van 2m. In breed ondiep water zijn goede resultaten behaald, vooral recreatiewateren en plassen geven een goede dekking, maar veel smalle wateren worden maar deels gezien met de techniek.

### 3.1.1 PUNTDICHTHEID

De punt dichtheid over de gehele pilot is zeer wisselend. Door overlappende vliegstroken en ook aan de randen van het conische scanpatroon kunnen de punt dichtheden uitschieten naar totaal zo'n 400 punten per vierkante meter. De nauwkeurigheid van de bodemdetectie hangt hier vaak mee samen. Op plekken waar hetzelfde water wordt gemeten met verschillen in punt dichtheid is er soms een duidelijk verschil te zien in bodem die wel of niet betrouwbaar gedetecteerd wordt (Figuur 3.7). In **beide** gevallen is de bodem bereikt, maar het nu gebruikte algoritme is niet in staat is om bij lagere dichtheden de bodem als zodanig te herkennen, zelfs als deze wel is ingemeten. In het nu gebruikte algoritme is bekeken welke instellingen overeenkomen met een op het **oog zichtbare bodem**, dit ligt op een **minimum van 10 punten binnen elke 3D straal van een halve meter**. Wanneer er minder punten aanwezig zijn worden bodempunten automatische overgezet naar de klasse tussenwater. Aanpassingen in de algoritmes moeten verder worden uitgewerkt om het mogelijk te maken niet van zo'n criterium afhankelijk zijn, om een betere uitspraak te kunnen doen over de gemeten bodem.

De conische scanpatronen leveren zeer variabele dichtheden op per flightstrip. Het slootgedeelte links in figuur 3.7 heeft het geluk dat er meerdere scanlijnen op de sloot vallen. Dit wordt overigens nog eens benadrukt door de getrokken profielen, die in het slootgedeelte rechts haaks op het scanpatroon staat, waardoor er nog minder punten worden getoond.

FIGUUR 3.8 EEN HOGERE PUNTDICHHEID DOOR OVERLAP ZORGT IN BOVENSTAAND RESULTAAT VOOR BODEMDETECTIE IN HET GEBIED VAN ROTTERDAM. IN DE LEGENDA STAAT DE TOTALE PUNTDICHHEID (EN NIET DE PUNTDICHHEID BIJ DE BODEM)



In kleine slootjes die binnen een breedte van 2,5 m vallen, is de dichtheid aan punten vaak te laag voor het herkennen van een duidelijke bodem of wateroppervlak. Soms is het onderscheid tussen bodem en wateroppervlak over een smalle dwarsdoorsnede goed zichtbaar (Figuur 3.8), maar niet in alle gebieden gaat dit goed. Een inwinning met hogere punt dichtheid of gebruik maken van een full waveform analyse zou een uitkomst kunnen bieden om een hogere nauwkeurigheid te behalen en er een duidelijker onderscheid te maken tussen water en bodem. Daarnaast waren er geen luchtfoto's van de invliegdatum beschikbaar waardoor het onduidelijk is hoe de sloten er precies bij lagen, bijvoorbeeld of er water of begroeiing aanwezig was (Figuur 3.9).

Er wordt aangeraden om in een vervolganalyse beter te kijken naar de minimale breedte van een sloot waarop nog voldoende punten kunnen worden ingewonnen om een onderscheid tussen water en bodem te kunnen maken. Wanneer blijkt dat door het conische scanpatroon een groot deel van de pulsen verloren gaat en de bodem van deze ondiepe watergangen nauwelijks wordt bereikt, heeft dit mogelijk groot effect op het toepassingsbereik van de methode voor smalle watergangen. Door het nu gebruikte algoritme is dit echter nog niet goed vast te stellen, en nadere analyse is nodig.

FIGUUR 3.9 WATERBODEM EN OPPERVLAK ZIJN ZICHTBAAR IN EEN KLEINE SLOOT



FIGUUR 3.10 DE NAUWKEURIGHEID EN DICHTHEID ZIJN REDELIJK, ALLEEN IS HET ONDUIDELIJK OF HET WATER, BODEM OF DROGE GROND IS



### 3.2 RESULTATEN PER GEBIED

De resultaten per gebied zijn samengevat in Tabel 3.2. Hieruit blijkt dat gebruikmakend van het huidige algoritme per deelgebied gemiddeld 46% van de waterbodem als zodanig is geïdentificeerd, met een gemiddelde maximale diepte van -2.44 m ten opzichte van het aldaar vigerende waterpeil. Voor koppeling met de daadwerkelijk NAP-waarden moeten deze waarden nog verder gecorrigeerd worden naar geijkte NAP-standaarden, maar dat is nu nog niet gedaan. Ook is er nog niet gekeken of er met een ander algoritme een beter resultaat te behalen valt.

Opvallend genoeg zijn de gemeten waterdiepte maxima in de Vecht en de Dinkel, met hun zandige bodem en vrij heldere waterkwaliteit de wateren de laagste waarden van maximaal geïdentificeerde waterbodem-diepte. Het is bekend dat deze wateren op sommige locaties veel dieper kunnen zijn (tot 3,5 meter diepte), maar de maximale ingemeten waarden komen niet verder dan 1, 12 meter waterdiepte. Hiervoor is geen verdere goede verklaring gevonden, mede temeer omdat de waterkwaliteit en bodemtype verondersteld worden het 'beste' te zijn: dat wil zeggen: harde zandige bodem en relatief helder water. Hoewel bomen mogelijk voor belemmering zorgen in sterk overgroeide beeksystemen, is dat voor de brede Vecht ook niet het geval, mogelijk dat dit bij de smallere Dinkel wel een rol speelt, maar het verklaart nog niet waarom het bij de Vecht dan niet zo is. Voor detailinformatie per gebied zie Van Tol, 2019.



TABEL 3.2 SAMENVATTENDE RESULTATEN VAN DE VERSCHILLENDE PILOTGEBIEDEN

	Westerschelde	Grevelingen	Rotterdam	Oss	Vecht	Dinkel	Gemiddeld
Tot. gemeten oppervlak (km <sup>2</sup> )	14.26	12.30	13.46	18.26	14.04	7.53	13.31
Tot. gemeten wateroppervlak (km <sup>2</sup> )	2.28	4.88	1.51	0.21	0.38	0.23	1.58
Tot. gemeten bodemoppervlak (km <sup>2</sup> )	0.79	3.34	0.39	0.04	0.23	0.15	0.82
Percentage ingemeten bodem (%)	34.50	68.42	25.88	20.54	59.89	65.81	45.84
Gem. punt dichtheid waterbodembodem (m <sup>-2</sup> )	37.33	58.89	17.63	15.70	23.17	52.63	34.22
Max. gemeten waterbodembodemdiepte (m)	-5.04m	-5.240	-2.46	-2.304	-1.08	-1.12	-2.44

















### 3.2.1 VALIDATIE

Van verschillende waterschappen zijn er referentiedata aangeleverd van diepte- en doorzichtmetingen op locaties die ook tot de ingevlogen proefstroken behoren, en die in dezelfde periode van het jaar zijn ingemeten. Het betreft hier veelal 1 punt op 1 locatie, in sommige gevallen voor meerdere data. De referentie data is daarmee geen uitgebreide set, waar goede statistische uitspraken over te doen zijn. In Tabel 3.3 staat een overzicht tussen de gemeten referentiediepte en de met de LiDAR behaalde dieptemetingen op dat punt. Zowel de Dinkel als de Vecht hebben stukken waar de bodem wel én niet wordt ingemeten, terwijl de referentiedieptes aldaar niet bijzonder veel verschillen en ook de locaties dicht op elkaar liggen (zie bijv. de Midden-Dinkel).

















De doorzichtmetingen die zijn gedaan met behulp van een Secchischijf geven ook geen uitsluitsel over de mate waarin doorzicht een bepalende factor is in het wel of niet kunnen meten van de bodem: Er zijn zowel succesvolle als niet succesvolle LiDAR-bodemmetingen bij een ruim voldoende doorzicht (bodembodembodemzicht zoals gemeten met de Secchi-schijf) (Tabel 3.4) en het is dus niet zo bij een goed doorzicht er automatisch ook een goede bodemmeting gedaan kan worden. Dit is zelfs het geval op bodems waarvan we verwachten dat ze ook een goede reflectie kunnen hebben, doordat de bodem zandig zou moeten zijn (bijvoorbeeld in de Midden Dinkel bij het Graafschapspad). Een aanvullende analyse van bijv. het full-wave form patroon in de data kan mogelijk helpen bij het verder zoeken naar de verklaring van dit onverwachte verschijnsel.

De informatie over de daadwerkelijke kleur bij de bodem is alleen beschikbaar uit een bodemkaart uit 2009. Er is helaas geen goede beschrijving aangeleverd over de bodem-samenstelling en eventuele sliblaag bovenop het basismateriaal door de waterschappen voor de specifieke referentiepunten waar de veldmetingen zijn gedaan. Hierdoor kan er helaas weinig gezegd worden over het effect van een mogelijk aanwezige sliblaag boven op de verwachte ondergrond-bodemsoorten en het effect daarvan op de werking van het LiDAR signaal. In het Grevelingenmeer en het Dinkelgebied, waar hoogstwaarschijnlijk sprake is van een kale zandbodembodem, is er soms een duidelijk bodemreliëf te zien in de metingen, maar dit is lang niet overal het geval (Figuur 3.10).

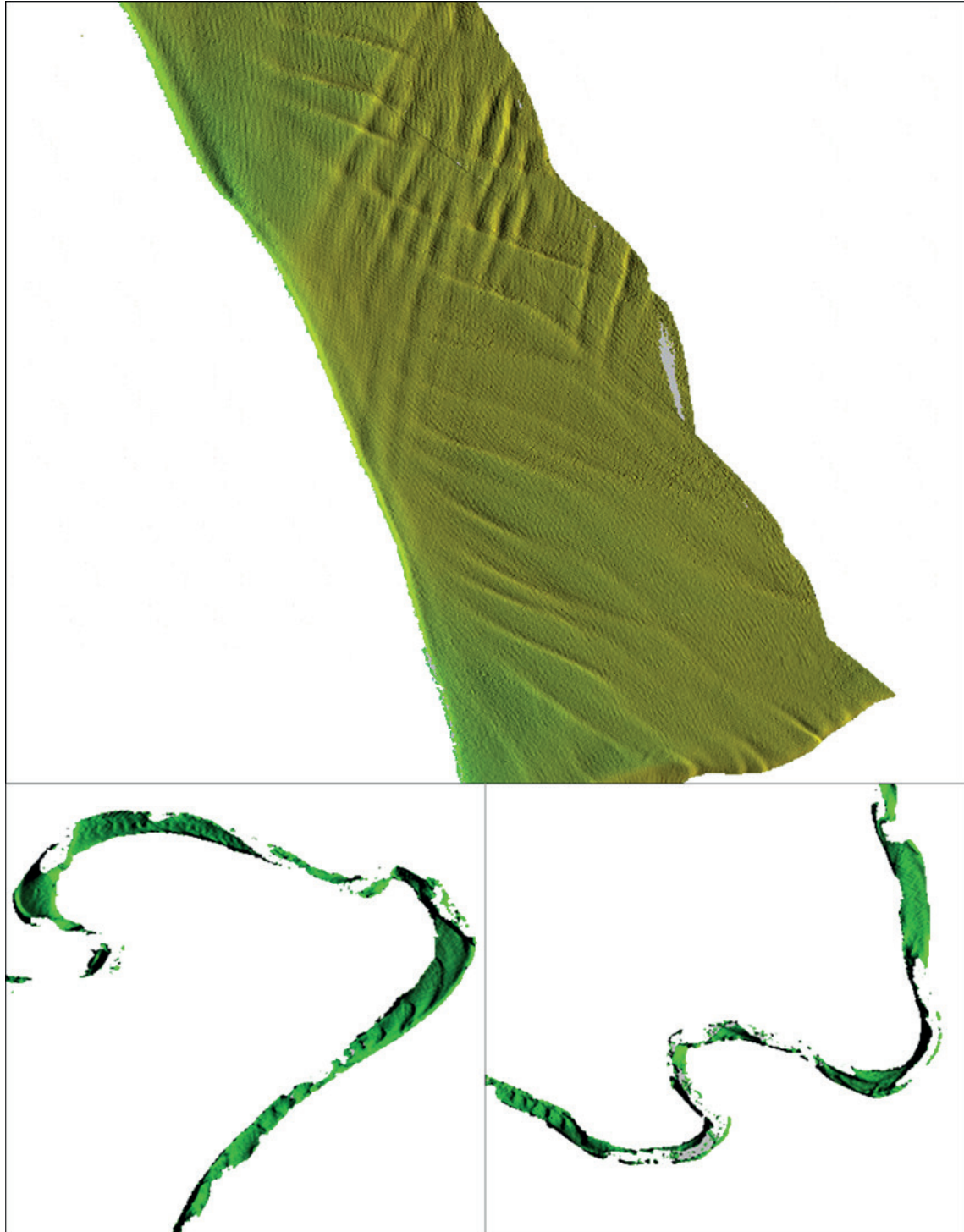
TABEL 3.3 VERGELIJKING TUSSEN REFERENTIEDIEPTEMETINGEN EN DE GEMETEN LIDAR DIEPTE, INCLUSIEF SUCCESTYPE, WAARIN ROOD-GEEN LIDAR DIEPTE; ORANJE- GEEN BODEMDETECTIE MAAR WEL LIDAR DIEPTE; GROEN- BODEMDETECTIE EN LIDAR DIEPTE; EN GRIJS – GEEN LIDAR DATA

Dinkelgebied	Gem. Referentiediepte	LiDAR diepte	Verschil [m]	Bodemdetectie	Successtype
Omleidingskanaal, Beuningerveldweg	-2.00	x	x	Nee	
Omleidingskanaal, Lutterzandweg	-1.45	-0.90	-0.55	Nee	
Beneden Dinkel, Lutterzandweg (Paviljoen)	-0.75	-0.65	-0.10	Ja	
Midden Dinkel, Bentheimerstraat	-0.77	-0.81	0.04	Ja	
Midden Dinkel, Graafschapspad	-0.77	x	x	Nee	
Kramerwatergang, Mollerheurneweg	-0.83	x	x	Nee	
Beneden Dinkel, Lutterzandweg (zijweg)	-1.28	x	x	x	
<b>Vechtgebied</b>					
Vecht, stuw Junne	-2.03	x	x	Nee	
Vecht (bypass/meander), Junnerweg	-0.62	-0.50	-0.12	Ja	
WL05774, Knolsdijk	-0.20	x	x	Nee	
Nieuwe Stroomkanaal, Stenendijk	-1.42	x	x	Nee	
Nieuwe Stroomkanaal, Fortwijk	-1.50	x	x	x	
Plas De Vlegge	-0.95	-1.00	0.05	Ja	
Waterloop van Engbertsdijksveen, Paterswal	-0.48	x	x	Nee	
<b>AA en Maas</b>					
Oss	-1.10	-1.20	0.10	Ja	
Lith	-0.45	-0.50	0.05	Nee	

TABEL 3.4 VERGELIJKING TUSSEN DE REFERENTIEDIEPTE (RD) EN SECCHI-SCHIJF DIEPTE (DOORZICHT SD) OP VERSCHILLENDE MEETMOMENTEN, AANGEGEVEN MET DATUM. DE LIDAR DATA IS INGEVLOGEN OP 16 APRIL. DONKERGRIJZE VAKKEN GEVEN AAN DAT ER BODEMZICHT WAS. OOK ZIJN BODEMTYPE EN WATERTYPE OPGENOMEN EN HET SUCCESTYPE IN OVEREENSTEMMING MET TABEL 4-3 VOOR KLEURSTELLING, WAARIN ROOD-GEEN LIDAR DIEPTE; ORANJE- GEEN BODEMDETECTIE MAAR WEL LIDAR DIEPTE; GROEN- BODEMDETECTIE EN LIDAR DIEPTE; EN GRIJS – GEEN LIDAR DATA

Locatie watergangen	RD #1 [m]	SD #1 [m]	RD #2 [m]	SD #2 [m]	RD #3 [m]	SD #3 [m]	Grondsoort	Watertype	Breedte [m]	Successtype
<b>Dinkelgebied</b>							2009			
Omleidingskanaal, Beuningerveldweg	-1.90	-0.95	-1.80	-0.80	-2.30	-0.90	Lichte zavel	Kanaal	20m	
Omleidingskanaal, Lutterzandweg	-1.45	-0.70	-1.45	-0.65	-1.45	-0.95	Zand	Kanaal	17m	
Beneden Dinkel, Lutterzandweg (Paviljoen)	-0.95	-0.95	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	Zand	Rivier	4m	
Midden Dinkel, Bentheimerstraat	-0.95	-0.95	-0.70	-0.70	-0.65	-0.65	Zand	Rivier	4m	
Midden Dinkel, Graafschapspad	-0.95	-0.95	-0.70	-0.70	-0.65	-0.65	Zand	Rivier	3m	
Kramerwatergang, Mollerheurneweg	-0.95	-0.95	-0.80	-0.80	-0.75	-0.75	Zand	Rivier	4m	
Beneden Dinkel, Lutterzandweg (zijweg)	-1.45	-1.25	-1.25	-1.10	-1.15	-1.15	Zand	Rivier	x	
<b>Vechtgebied</b>							2006			
Vecht, stuw Junne	-2.00	-0.65	-2.00	-0.65	-2.10	-0.90	Lichte zavel	Rivier	34m	
Vecht (bypass/meander), Junnerweg	-0.65	-0.45	-0.55	-0.55	-0.65	-0.65	Lichte zavel	Meander	27m	
WL05774, Knolsdijk	-0.25	-0.20	-0.20	-0.20	-0.15	-0.15	Zand	Sloot	2m	
Nieuwe Stroomkanaal, Stenendijk	-1.35	-0.50	-1.45	-0.50	-1.45	-0.65	Zand	Kanaal	12m	
Nieuwe Stroomkanaal, Fortwijk	-1.45	-0.55	-1.45	-0.45	-1.60	-0.50	Zand	Kanaal	10m	
Plas De Vlegge	-0.95	-0.95	-0.95	-0.95	-0.95	-0.95	Zand	Plas	260m	
Waterloop van Engbertsdijksveen, Paterswal	-0.50	-0.35	-0.45	-0.25	-0.50	-0.25	Zand	Sloot	2m	
<b>AA en Maas</b>					17-04-18		2008			
Oss	x	x	x	x	-1.10	-1.10	Zand	Plas	60m	
Lith	x	x	x	x	-0.45	-0.45	Klei	Sloot	4m	

FIGUUR 3.10 BODEMRELIËF IN HET GREVELINGENMEER BOVEN EN DE DINKEL LINKS- EN RECHTSONDER



### 3.3 VERGELIJKING MET ANDERE TECHNIEKEN

In deze paragraaf vergelijken we grofstoffelijk de groene LiDAR techniek met andere inwin-technieken in relatie tot de nauwkeurigheid, doorlooptijd en kosten. De informatie over de kosteninschatting van deze technieken is deels afkomstig van Waternet en is gebaseerd op enkele voorbeelden en inschattingen van experts van Waternet.

#### 3.3.1 TECHNISCHE VERGELIJKING RIEGL VQ-880-G, RIEGL VQ-1560I EN SINGLE POINT LASER (SPL)

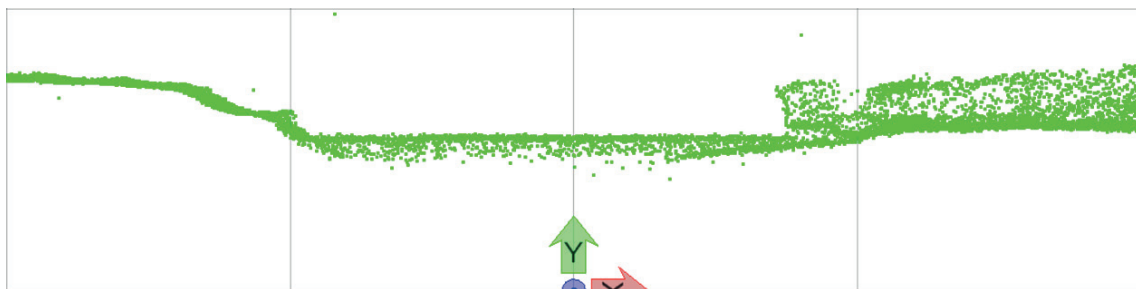
Voor de groene LiDAR pilot is de Riegl VQ-880-G gebruikt. Naast de groene LiDAR pilot zijn er tegelijkertijd ook twee andere pilots gevlogen met een Riegl VQ1560-i DW en een SPL (Tabel 35). Deze scanners zijn bedoeld voor topografische metingen, maar kunnen in bepaalde mate ook bathymetrische data inwinnen omdat deze ook over een groen laser component beschikken. Alle drie de systemen beschikten tijdens de meting over een groen laser component. Daarnaast had de Riegl VQ1560i DW ook een NIR (Near Infrared) component. (Voor details over deze aanvullende technieken zie Van Tol, 2019).

De Riegl VQ880-G levert in algemene zin in bathymetrisch opzicht betere resultaten dan de Riegl 1560i en de SPL. De Riegl 1560i is niet in staat om volledig dekkende bodems te meten terwijl de Riegl VQ880-G dit wel kan. Wel zijn er soms plekken waar de Riegl VQ1560i betere metingen heeft gegeven, maar of dit afhankelijk is van de scanner of de vluchtomstandigheden kan niet met zekerheid gezegd worden. In de onderstaande dwarsdoorsnedes zijn de verschillen te zien (Figuur 3.11 t/m Figuur 3.14). De Riegl VQ1560i pakt in dit voorbeeld wel onderwaterpunten mee terwijl de Riegl VQ880 dat niet doet. De SPL levert een duidelijk minder resultaat dan de scanners van Riegl doordat deze minder punten per m<sup>2</sup> meet.

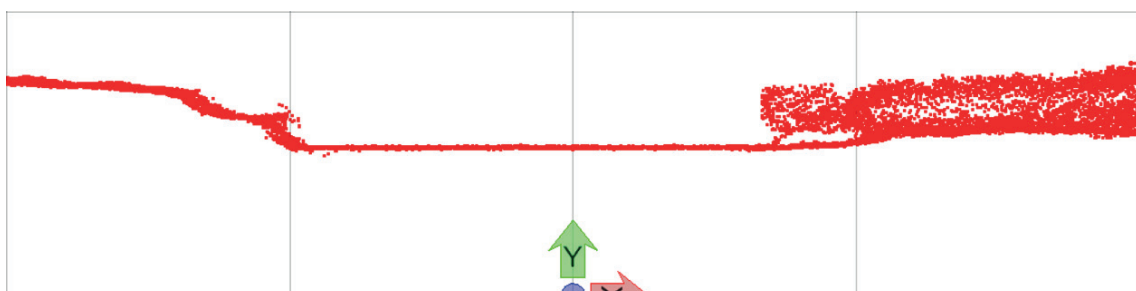
TABEL 3.5 VLUCHTGEGEVEN VAN DE 3 GEVLOGEN PILOTS

Vluchtgegevens	Locatie	Vlieghoogte	Vliegdatum	Kosten vlucht
Sigma Space SPL	Westerschelde	3750m	6 juni	
	Brabant & Rotterdam	4270m	28 & 29 juni	
Riegl VQ-1560i-DW	Westerschelde	560m	20 t/m 22 februari	
	Rotterdam	670m		
Riegl VQ-880-G	Pilot locaties (H7)	400m	16 april	25.000 Euro

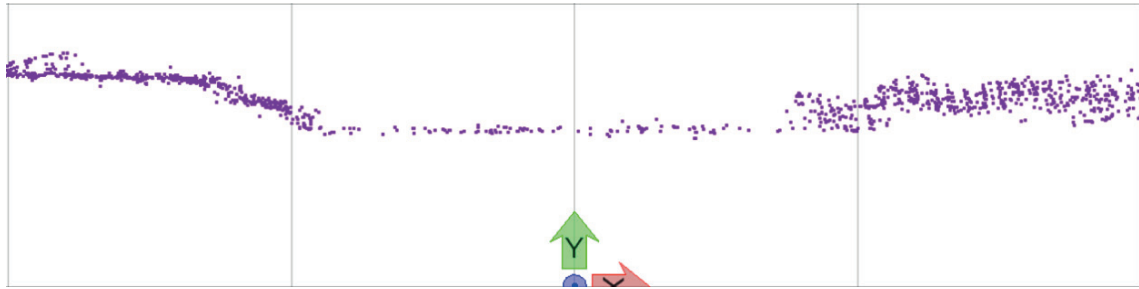
FIGUUR 3.11 POINTCLOUD VAN DE RIEGL VQ1560I



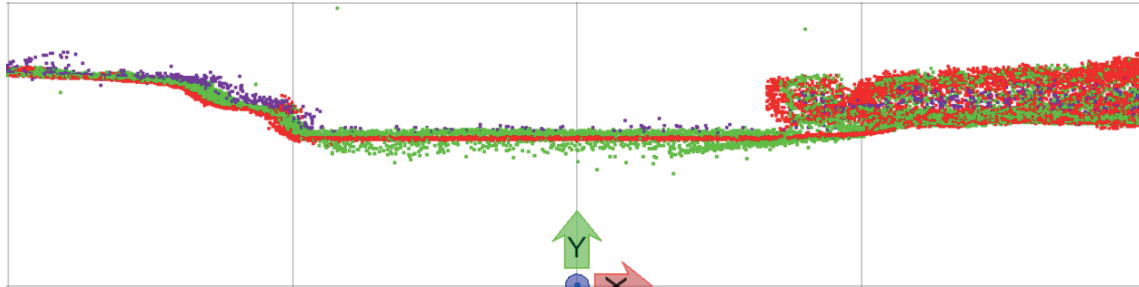
FIGUUR 3.12 POINTCLOUD VAN DE RIEGL VQ880-G



FIGUUR 3.13 POINTCLOUD VAN DE SPL



FIGUUR 3.14 GECOMBINEERDE POINTCLOUDS VAN DE RIEGL VQ880-(ROOD); RIEGL VQ1560I (GROEN); EN SPL (BLAUW)



### 3.3.2 KOSTENVERGELIJKING MET ANDERE TECHNIKEN

Naast de gevlogen LiDAR systemen kan bathymetrie ook handmatig of met multibeam worden ingemeten. In deze paragraaf geven we een grofstoffelijke inschatting van de kosten van deze verschillende technieken, met de opmerking dat de kosten van de groene LiDAR gebaseerd zijn op de pilot-kosten. Deze zullen naar verwachting niet overeen komen met de kosten wanneer deze techniek volledig binnen het primaire proces is opgenomen. Er zijn nu namelijk slechts beperkte analyses op de data uitgevoerd, terwijl het verder verwerken van deze data naar een goedgekeurde standaard gegevensbron nog nadere inspanning zal vergen. Ook zal verwerking van de data voor een groot gebied mogelijk meer inspanning vergen. Aan de andere kant zou verdere automatisering van de dataverwerking juist een kostenreductie kunnen geven. Het invliegen van de pilot kostte 25.000,- Euro en is op 1 vliegdag gerealiseerd. Dataverwerkingskosten zijn geschat op ongeveer 25.000,- Euro voor deze pilot. In vervolgstadia zou een verdere verbetering van de classificatie-algoritmen en de automatisering van dit proces kunnen helpen om de dataverwerkingskosten te reduceren.

Handmatige metingen geven betrouwbare maar minder vlakdekkende informatie over de bodemdiepte. Er zijn verschillende manieren waarop de handmatige metingen worden uitgevoerd, afhankelijk van de gewenste nauwkeurigheid. Voor een grofstoffelijke inmeting worden dwarsprofielen om de 200 m. ingemeten met 2 tot 3 punten per dwarsprofiel. Dit gebeurt vaak via inhuur door externen. Een voorbeeld van deze handmatige inmetingen is een project van Waternet waarin de kosten hiervan ongeveer 0.27 Euro/meter voor een gebied van 2000 ha bedroegen. Het kostte ongeveer 18 dagen om deze meting uit te voeren.

Bij meer nauwkeurige metingen wordt er door Waternet zelf om de 100 meter een dwarsprofiel ingemeten, waarbij binnen een dwarsprofiel elke 0.5 m een punt wordt genomen. Afhankelijk van de breedte van het dwarsprofiel kost dit dus meer of minder tijd. De kosten voor watergangen <5m. breed zijn ongeveer 0.25 Euro/meter, en bij watergangen >20m is dit al gauw 0.57 Euro/m. Er wordt ingeschat dat deze methode gemiddeld 0.4 Euro/meter kost.

De multibeam-metingen maken gebruik van een boot, en zijn daarmee vooral geschikt voor de wat grotere en diepere wateren, omdat multibeams in ondiepe systemen (<1m) niet goed functioneren. De multibeam-metingen worden door externe partijen uitgevoerd, maar de prijsinschattingen kunnen sterk verschillen. Multibeammetingen zijn vooral geschikt voor grotere vlakken: Moeilijke hoekjes en gaatjes zijn niet bereikbaar waardoor aanvullend handwerk nodig kan zijn. Peilen met multibeam vereist altijd een minimale waterdiepte van ca. 1,0m. Hierdoor valt deze methode voor polderslootjes eigenlijk af en doordat uitvoering altijd vanaf het water is zijn stuwen, lage bruggen etc. problematische barrieres. De Groene LiDAR biedt als voordeel dat deze obstakels niet belemmerend zijn tijdens de inmeting.

Wanneer alle kosten tegen elkaar worden afgewogen blijken de kosten van de groene LiDAR met deze inschatting in een vergelijkbare range per hectare te liggen als de grove handmatige metingen (Tabel 36). De multibeam is lastig af te zetten tegen deze kosten omdat hiervan alleen kosten beschikbaar waren per meter watergang, en dit lastig om te zetten is naar een kosten per hectare. De multibeam kan momenteel niet ingezet worden voor de zeer ondiepe systemen en daarmee is vergelijking op kosten ook maar beperkt noodzakelijk: het zijn immers vooral aanvullende metingen in het gebied dieper dan 1 meter.

TABEL 3.6

OVERZICHT VAN DE INSCHATTING VAN KOSTEN PER MEETMETHODE

	<b>Euro/m watergang</b>	<b>Ingeschatte kosten Euro/ha</b>
Multibeam	1	
Handmatig inmeten grof	0.27	6.75
Handmatig inmeten fijn	0.4	
Groene LiDAR pilot		5.75

# 4

## TECHNISCHE CONCLUSIES VOLGEND UIT DE PILOT RESULTATEN

Het doel van deze studie was om in kaart te brengen waar metingen met de groene LiDAR succesvol zijn en waar niet. Hierbij is getracht een relatie te leggen tot de bodem- en watergesteldheid, diepte, en waterkwaliteit. Ook is geëvalueerd in hoeverre de groene LiDAR uit de pilot kan worden gekoppeld aan inspanningen met vergelijkbare instrumenten (Riegl 1560i DW, Single Photon LiDAR). Deze technische aspecten worden in dit hoofdstuk behandeld. In hoofdstuk 5 geven we een eerste aanzet voor discussie gegeven voor de inzet van groene LiDAR voor verschillende beheervraagstukken in Nederlandse wateren incl. de bijbehorende landingsbaan voor implementatie van dit proces.

De technische hoofdvraag van dit project was:

- Waar kan in Nederland met behulp van groene LiDAR de waterbodem gemeten worden, tot welke diepte en met welke dichtheid?

Om hier een goed antwoord op te kunnen geven zijn de volgende deelvragen opgesteld:

1. Wat voor geometrische kwaliteit en punt dichtheid kan er op de waterbodem behaald worden?
2. Welke inwinningsfactoren hebben invloed op het resultaat van de meting?
3. Welke omgevingsfactoren hebben invloed op het resultaat van de meting?
4. Wat voor optimalisatie kan er met de postprocessing bereikt worden?

### **ANTWOORD OP DEELVRAAG 1: WAT VOOR GEOMETRISCHE KWALITEIT EN PUNTDICHTHEID KAN ER OP DE WATERBODEM BEHAALD WORDEN?**

De resultaten van deze pilot geven aan dat de maximaal behaalde dieptemeting ligt rond de 5.24 m (in het Grevelingenmeer) en ook veel (recreatie-)wateren en kleine plasjes gaven tot een diepte van 3 meter een goed resultaat. In het Grevelingenmeer nam de nauwkeurigheid van de metingen wel af met de diepte. Dit wordt geweten aan het ontbreken van een correctie breking van het licht als het het water ingaat in het gebruikte algoritme voor analyse van de ruwe puntenwolk. Deze correctie moet in toekomstige analyses wel worden toegevoegd. In de diepe vaargeulen van de Nieuwe Maas en Waal werd gemeten tot zo'n 2 meter diepte. Veel andere, kleinere en smallere systemen zoals kanalen, beken en sloten komen vaak niet dieper dan 1 meter, maar geven daarin geen consistent beeld. Gemiddeld werd per pilot gebied zo'n 45% van de waterbodem betrouwbaar ingemeten (met een minimum van 20% en een maximum van 68%), waarbij visuele inspectie van de punten voldoende zekerheid gaf om te beoordelen of de bodem ingemeten was. De punt dichtheid die bij deze visuele inspectie is gekozen als drempelwaarde bedraagt 20 punten per m<sup>2</sup> op de bodem. Veelal werden er in totaal meer dan 150 punten per m<sup>2</sup> ingemeten, al varieert dit afhankelijk van de vliegstraken.



Er is helaas relatief weinig aandacht geweest voor de poldersloten. Deels komt dit doordat het gekozen pilotgebied dat representatief was voor deze systemen bij waterschappen zoals Hollands Noorderkwartier, Rijnland en Waternet op de vliegtag zelf moest afvallen door het niet verkrijgen van toegang tot het luchtruim (Schiphol). Voor West Nederland is de polder-sloot een wel belangrijke asset. Enkele sloten uit andere pilotgebied bleken slecht ingemeten te zijn. Een mogelijke verklaring ligt in het feit dat het conische scanpatroon deze sloten soms niet goed opmerkt, zeker als de punt dichtheid in de vliegstrook al laag is. Mogelijk is een minimale breedte van een watergang een aanvullend criterium naar een voldoende hoge punt dichtheid om te bepalen waar de groene LiDAR succesvol kan worden ingezet.

#### **ANTWOORD OP DEELVRAAG 2: WELKE INWINNINGSFACTOREN HEBBEN INVLOED OP HET RESULTAAT VAN DE METING?**

Het LiDAR signaal tijdens de inwinning wordt beïnvloedt door verschillende aspecten, te weten: puls-energie, scansnelheid, puls-frequentie, lasergolflengte, vlieghoogte, field of view, footprint, scanpatroon en vliegsnelheid (zie Van Tol, 2019 voor de totale uitleg hierover). Tijdens deze pilot is gewerkt met maar één configuratie, waardoor er geen analyses mogelijk waren op de invloed van deze aspecten op de behaalde resultaten. Er zou mogelijk een aparte vlucht moeten worden gemaakt waarin dit soort instellingen systematisch worden gewisseld voor een specifiek kleiner gebied, zodat de verschillende hiervan beter in kaart kunnen worden gebracht.

#### **ANTWOORD OP DEELVRAAG 3: WELKE OMGEVINGSFACTOREN HEBBEN INVLOED OP HET RESULTAAT VAN DE METING?**

De resultaten zijn niet consistent genoeg om te kunnen zeggen in welke wateren de groene LiDAR altijd werkt. Hoewel er werd aangegeven dat waterkwaliteit van groot belang is bij de metingen, kon uit de beschikbare veld-validatiedata geen goede relatie worden afgeleid met betrekking tot het meetsucces en het doorzicht, danwel ook de kleur van de waterbodem. Op plekken met een goede waterkwaliteit en zandige bodem werden plekken zowel succesvol als onsuccesvol ingemeten (De Vecht). Ook op plekken met een beperkte Secchi-diepte werden toch diepe waarnemingen succesvol ingewonnen (Westerschelde).

#### **ANTWOORD OP DEELVRAAG 4: WAT VOOR OPTIMALISATIE KAN ER MET DE POSTPROCESSING BEREIKT WORDEN?**

Het verwerken van de data bleek lastiger was dan op voorhand verwacht, maar kon uiteindelijk in het software programma TerraScan grotendeels worden geautomatiseerd, al blijft handmatige controle noodzakelijk. Het scheiden van de totale pointcloud in de klassen 'waterbodem', 'wateroppervlakte', 'droge bodem', 'vegetatie' en 'ruis' kon uiteindelijk voor alle gebieden deels worden uitgevoerd, met een gemiddeld percentage met zekerheid ingemeten bodems van 45% van het totale gemeten wateroppervlakte (minimaal 20% in de regio Oss; maximum 68% in de Grevelingen). Hierbij is een criterium gebruikt van een gegeven punt dichtheid per m<sup>2</sup> als een belangrijke grenswaarde gebruikt in de visuele beoordeling van de resultaten. Een te lage punt dichtheid resulteert in een minder succesvolle meting, met een visueel niet zichtbaar en beoordeelbaar betrouwbare inmeting van de bodem. Dit was duidelijk te zien in een voorbeeld binnen Rotterdam, waar binnen één watersysteem zowel deels succesvolle bodemmetingen als ook onsuccesvolle metingen werden gerealiseerd, die gekoppeld konden worden aan deze punt dichtheid. Zonder overlapping zijn er punt dichtheden behaald van 150 punten per m<sup>2</sup>. De maximale punt dichtheden die zijn behaald met overlapping lopen op tot 400 punten per m<sup>2</sup>. Om een bodem te kunnen detecteren is er op het oog bepaald dat een minimale punt dichtheid bij de bodem nodig is van 20 punten per m<sup>2</sup> (de



rest van de punten bestaan op die locatie veelal uit ‘wateroppervlakte-punten’ en ruis). Echter, punt dichtheid is niet het enige criterium om de kwaliteit van de meting op de beschouwen. Mogelijk geeft een verdere analyse van het full-wave-form signaal aanvullende informatie, waardoor de (subjectievere) visuele inspectie op basis van een voldoende hoge punt dichtheid als zodanig kan worden vermeden.

#### *Vergelijking met andere inwin-methoden*

In vergelijking met de twee andere inwinmethoden (uit de AHN-pilot) geeft de VQ880 een beduidend beter resultaat. Dit komt door de gebruikte lagere vlieghoogte en de hoge punt dichtheid die is nagestreefd. Ook de scanhoek is van belang. Die moet volgens mij ongeveer 20 graden zijn. Bij de SPL en de VQ 880 was dat wel het geval, bij de 1560i varieert dat van -30 tot +30 graden. Dit kan verklaren waarom dit instrument enkel sporadisch goede resultaten heeft geboekt. De samenvoeging met het inmeten van het AHN (dat met de VQ1560 het beste kan worden uitgevoerd) valt daarmee af als een mogelijke manier om deze methode eenvoudig en kosteneffectief landsdekkend in te zetten.

#### *Technische aanbevelingen voor vervolg*

De resultaten van de studie zijn besproken tijdens een workshop om te beschouwen of de techniek voldoende bruikbaar is voor verdere uitwerking in een vervolgtraject. Een belangrijke conclusie uit dit gesprek was dat het voor de schouw van ondiepe systemen niet perse nodig is om de bodem te meten, ook de informatie die volgt uit het alleen hebben van ruis beneden het wateroppervlak is al een waardevolle aanvulling op de nu beschikbare informatie. Immers, als de bodem niet is gemeten is het in ieder geval dieper dan de ruis is de aanname. Dit moet echter nog wel worden geverifieerd, omdat er in dit stadium nog geen uitgebreide aandacht is besteed aan de mate waarin ruis kan worden beschouwd als waardevolle data.

Het is aan te bevelen om een vervolg te koppelen aan schouwactiviteiten, zodat kan worden bekeken of inderdaad het ‘niet meten van de bodem’ gekoppeld kan worden aan de minimaal na te streven diepte van de watergang (voor baggerbezwaar) en de nauwkeurigheid van de inwinning speciaal voor dit type zeer ondiepe wateren beter in te meten, inclusief gedegen validatiemetingen. Tijdens een dergelijk vervolg zou ook meer aandacht moeten zijn voor verschillende technische aspecten, zoals de instellingen waarmee wordt ingewonnen (bijv. de puls frequentie en de overweging of er ‘s nachts gevlogen moet worden voor een beter resultaat), het verkrijgen van consistente validatiedata en analyse van de vorm van het signaal, via ofwel daartoe specifiek uitgeruste algoritmen op de bestaande las-files ofwel via Full Waveform analyse van het signaal. Vooral over het bodemtype en de mogelijke aanwezigheid van bagger boven op dit bodemtype is nu niet voldoende bekend geworden uit de aangeleverde validatiedata. Een volgende keer moet nauwkeurig worden aangegeven of dit bijv. maagdelijk wit zand is, geel, grijs of zwart; of dat er misschien bladval, takken, dode vegetatie e.d. aanwezig zijn die de metingen zouden kunnen verstoren.

# 5

## DISCUSSIE OVER VERDERE INBEDDING VAN GROENE LIDAR VOOR NEDERLANDSE WATERSYSTEMEN

In dit hoofdstuk schetsen we een beeld van de stip op de horizon met betrekking tot de inbedding van groene LiDAR voor Nederlandse watersystemen. We bespreken de sterke en zwakke punten in de huidige methode, geven een kosten-batenoverzicht en aanbevelingen voor vervolgstappen om te komen tot deze stip op de horizon. Hierbij is het van groot belang dat niet alleen technische argumenten, maar ook processtappen in beeld worden gebracht en aandacht krijgen. Hiervoor is door de SatWater groep een ‘landingsbaan’ concept ontwikkeld waar we aandacht geven aan de stappen richting implementatie in het primaire proces.

### 5.1 STIP OP DE HORIZON VOOR GROENE LIDAR VOOR NEDERLANDSE TOEPASSINGEN

Het is oktober 2029 en het is weer tijd voor de jaarlijkse schouw bij de Nederlandse waterschappen. De dagelijkse beheerders moeten controleren of de watergangen in het gebied op orde zijn om de winterse afvoer te kunnen garanderen. Hiervoor moeten zij in het veld ook checken of de waterbodems nog op diepte zijn. Een tijdsintensieve klus die voorheen met de hand gedaan moest worden. Tegenwoordig helpt een eerste screening vanuit de lucht, gebruikmakend van groene LiDAR om een schifting te maken in welke locaties nog wel en niet bezocht moeten worden.

Daarvoor is eind september het hele beheergebied in drie dagen met een groene LiDAR op een vliegtuig ingevlogen, waarna binnen een week met automatische dataverwerking een beeld is gegenereerd van de huidige ligging van de waterbodem van de ondiepe wateren. Het gebruikte algoritme is in staat om voor een flink deel van het gebied de waterbodem nauwkeurig en betrouwbaar in kaart te brengen. Daarnaast geeft het aan waar de bodem ‘in elk geval dieper is dan dat het signaal van de groene LiDAR nog kan komen’. De gemeten bodemligging wordt door het algoritme ook vergeleken met de vereiste leggerdieptes en geeft met een kleurcodering aan of de watergang te ondiep (rood), minimaal op signaaldiepte (oranje) of voldoende diep (groen) is. Hiermee kan de beheerder met prioriteit kiezen waar in het veld moet worden nagemeten of de watergangen nog voldoende diep zijn, of dat er moet worden gebaggerd. Dat scheelt ook dit jaar weer een flink aantal kilometers handmatig inmeten.

Het heeft nog best even geduurd voordat de beheerder de groene LiDAR zo makkelijk kon inzetten. Er was een flinke ontwikkeling nodig in kennis en automatisering van de dataverwerking. Hiervoor is een grootschalige pilot met meerdere partners uit binnen- en buitenland uitgevoerd, waarbij sensorinstellingen zijn gevarieerd en aanvullende nauwkeurige veldme-

tingen zijn gedaan om te kijken of de zwarte baggerlaag wel goed kon worden ingemeten. Daaruit bleek dat in sommige watersystemen de groene LiDAR vanuit een vliegtuig niet goed ingezet kan worden, omdat de watergangen te smal zijn, of te troebel. De ontwikkeling van een gele LiDAR gaat daar in de toekomst mogelijk uitkomst bieden, en daaraan wordt nu verder ontwikkeld. Voor de diepere systemen wordt nog steeds de multi-beam vanaf een boot gebruikt, omdat de groene LiDAR voor dat soort systemen niet geschikt is.

Al met al is de beheerder best tevreden met deze nieuwe bron van informatie, die hem niet alleen helpt het baggerbezwaar in kaart te brengen, maar soms ook interessante onderwater-versperringen laat zien, zwakke oevers opspoort en zelfs als bijvangst illegale bebouwingen op en langs het water en peilafwijkingen in kaart kan brengen. De jaarlijkse update komt op een mooi moment en is kostenneutraal ten opzichte van de handmatige methode, maar levert wel winst in doorlooptijd, nauwkeurigheid en snel overzicht van de status van zijn gebied.

## 5.2 STERKE-ZWAKTE ANALYSE

Gebaseerd op de conclusies die uit deze pilot zijn getrokken, is met eindgebruikers gediscussieerd over de sterktes en zwaktes van groene LiDAR om ondiepe waterbodems in te meten. Hierbij is de bovenstaande stip op de horizon een verbeelding van het wens-beeld in de nabije toekomst. Het uitgebreide verslag van deze discussie is terug te vinden in Bijlage A.

De volgende sterke potentiële gebruikersfuncties van de groene LiDAR worden genoemd:

1. Het meten van bodems in ondiepe, slecht toegankelijke gebieden voor het bepalen van baggerbezwaar, uitvoeren van de schouw (mits data voldoende snel kan worden geleverd na het vliegen), en mogelijk het beheer van slootkanten.
2. Voor veel andere zaken op de droge kant kan ook een snellere update van het AHN bruikbaar zijn, waar de rode LiDAR al voldoende goed voor is.

De voordelen van de groene LiDAR Metingen zijn onder andere:

- Het snel kunnen surveyen van grote gebieden
- Er is grotere mobiliteit vanuit de lucht
- Ondiepe wateren kunnen makkelijk ingemeten worden
- Er is een directe overgang naar landmetingen
- De prijs/oppervlak verhouding is lager / vergelijkbaar met het meten vanaf het water afhankelijk van de grootte van het in te meten gebied
- Het kan mogelijk als een bagger indicator voor beheer dienen (binnen dezelfde watergang), - voor dit laatste punt moet nog wel meer onderzoek worden gedaan naar de gevoeligheid van de techniek voor de dichtheid van de bagger.

De zwaktes zijn:

- De techniek is gevoelig voor verstoringen (reflectie en absorptie)
- Nabij civiele luchthavens blijft onzeker of invliegen vanuit een vliegtuig mogelijk is
- Een bereik van ongeveer 1 à 1.5 keer de secchi-diepte is een richtlijn, maar er zijn ook plekken waar het inmeten faalt als er wel bodemzicht is.
- De techniek werkt niet overal zonder dat dit altijd direct terug te leiden is op conflicterende water- en bodemeigenschappen, al zullen deze zeker een rol spelen.

Dit levert een overzicht van de sterktes en zwaktes van de methode en de mogelijke kansen en bedreigingen voor het inzetten daarvan (Tabel 5.1)

TABEL 5.1 SAMENVATTENDE SWOT-TABEL VOOR TOEPASSINGEN GROENE LIDAR

	Positieve aspecten	Negatieve aspecten
Methode	<p><i>Sterktes</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Grotere gebieden snel in een keer vlakdekkend in beeld</li> <li>• Niet substantieel duurder dan handmatige metingen afhankelijk van de grootte van het ingevlogen gebied</li> <li>• Methode niet afhankelijk van de persoon die het meet of toegankelijkheid in het veld</li> <li>• Prijs/oppervlak is niet duurder dan traditionele methoden</li> </ul>	<p><i>Zwaktes</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gebied niet volledig in kaart voor de daadwerkelijke bodem</li> <li>• Validatiedata blijft nodig</li> <li>• Doorlooptijd voor het organiseren en verwerken van de metingen nog hoog</li> <li>• Er is nog weinig bekend over de meest geschikte instellingen waarmee wordt ingewonnen (vergelijkende studie daarover ontbreekt)</li> </ul>
Toepassingsvragen	<p><i>Kansen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Baggerbezwaar vlakdekkend in kaart</li> <li>• Zicht op ontwikkelingen in ondiepe oeverzones</li> <li>• In te zetten bij de schouw</li> </ul>	<p><i>Bedreigingen</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dataverwerking kost veel tijd</li> <li>• Vliegbewegingen gelimiteerd door luchthavens/ regulering luchtruim</li> <li>• Onzeker wanneer het wel en niet werkt</li> <li>• Verlies van feeling met het veld</li> </ul>

De mogelijkheid voor het opschalen van de techniek om met groene LiDAR een groot gebied (bijv. een volledig waterschap) in te winnen is nog niet goed in te schatten. Met een succespercentage van gemiddeld 45% visueel betrouwbaar beoordeelde ingewonnen waterbodem zal ook een substantieel deel van het beheergebied nog handmatig moeten worden nagemeten of moet er nog sterk worden gewerkt aan het beter verwerken van het data signaal om hier meer informatie uit te halen. Het wel of niet vlakdekkend inwinnen heeft daarbij ook te maken met de wensen vanuit een beheerder qua nauwkeurigheid en volledigheid van de metingen. Hierover verschilden per deelnemer de meningen. Waar sommigen al tevreden zijn met het hebben van een inzicht in waar de 'ruis' kan worden geïnterpreteerd als een 'dieper dan...' zijn anderen daarmee niet geholpen (als bijv. nauwkeurig in kaart moet worden gebracht of buizen en leidingen open in de watergang liggen).

De timing van de groene LiDAR metingen in het jaar moet nader worden beschouwd. Vragen die hierbij gelden zijn bijv. 'In hoeverre is timing en periodiciteit af te stemmen op een maximaal behaalbaar resultaat'. Er is voor deze pilot op basis van expert judgement gekozen voor het uitvoeren van metingen in het vroege voorjaar (april), omdat dit bekend staat als een fase waarin het water erg helder kan zijn, en er nog geen waterplanten groeien. De zomerperiode is minder aantrekkelijk, omdat de aanwezigheid van waterplant een goed beeld van de bodem belemmert en het onzeker kan zijn of er waterplanten danwel bodem is gemeten. Idealiter worden deze metingen vergeleken met metingen in bijv. de maand februari of maart. Ook heeft het tijdens deze pilot een half jaar geduurd om de data te verwerken. Dit was deels te wijten aan onbekendheid met het type data, maar ook blijkt dat de dataverwerking bewerkelijk is door de grootte databestanden. Een goede werkwijze is nodig om dit proces substantieel te versnellen.

Tijdens de discussie kwam naar voren dat sommige beheerders graag 1 keer per jaar en metingen doen, terwijl anderen mogelijk al voldoende informatie hebben bij een meting bijv. eens in de vijf tot zeven jaar, afhankelijk van het gestelde doel en de huidige werkwijze of ingeschatte risico's op bijv. het dichtslibben van watergangen.

Het nog niet duidelijk geworden in deze pilot of de groene LiDAR in staat is om dun slib te meten, en in hoeverre dun slib de nauwkeurigheid van de meting beïnvloedt. Hiervoor zouden bijv. specifieke en nettere metingen gedaan moeten worden met objecten in een specifieke

watergang. Eerdere studies hierover gebruikten metalen frames om een specifieke reflectie te verkrijgen, echter dit was in situaties zonder dun slib (pers. comm AHM). Ook is een eerdere groene LiDAR pilot (met een instrument van Leica in 2015, gevlogen door Aerodata) weinig succes behaald in het veenweidegebied bij Waternet. Het vermoeden bestaat dat de donkere bagger een onderdeel is geweest van het niet succesvol zijn van deze pilot, naast mogelijk een minder succesvol gebruik van instellingen. Helaas is tijdens deze pilot geen toegang gegeven om het luchtruim rond Schiphol te betreden, en kon de in het veenweidegebied voorziene pilot locatie niet worden ingemeten. De andere locaties bezitten geen goede referentiewateren, behalve enkele sloten, waarvan het niet duidelijk is of deze een baggerbodem bezitten. De betrouwbaarheid van en begrip over de metingen in deze systemen is door deze pilot niet toegenomen.

### 5.3 KOSTEN-BATEN OVERZICHT

In paragraaf 3.3.2 is reeds een overzicht gegeven van de daadwerkelijke kosten die gemoeid zijn geweest met deze pilot en deze zijn vergeleken met enkele gegevens van andere technieken, voor zover die bekend waren binnen het projectteam. Het is niet eenvoudig de kosten en baten op dit moment verder uit te werken dan te noemen dat er nog zeker moet worden geïnvesteerd in het verder brengen van de verwerkingstechnieken en dat de kosten sterk afhankelijk zijn van de grootte van het ingevlogen gebied in relatie tot de dataverwerking daarvan. Ook de baten beschrijven we hier alleen kwalitatief, omdat deze moeilijk in een getal te vangen zijn (Tabel 5.2).

TABEL 5.2 OVERZICHT VAN KOSTEN EN BATEN VAN GROENE LIDAR TOEPASSINGEN

Kosten	Baten
Afhankelijk van het gekozen gebied en van een partij met de juiste apparatuur	Vlakdekkende gebiedsinformatie in een keer ingewonnen Ook op plekken waar je normaal lastig komt
Dataverwerking is relatief duur (moet nog efficiënter worden) +Ontwikkelkosten voor betere dataverwerking	Na beschikbaar komen van beter dataverwerkingsprotocol acceptabel sneller beschikbaarheid van data
Kosten afhankelijk van ingewonnen gebiedsgrootte	Inwinnen van een groot deel van een beheergebied van 1 waterschap kan in 1 dag
Kosten voor betere veldvalidatie zijn hoog (gerichte metingen voor sliblaag vs ondergrond)	Op de lange termijn help het met het lokaliseren van 'hotspots' van bodemverandering als meerdere jaren wordt toegepast

### 5.4 AANBEVELINGEN VOOR VERVOLGSTAPPEN TEN BEHOEVE VAN INBEDDING VAN GROENE LIDAR

In het huidige project is ervoor gekozen vooral in te zetten op het begrijpen van de technische haalbaarheid van groene LiDAR voor het meten van ondiepe watersystemen. Procesmatig is er daarom nog geen aandacht geweest voor de benodigde stappen die nodig zijn om een dergelijke nieuwe techniek in te bedden in de dagelijkse praktijk. Zo is er nog geen uitgebreide stakeholder-analyse gemaakt waarbij mensen van verschillende afdelingen binnen de waterschappen die baat kunnen hebben bij hebben van gedetailleerde inmetingen van de ondiepe systemen nauwkeurig zijn geïdentificeerd. Hun rol en eisen aan deze techniek, de functie van de data om de beoogde doelen te halen en de criteria die deze mensen stellen aan de data zou beter in kaart moeten worden gebracht via stakeholdergesprekken (bijv. specifiek met de afdeling verantwoordelijk voor het baggerbeheer, schouw-werkgroep, of met de hydrologen of ecologen binnen het waterschap). Aspecten als timing (wanneer), dekking (hoeveel), financieringsaspecten, kwaliteit van data, data-verwerking en opslag, verantwoording en validatiemethodieken moeten hierbij aan de orde komen.

Ook de stap naar het organisatorisch inbedden van deze metingen Nederland-breed zijn nog niet uitgewerkt. Als blijkt dat de methode voldoende draagvlak kent voor verdere uitwerking, is het mogelijk dat het Waterschapshuis (HWH) hierin een coördinerende rol kan vervullen. Vanuit HWH worden immers al twee vergelijkbare programma's aangestuurd: AHN en Beeldmateriaal. Binnen het AHN programma wordt dit moment een programma gedefinieerd om het AHN in een periode van 3 jaar (in tegenstelling tot de eerdere 6-jaarlijkse cycli) te updaten met de nieuwste technieken. Daarbij is groene LiDAR nog niet ter sprake geweest. Mogelijk worden er scanners ingezet die bathymetrische metingen kunnen verrichten maar dit is zeker geen vereiste vanuit deze eerder genoemde programma's.

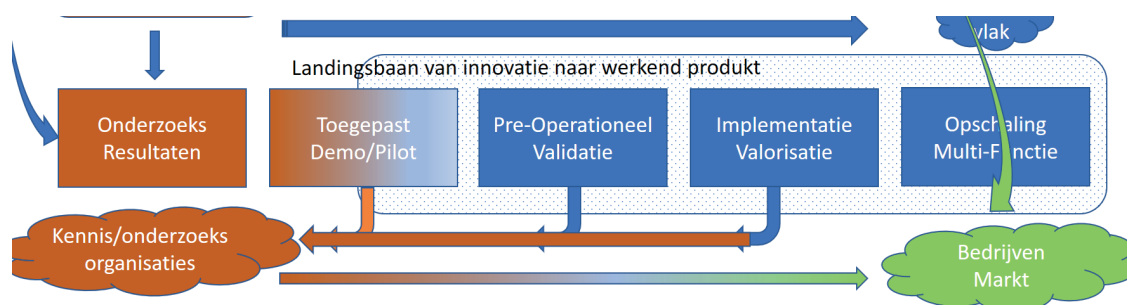
Parallel aan deze update van het inwinnen van het AHN zal worden geïnvesteerd in automatiseren van de classificatie, de wijze van het beschikbaar stellen van de data en het vergroten van het draagvlak (financiering) van het AHN. Uiteindelijk wordt ernaar gestreefd om zo toe te kunnen werken naar een mogelijke jaarlijkse actualisatie. Daarbij wordt ook gekeken naar alternatieve mogelijkheden om het AHN te updaten. Ook binnen het programma Beeldmateriaal zijn veel ontwikkelingen. Samenwerking van de landelijke partijen met de gemeenten is daar een belangrijke ontwikkeling. Centrale financiering is daarbij ook een belangrijk aspect. Vooralsnog wordt qua product gefocussed op luchtfoto's (RGB). Ontwikkelingen die verder spelen zijn oblieke beelden, combinaties met LiDAR (inwinning) en mogelijk hyperspectrale beeld (hoewel daar nog niet heel veel aandacht voor is)

Het is aan te bevelen om al deze verschillende inwin-technieken vanuit de lucht te blijven onderzoeken en na te gaan waar combineren mogelijk is om de druk op het luchtruim te verlagen, milieu-besparingen te kunnen boeken en om slim data te kunnen combineren voor nieuwe toepassingen. De tijd moet leren hoe deze ontwikkelingen gaan uitwerken.

## 5.5 LANDINGSBAAN VOOR GROENE LIDAR IN NEDERLANDSE TOEPASSINGEN

Het AHN product is reeds binnen de waterbeheer organisatie een feit en geaccepteerd. Ook dit product heeft een proces doorgaan van ontwikkeling tot implementatie: de zogenaamde landingsbaan, die het proces beschrijft van de initiële ontwikkeling tot daadwerkelijke implementatie (Figuur 5.1). De opname frequentie verhoging, de verdieping en verbetering door de nieuwe aanpak leiden tot zeer grote kansen voor nieuwe toepassingen (zie hoofdstuk). De groene LiDAR proef zit duidelijk in de pilot-fase: een onderzoeksfase om te zien of de landelijke nieuwe AHN gegevens (rode en groene laser data) leiden tot nieuwe toepassingen. Eerder onderzoek van o.a. Waternet heeft laten zien dat de techniek in potentie bruikbare resultaten kan opleveren, al zijn in dat traject ook metingen gedaan die niet goed zijn gegaan. Daarom zijn de pilots zo belangrijk.

FIGUUR 5.1 LANDINGSBAAN VOOR IMPLEMENTATIE VAN INNOVATIES



Het belang van een goede landingsbaan voor deze innovaties uit zich in de volgende aspecten:

1. Groot draagvlak verwacht vanuit de waterschappen als er een enorme nieuwe ondersteuning voor bovengenoemde primaire beheerprocessen met betrekking tot het meten van ondiepe wateren op landelijke schaal elk jaar zou komen.
2. Het samen oppakken met HWH in hun aanpak voor het rode LiDAR traject is zeer strategisch. (gamechanger)
3. We hebben door de samenwerking met HWH duidelijk een gezamenlijk landingsbaan (proces), die aantoonbaar waarde heeft voor alle betrokkenen in het waterbeheer (let op ook andere overheden, als RWS, provincies, gemeenten) op de langere termijn.

Wanneer bewust rekening wordt gehouden met deze landingsbaan heeft het implementeren van groene LiDAR toepassingen in Nederland meer kans, dan wanneer alleen op technische aspecten wordt gestuurd. Zoals ook in de stip op de horizon is aangegeven zijn er nog veel implementatie-stappen te doorlopen. Het is dan ook van belang om deze stip op de horizon te blijven zien en daar naartoe te werken.

# 6

## REFERENTIES

Andersen, D. G.-E. (2008). A Guide to LIDAR Data Acquisition and Processing for the Forests of the Pacific Northwest. USDA.

Azadbakht, M. . (2013). A signal denoising method for Full-Waveform Lidar data. ISPRS.

Collier, N. Q. (2009, februari). Acquiring and Integrating Bathymetric Lidar. Hydro International.

Ebben, D. M. (1992). Optica onder water, troebelheid, doorzicht, extinctie. Rijkswaterstaat, Dienst Getijdewateren.

Ernstsen, V. (2017). Processing and performance of topobathymetric lidar data for geomorphometric and morphological classification in a high-energy tidal environment. Hydrology and Earth System Sciences.

Green, R. G. (2009). Assessing the accuracy of remotely sensed data.

Krause, K. (2016). Introduction to Full Waveform LiDAR: A presentation. (<https://youtu.be/A4MWxAkoIO4>, Red.) National Ecological Observatory Network.

P. Westfeld, K. R. (2016). Analysis of the effect of wave patterns on refraction in airborne LiDAR bathymetry. Technische Universität Dresden, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing.

Philpot, C.-K. W. (2006). Using airborne bathymetric lidar to detect bottom type variation in shallow waters. National Cheng Kung University Taiwan, Cornell University United States.

R.Swart, S. F. (2007). Laseraltimetrie voor waterkeringbeheer. Stowa.

Rohrbach, F. (2015). LiDAR Footprint diameter. Opgehaald van <http://felix.rohrba.ch>: <http://felix.rohrba.ch/en/2015/lidar-footprint-diameter/>

Terrascan. (2016). Terrascan's user guide. Terrassolid.

Vásquez, D. B. (2017). Bathymetric profiling using a yellow wavelength and a time of flight approach based on Single Photon Counting . Waternet.



## BIJLAGE 1

# VERSLAG GROENE LIDAR PILOT NEDERLAND - WORKSHOP

**Datum: 6-12-2018 Tijd: 10.00u – 13.00**

## **SAMENVATTING**

Groene LiDAR biedt de mogelijkheid om in ondiep water de waterdiepte in te meten vanuit de lucht, mits het doorzicht voldoende is (resultaten tot ongeveer 1 - 1.5\* doorzicht wordt genoemd). Voor het onderzoek zijn 6 pilotgebieden ingevlogen met groene LiDAR (type Riegl VQ880) door het Oostenrijkse bedrijf AHM. De 6 pilotgebieden liggen verspreid over Nederland om zo de invloed van de ondergrond en watertype mee te kunnen nemen in de analyse. Daarnaast is er in een pilot voor het AHN gekeken of een rode LiDAR gecombineerd met een groene component (Type Riegl VQ1560) vergelijkbare resultaten kan opleveren. Beide datasets zijn vervolgens geanalyseerd en gevalideerd.

De ruwe data vanuit de pilots is een point cloud met zeer hoge punt dichtheid. De ruis in deze data moet gescheiden worden van de daadwerkelijke data van de bodemmetingen.

Om de data te verwerken werd als eerste stap gekeken of HydroVish (softwarepakket van AHM zelf) geschikt was om deze data te verwerken. HWH heeft daarom een cursus gehad voor het programma maar dit bleek nog niet echt operationeel inzetbaar te zijn (veel bugs en veel zoeken naar de juiste functionaliteit). Daarom is er ter vervanging de software TerraScan aangeschaft.

De resultaten zijn op sommige locaties erg goed, maar op andere locaties onverwacht minder goed. Er is geen relatie gevonden met het doorzicht in de geanalyseerde systemen, omdat er metingen zijn die bij goed doorzicht (bodemzicht) zowel goede als slechte resultaten leverden. Ook het bodemtype bleek niet te correleren met het succesvol zijn van metingen. Een hoge punt dichtheid blijkt een zeer belangrijk aspect in het succesvol zijn van de metingen. Hiermee is het 'meeliften' met de metingen uit de AHN pilot (de Riegl VQ1560) niet werkbaar gebleken, omdat daar de punt dichtheid te laag is voor goede data analyse. Uit de discussie kwam naar voren dat ook het hebben van metingen die niet de bodem raken al interessant kan zijn, wanneer de 'ruis-data' een aanduiding kan zijn van een minimale diepte. Deelnemers zijn geïnteresseerd in het voortzetten van de pilot in 2019-2020.

## **RESULTATEN CLASSIFICATIE EN VALIDATIE POINT PER GEBIED**

*Door Jeroen Leusink, Martijn Visser, Lennart van Tol*

De trajecten worden ingevlogen en door middel van een GPS-IMU (IMU is een bewegings-sensor) aan boord van het vliegtuig in combinatie met een GPS op een basisstation, berekend zodat een nauwkeurig traject berekend kan worden. Hierbij wordt ervoor gezorgd dat de vliegstroken goed op elkaar aansluiten.

Daarnaast werd er ook gebruik gemaakt van referentiepunten om de dataset op precies de juiste plek te krijgen in de ruimte.

Vervolgens worden de punten geclassificeerd om te bepalen wat de punten voorstellen. Dit wordt zo automatisch mogelijk gedaan en hiervoor is een macro ontwikkeld in TerraScan. De eerste stap is de analyse op basis van de echo om zo te definiëren wat vegetatie (multiple return), een huis, een weg of de watergang is. Daarna is er gekeken naar de intensiteit van de data (hoeveelheid weerkaatst signaal) en de locatie van het water.

De classificatie van de punten in de watergang is opgedeeld in drie klassen: de punten van de waterbodem, het water en het wateroppervlak. Na deze analyse kon er geconcludeerd worden dat er meestal goede resultaten waren te zien bij een hoge punt dichtheid. Een hoge punt dichtheid wordt verkregen als er meerdere vliegbanen over een gebied samenvallen, waardoor deze punt dichtheid hoger is dan vanuit een enkele vliegbaan.

#### **ERVARINGEN MET DE SOFTWARE HYDROVISH**

De software HydroVish wordt vooral gebuikt door AHM en is nog sterk in ontwikkeling. Het is een zeer ingewikkeld programma omdat er ontzettend veel functies op zitten en heeft nog veel bugs. Wel is er een ingebouwde correctie voor de brekingsindex aanwezig in de software. De software is nog niet klaar voor eindgebruikers. Daarom is er uiteindelijk een overstap gemaakt naar een ander softwareprogramma om de data te verwerken: TerraScan (ontwikkeld voor rode laser point clouds).

#### **ERVARINGEN MET DE SOFTWARE TERRASCAN**

Bij deze software is handmatige classificatie wel mogelijk maar er is geen correctie voor de brekingsindex ingebouwd. Het programma heeft makkelijke routines om zowel data automatisch te classificeren als ook om handmatige correcties uit te voeren.

#### **RESULTATEN**

Voor alle gebieden is uiteindelijk een automatische classificatie toegepast, gebruikmakend van TerraScan. Waar overlap was van vliegstroken zijn er betere resultaten te zien.

- Gebied 1: Westerschelde  
Op sommige plekken zijn er goede resultaten en op andere plekken zijn ze slechter, met name op locaties waar het relatief diep is – dit is te verwachten omdat groene laser niet verder gaat dan 1 tot 1.5 \* het doorzicht normaliter.
- Gebied 2: Grevelingenmeer  
In dit gebied waren er goede resultaten zichtbaar (hoge punt dichtheid). In de waterbodem zijn er zelfs zandgolfpatronen te zien die natuurlijk lijken.
- Gebied 3: Rotterdam  
Op een aantal plekken zijn er goede resultaten te zien maar er zijn ook locaties waar de punt dichtheid heel laag is. Soms liggen deze locaties opvallend dicht op elkaar.
- Gebied 4: Oss  
Alleen de oevers laten goede resultaten zien.
- Gebied 5: Ommen  
In dit gebied zijn de resultaten erg verspreid in de watergang, van goed tot slecht.
- Gebied 6: Dinkel  
Er zijn redelijk goede resultaten te zien. Bij de dwarsdoorsneden van de waterwegen is de bodem meestal gehaald met de groene LiDAR. Alleen op plekken met veel stroming was het water te diep voor bodemmetingen.

### VERGELIJKING AHN-PILOTS EN BATHYMETRISCHE PILOT

Er zijn in totaal 3 systemen met een groene LiDAR gebruikt die op verschillende vlieghoogtes metingen hebben gedaan. Om de bathymetrie beter in kaart te brengen werd soms lager gevlogen.

- SPL (Single Photon LiDAR)
- Riegl 1560i-DW: NIR en groene LiDAR, pilots voor AHN
- Riegl VQ880: groene LiDAR, pilots door AHM

Vanuit de groene LiDAR is er veel ruis te zien. Dit is in contrast met de NIR LiDAR waarbij bijna geen ruis zichtbaar is. De SPL geeft vrij weinig punten onder water in tegenstelling tot de NIR en de groene LiDAR en is daarmee niet goed bruikbaar voor dit soort metingen.

### CONCLUSIES

- Laag vliegen is essentieel voor succesvolle bathymetrische data, omdat hiermee een hogere punt dichtheid wordt behaald, zeker als dit vervolgens verder wordt verhoogd door meerdere vliegbanen te laten overlappen.
- Het vliegplan van deze pilot is op de dag van de meting zelf door Schiphol overruled, waardoor er bij de uitvoering van dit soort metingen rekening mee moet worden gehouden dat niet overal zomaar gevlogen mag worden en dat ook de hoogte door de nabijheid van een vliegveld kan worden beïnvloed.
- De SPL kan waarschijnlijk geen goede data inwinnen op die lage vlieghoogte vanwege het conische scanpatroon
- Groene LiDAR geeft veel meer ruis dan NIR LiDAR. Dit maakt de data-analyse complexer.
- Voor een grote zekerheid over het meten van de bodem is een extreme punt dichtheid vereist (dus veel overlappende vliegstroken)
- De Riegl VQ 880 geeft betere resultaten dan de Riegl 1560i-DW
- Combinatie van een bathymetrische metingen en het AHN programma lijkt nu nog niet mogelijk als gevolg van het verschil in de optimale hoogte die voor beide typen metingen nodig is. Het invliegen van het AHN (NIR LiDAR) op voldoende lage hoogte voor ook groene LiDAR metingen kost dan extra inspanning en gaat niet snel genoeg.

#### A1 VOORUITBLIK – FULL WAVE FORM ANALYSE

AHM verwacht de grootste ontwikkeling op het gebied van signaalanalyse en minder op hardware.

De stap die ze al gemaakt hebben is de ontwikkeling van de 'Full Wave Form' analyse. Hierbij wordt het systeem signaal gecombineerd met het doelsignaal waardoor de waterbodem nauwkeuriger gedetecteerd kan worden.

Deze analyse is al uitgetoetst voor de Elbe waarbij ze met de vorige methode (Online Waveform Processing) niet tot de bodem kwamen maar met deze nieuwe FWF-analyse wel.

Bij het gebruik van deze FWF-analyse in Nederland zijn er op veel gebieden meer bodempunten zichtbaar en wordt de punt dichtheid groter. Dit is in gebied 1, 2 en 3. De eerste resultaten laten echter geen verbetering zien op diepere locaties.

In gebied 6 levert de FWF-analyse in een aantal profielen een hogere punt dichtheid op, maar bij andere niet. Dit kan komen door vegetatie of veel organisch materiaal in het water.

#### A2 WATERKWALITEIT

Licht dooft uit onder water als gevolg van botsing met deeltjes, dus ook groene LiDAR verliest signaalkracht met diepte. De troebelheid van het water speelt dus een rol in het behaalde

resultaat van de LiDAR meting. Deze troebelheid wordt uitgedrukt in termen van doorzicht (de ‘Secchi-diepte’). De uitdoving is afhankelijk van het type deeltjes in het water, wat gekoppeld kan worden aan de waterkwaliteit (relatieve aandeel van algen versus ander materiaal zoals inorganisch en organisch zwevend stof en humuszuren). In een gevoeligheidsanalyse waarin steeds 1 parameter is veranderd, is zichtbaar hoe onnauwkeurig de Secchi-diepte is, en dat daar dus rekening mee moet worden gehouden in de analyse over de vraag hoe troebelheid het resultaat van de groene LiDAR beïnvloedt. Omdat nu geen data van de bijdragende stoffen beschikbaar is, kon geen verdere analyse worden gedaan. Voor geïnteresseerden is er de website <http://www.onderwaterlicht.nl/nl/uitzicht.html>.

Referentiedata van dieptemetingen waarvan ook het doorzicht en het bodemtype bekend is uit de pilotgebieden zijn gebruikt om de Secchi-diepten te berekenen. In deze gebieden haalt de groene LiDAR in ongeveer de helft van de gevallen de bodem wel. Dit zijn meestal zandgebieden.

Als de Secchi-diepte vergeleken wordt met de referentiediepte is er echter geen duidelijke relatie te zien, ook niet als alleen naar de zandgebieden wordt gekeken (welke het beste worden verondersteld). Daarnaast is er geen duidelijke relatie zichtbaar als er alleen gekeken wordt naar de gebieden waarin de groene LiDAR wel de bodem haalt.

### A3 DISCUSSIE: WAT LEVERT DEZE DATA ONS?

#### De voordelen van pointclouds vs. handmatig meten:

- Goed voor moeilijk toegankelijke watergangen.
- Statistisch meer metingen.
- Gebiedsdekkende metingen.
- Beter patronen zien.
- Moet in de toekomst naadloos aansluiten bij het AHN (straks elk jaar een volledig beeld)
- Als het werkt, scheelt het veel veldwerk.
- Je pakt precies de strook tussen waar je kunt varen (diepe waterbodem) en wat je vanuit NIR LiDAR kunt meten (land).
- Vlakdekkend. Het geeft inzicht waar je je veldmetingen nog aanvullend wilt inzetten – goed voor een hybride systeem.
- Handmatig metingen zijn losse puntmetingen. Met pointclouds krijg je een volledig profiel in kaart.
- Het is een uniforme manier die minder beïnvloed wordt door individuele personen – geeft minder spreiding (onafhankelijk van hoe hard de landmeter de stok de sliblaag in drukt)
- Arbo-technisch beter (je hoeft het water niet in).
- Je hoeft niet meer bij de terreineigenaren langs (maar dan mis je ook het stukje communicatie met de terreineigenaren).
- Duidelijker beeld van hoe het er in het veld bijligt, veldwerk gericht inzetten, geeft tijds-winst en capaciteitswinst. (let wel: data verwerking moet nog sneller en automatischer dan nu gedaan in deze pilot).
- Je kan de oevers redelijk goed zien, en is dat voor de keringenbeheerders nuttig (beschoei-ingen etc.)?

### Nadelen pointclouds vs. handmatige metingen

- Je meet alleen een strook langs de oever, en de grotere diepte mis je nog steeds (zou je kunnen meten met bootjes)
- Veldmetingen kunnen ook in andere seizoenen van het jaar uitgevoerd worden, ‘wanneer je het nodig hebt’
- Je kunt geen onderscheid maken tussen bagger en vaste bodem.
- Accepteert de aannemer deze methode? (dat is een vervolgstap in de discussie)
- Veel data kost ook veel werk om het te analyseren (kan sneller in de toekomst), kost ook geld.
- Wie gaat het analyseren? Is het iets wat je continue moet uitbesteden?
- Datavolume (pointclouds verwerken tot bijvoorbeeld een raster of polygonen om dit te verminderen)
- Onvoorspelbaarheid van resultaten
- Meettechniek moet het ‘altijd goed doen, betrouwbaar zijn, goed te verwerken’, en dat is het nu nog niet, maar kan zich verder ontwikkelen tot snellere en betere resultaten.
- Betrouwbaarheid afhankelijk van punt dichtheid.
- Je kan de data niet dicht interpoleren omdat je de diepere delen mist (geldt natuurlijk ook voor handmatige metingen).

### Eisen en wensen aan een ‘groene LiDAR eindproduct’

- Ieder jaar deze data willen hebben voor aanslibbing per jaar (in plaats van om de 10 jaar) wens vanuit gemeente Rotterdam
- Elke 7 jaar nauwkeurige info is goed genoeg (tussendoor met steekproefsgewijze info) wens vanuit HHNK
- Vanuit waternet wordt aangegeven dat voor het bijhouden van baggeraanwas en meetnauwkeurigheid ongeveer 1x per 5 jaar voldoende zou zijn.
- Betrouwbaarheid (kun je een verschil van 5 cm aanwas zien?) en nauwkeurigheid afhankelijk van de punt dichtheid. Absolute nauwkeurigheid is lastig, maar relatieve nauwkeurigheid is waarschijnlijk wel goed te bezien, hiervoor moet de verwerking zonder handmatige beslissingen zijn om dat soort afwijkingen te vermijden.
- Kunnen controleren of watergangen op diepte zijn. (Als ik 50% van mijn watergangen heb, en daar iets van kan zeggen is al meer dan wat ik nu allemaal niet weet)
- Kan een secundaire classificatie van de ruis al iets zeggen over de minimale diepte?
- Het weten van de bovenkant van de sliblaag is voldoende (i.v.m. baggeren).

### Halen we die eisen en wensen met de huidige techniek, wat zou er moeten verbeteren

- Is de punt dichtheid voldoende? Hoe makkelijk beslis je of de bodem echt gezien wordt, of dat het een mismatch is.
- Op het zicht kun je in de pointcloud ook visueel info ophalen of je de bodem wel/niet meet. Processing kan nog meer info geven over bijvoorbeeld de minimale diepte en kleine slootjes kunnen anders en beter worden geanalyseerd, maar het gaat niet het hele gat dichten.
- De kwaliteit is nu nog onvoldoende vlakdekkend in staat bodems te meten, maar daar waar data is, is deze wel goed. (Beter dan wat tot nu toe beschikbaar is.)

### Landingsbaan

- Er is nog meer inzicht gewenst rond de vraag waarom op het ene punt wel resultaten zijn gemeten en op de andere locatie niet. Ligt dat aan de dataprocesing, punt dichtheid of andere zaken?

- Extra pilot west-Nederland veenweide is zeer gewenst. Heeft het nut aan te sluiten bij de keringeninspectie voor bijvoorbeeld rivierdijken?
- De Gasunie doet elke 3 weken helikoptermetingen – Kan je daar een combi mee maken? Nadenken over zo'n case, ook voor ander vliegbewegingen.
- Kosten vergelijkbaar met handmetingen voor grote gebieden.
- Toekomst ligt in o.a. ook andere analyses full wave etc., zou het nuttig zijn deze full wave analyses op deze data set uitgebreider toe te passen?
- Wat zien we in de ruwe data nog aan waardevolle informatie, via een extra sessie specifiek daarop ingaan. Bijvoorbeeld minimale waterdiepte uit de ruis of slootkanten, met bestaande metingen ernaast.
- Is dit voor andere toepassingen zoals bijv. bosbeheer ook interessante data omdat het daar ook nuttig is om een hoge punt dichtheid te hebben?
- Discussie over de toepassing van deze data voor de Schouw. Is het nuttig een pilot in West Nederland te organiseren rond de datum van de schouw, waarbij we ook kijken of de dataverwerking dusdanig snel kan dat het nuttig is om deze te gebruiken? (wat is daar voor nodig: tijdspad instellen).
- Hoe krijg je de dataverwerking snel genoeg is een vervolgstap die verder moet worden uitgewerkt.
- Verzamelen onderzoeksvragen en een vervolgstappenplan maken.
- Hoe zit het met de hardware ontwikkelingen?

#### A4 AFSLUITING & VERVOLG

Een meerderheid van de aanwezigen is geïnteresseerd in vervolgonderzoek. Dit zou in samenwerking mogelijk zijn met de STOWA en Deltares.

Daarnaast is RWS bezig met een groene LiDAR kusttoepassing op Ameland die 3 maal de Secchi-diepte kan meten. Dit is een erg krachtige laser, de vraag is of dat wel mag in een bebouwd gebied.

#### DEELNEMERSLIJST

Naam	Bedrijf/waterschap
Tamara Labrovic	Gemeente Rotterdam
Olaf Borgonjen	Waterschap Vechtstromen
Jean Pierre van Aert	Waterschap Brabantse Delta
Dick Sundermeijer	Gemeente Rotterdam
Lennart van Tol	HWH
Willem Rijn	Waterschap Scheldestromen
Leo Harren	Waternet
Leendert de Ruiter	Waterschap Rijnland
Maarten Hoetmer	HHNK
Edwin ter Hennepe	Waternet
Rinse Wilmink	Rijkswaterstaat
Ben dierckx	Rijkswaterstaat
Wim Visser	Rijkswaterstaat
Searp Wijbenga	Gasunie
Jan Ribberink	Gasunie
Martijn Visser	Deltares
Jeroen Leusink	HWH
Ellis Penning	Deltares
Hans van Leeuwen	STOWA
Sanne van der Heijden	STOWA