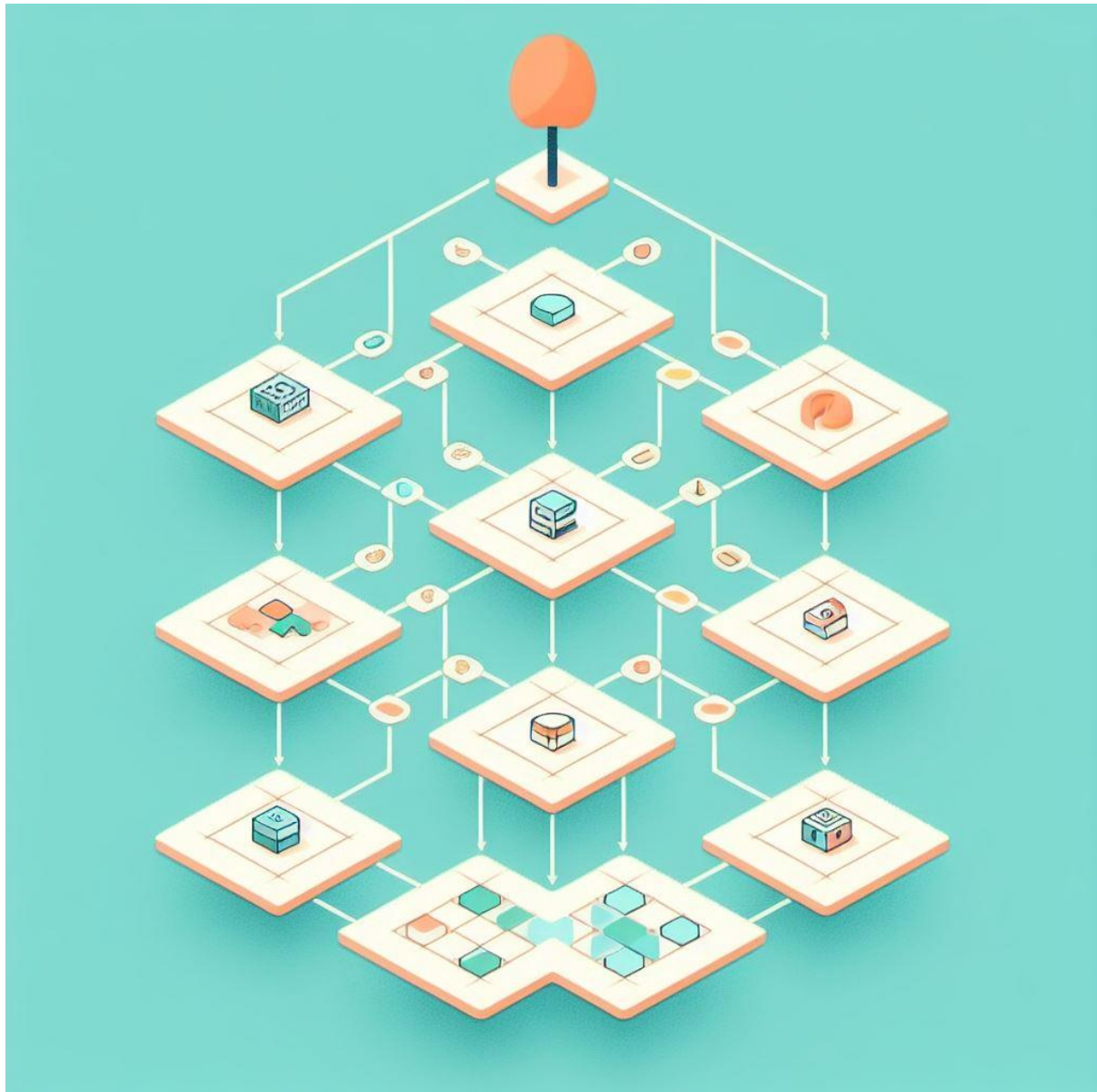


# Algoritmische bepaling van waterstanden met remote sensing



**TU Delft**  
Innovation & Impact Centre  
Van der Burgh Tower (Building 26C)  
Van der Burghweg 1  
2628 CS Delft

  
**TU Delft**

## Samenvatting

In dit project onderzoeken we hoe we waterstanden kunnen meten met LiDAR. LiDAR is een techniek die met laserlicht de hoogte van oppervlakken kan meten. We kunnen LiDAR data met drones of satellieten inwinnen. Dit is belangrijk voor Nederland, waar er veel sloten, kanalen en rivieren zijn. Deze wateren dienen goed te worden beheerd voor behoud van onze fysieke leefomgeving. Maar veel van deze wateren worden niet goed gemeten, want dit kost te veel geld of tijd waardoor we soms geen beeld hebben van ons watersysteem. Ons doel is om met LiDAR de waterstanden te meten. LiDAR kan veel data verzamelen, maar die data zijn niet makkelijk te gebruiken. Daarom hebben we slimme algoritmes ontwikkeld die de data verwerken en eenvoudig waterstanden op een kaart laten zien. Ons resultaat is een toolbox waarmee je LiDAR kunt omzetten in waterstanden. Deze toolbox is door iedereen met LiDAR data te gebruiken en verschaft zo extra inzicht over de actuele situatie van het watersysteem.

## Summary

This project explores how to measure water levels with LiDAR. LiDAR is a technique that uses laser light to measure the elevation of surface areas. We can measure LiDAR data by drones or satellites. This is important for the Netherlands, where there are many ditches, canals and rivers. These water bodies must be well managed for the environment and safety. But many of these waters are not monitored, due to high cost and time constraints. That's why we sometimes lack insight in our water system. Our goal is to measure the water levels with LiDAR. LiDAR can collect a lot of data, but that data is not easy to use. That's why we developed smart algorithms that can process the data and present water levels on a map. Our result is a toolbox that allows you to convert LiDAR data into water levels. This toolbox can be used by anyone who has LiDAR data and, in that way, provides insight in the current situation of the water system.

### *Acknowledgment*

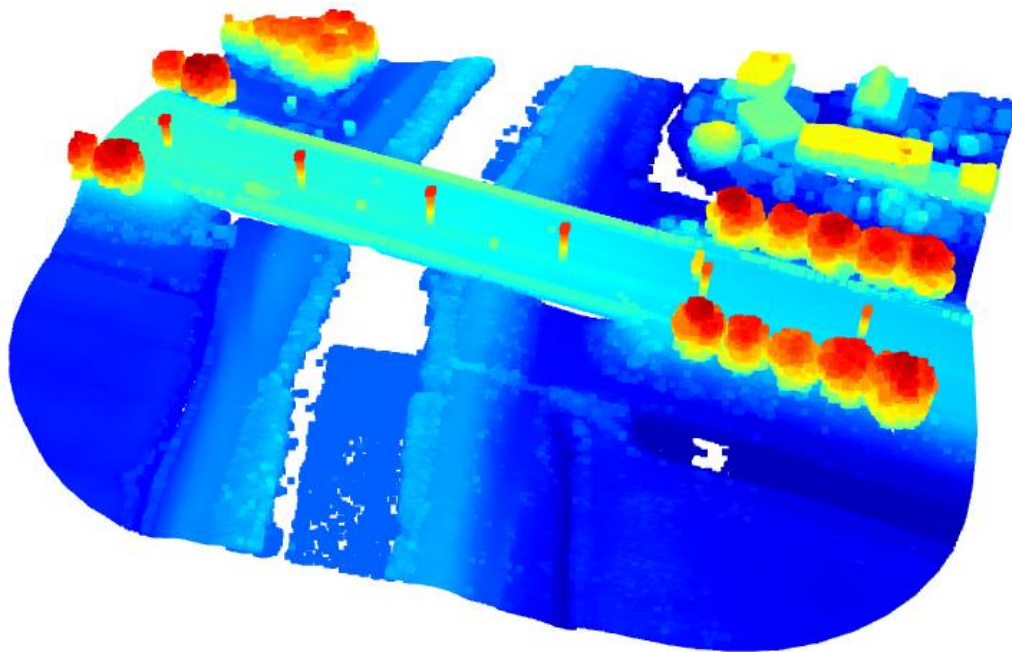
This project is supported by DigiShape seed money, a funding scheme for innovative data science initiatives in the water sector. DigiShape is a collaborative platform that connects water-related organizations, researchers, and data experts to tackle the challenges of the digital transformation in the water domain.



## Aanleiding

Nederland kent 225000 km aan watergangen in het beheer van waterschappen. In veel van deze watergangen wordt de waterstand niet bemeten. Als voorbeeld worden in het beheergebied van Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier de watergangen van ca. 1900 van de ruim 2600 peilgebieden niet automatisch bemeten en enkel handmatig gecontroleerd. Voor beleid als “water en bodem sturend” en de sterkte van dijken is het belangrijk dat een waterstand in de watergangen gehandhaafd blijft waardoor bijv. veen niet oxideert of de stabiliteit van een kering afneemt. Voor dit inzicht is geen hoogfrequente meting (per kwartier) noodzakelijk, en volstaat een periodieke waarneming. Hierdoor is het niet kostenefficiënt om in alle gebieden sensoren te plaatsen en te onderhouden, tegelijkertijd vraagt het te veel inspanning om dit handmatig uit te voeren waardoor organisaties “een blinde vlek” kennen

Remote sensing kan met laseraltimetrie de variatie in de topografie waarnemen. Satellieten (bijv. ICESAT-2) doen waarnemingen tot op een resolutie van 70 x 70 cm. Daarnaast bieden drones uitkomst voor het inwinnen van hoge resolutie puntenwolken, ook wel LiDAR scans genoemd (Figuur 1). LiDAR staat voor “Light Detection And Ranging” en wordt al gebruikt voor de monitoring van keringen en objecten, maar uit dezelfde datasets worden nog geen waterstanden berekend. Dit is een gemiste kans. Wetenschappelijk onderzoek benoemt de bruikbaarheid van LiDAR voor het afleiden van waterstanden, maar toch wordt het in de (Nederlandse) praktijk niet gebruikt. Redenen hiervoor zijn enerzijds de wisselende kwaliteit van de data (door weerkaatsingen en temperatuurafhankelijkheid), en anderzijds vanwege de ontoegankelijkheid van de grote datasets op de ruimtelijke schaal van waterlichamen.



*Figuur 1. 3D afbeelding gebied in de Beemster bestaande uit 30 miljoen laserhoogtemetingen. Zichtbaar zijn o.a. de bedijkte boezem (blauw), een brug (lichtblauw), bomen (rood), de sloten (donkerblauw), etc. Slimme algoritmes dienen de waterstanden nauwkeurig af te leiden uit de dataset.*

## Doel

Concreet heeft dit project als doel om waterstanden af te leiden met slimme algoritmes vanuit grote datasets ingewonnen met remote sensing. Het bovenliggende doel is om de toegankelijkheid te vergroten, de toevoegde waarde in kaart te brengen en zo het gebruik van (beschikbare) LiDAR data aan te moedigen

Het resultaat is een toolbox waarmee organisaties zelf LiDAR data kunnen verwerken tot waterstanden op kaart.

## Consortium

Het consortium is gevormd vanuit de TU Delft met Rijkswaterstaat, een viertal waterschappen en Nelen & Schuurmans.

- *TU Delft*: kennisexpert en projectlead.
- *Rijkswaterstaat*: probleemeigenaar als water- en keringbeheerder
- *Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier*: probleemeigenaar als water- en keringbeheerder en in bezit van drones t.b.v. monitoring van dijken en keringen.
- *Hoogheemraadschap van Rijnland*: probleemeigenaar als waterbeheerder.
- *Waterschap Aa en Maas*: probleemeigenaar als waterbeheerder.
- *Wetterskip Fryslân*: probleemeigenaar als waterbeheerder.
- *Nelen & Schuurmans Technology*: software solution provider voor verwerking grote datasets en ontwikkeling van informatieservices.

## Aanpak

Dit project is in vier fases uitgevoerd om tot het gewenste resultaat te komen. Als start is in de conceptualisatiefase de informatiebehoefte en de beschikbaarheid van data in beeld gebracht. Op basis hiervan is een methode uitgewerkt en data voorbereid om te gebruiken voor de analyse. Daaropvolgend zijn in twee onderzoekssprints analyses uitgevoerd en de resultaten getoetst aan de probleemeigenaren. Dit heeft geleid tot een prototype analysetoolbox. In de laatste fase zijn de resultaten en de toolbox geborgd voor verder gebruikt door de partners binnen het consortium en daarbuiten.

- Conceptualisatie
  - In beeld brengen van de informatiebehoefte
  - Data-inventarisatie en levering vanuit partners
  - Methodiek uitwerken
  - Dataprocesing in een cloudomgeving
- Onderzoekssprint 1
  - Uitwerken van initiële script
  - Analyseren resultaten
  - Delen bevindingen in eerste prototype met alle partners
- Onderzoekssprint 2
  - Uitwerken van initiële script
  - Analyseren resultaten
  - Delen bevindingen in tweede prototype met alle partners
- Publicatie
  - Beschrijving resultaten onderzoeksrapportage
  - Oplevering prototype analysetoolbox

## Informatiebehoefte

In het consortium is de informatiebehoefte van de probleemeigenaren door te kijken naar mogelijke toepassingen de gewenste kwaliteit. Dit heeft geleid tot de volgende opsomming van behoeften:

- Valideren waterstanden op plekken waar meet sensoren zitten;
- Verloop van waterstand over grote watergangen rivieren/kanalen;
- Peilafwijkingen opsporen i.v.t. peilbesluit/praktijkpeil m.b.t. het controleren van partijen die zelf waterstanden veranderen (boeren, bedrijven);
- Rijksdienst van Ondernemend Nederland (RVO) wil weten droge en natte watergangen duiden m.b.t. bemestingsvrije zones. Bij een droge watergang telt een kleinere bufferstrook, terwijl een natte watergang een grotere bufferstrook nodig heeft;
- Scheefstand meren tijdens storm;
- Breed beeld van waterstanden tijdens calamiteuze situaties voor evaluatie en model validatie;
- Langsverhang en dwarsverhang op watergangen en rivieren onder verschillende situaties;
- Voor de Rijkswateren is een nauwkeurigheid van minder dan 10 cm gewenst, terwijl voor waterschappen de gewenste afwijking maximaal een enkele centimeter(s) is. De AHN2 en AHN3 ingewonnen met LiDaR vanuit vliegtuigen, kennen een hoogtenauwkeurigheid van 10 cm voor 68% en 15 cm voor 95% van de totale dataset.

## Data

Hieronder is een overzicht opgenomen van de beschikbare databronnen voor dit project.

Organisatie	Beschrijving	Meetmethode	File
Rijkswaterstaat	Data Maas hoogwater 2021	LiDAR-30 tot 40 punten per m <sup>2</sup>	laz
Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	Remote sensing schouwen	LiDAR -300 tot 400 punten per m <sup>2</sup>	laz
Wetterskip Fryslân	Multispectrale en warmtebeelden vanuit drones	LiDAR-20 tot 30 punten per m <sup>2</sup>	laz
Kadaster	Basisregistratie Grootchalige Topografie	-	gml

Vanuit het Kadaster zijn BGT waterdelen te downloaden als gml bestand via: <https://app.pdok.nl/lv/bgt/download-viewer/>. Het bestand van de BGT waterdelen bevat soms 'curved polygons' als geometrieën. Deze zijn soms niet leesbaar als geopandas dataframe. Dit is te herstellen via het commando: ogr2ogr -nlt CONVERT\_TO\_LINEAR

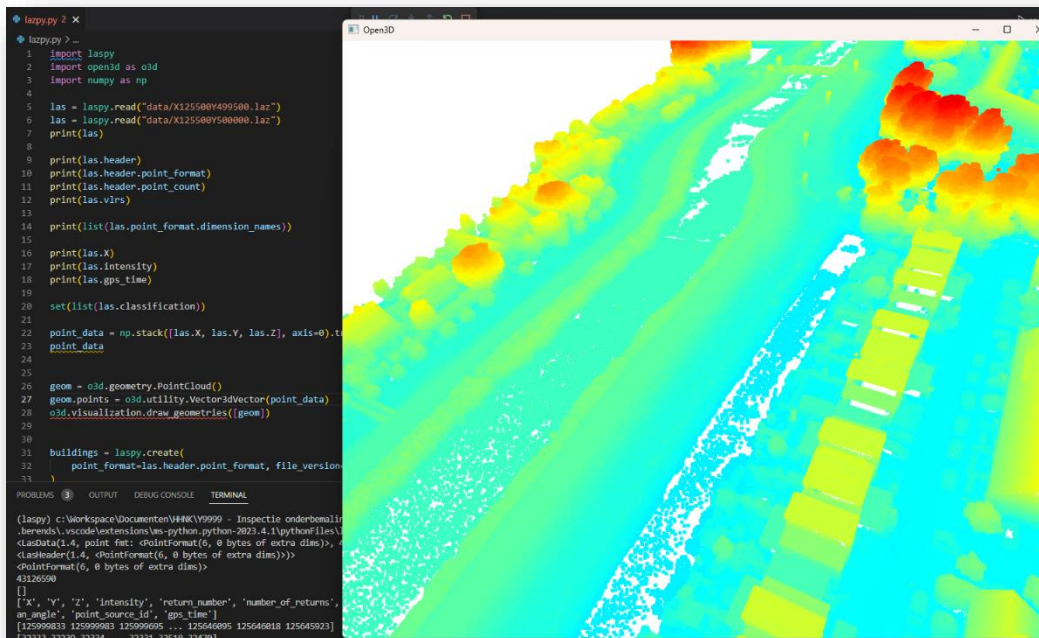
## Algoritme

LAS (en LAZ) wordt beschouwd als industriestandaard voor de uitlevering van LiDAR. De naamgeving staat voor laser (respectievelijk laser zipped) en is ontworpen voor de uitwisseling en archivering van puntenwolken. Het is een open, binair formaat gespecificeerd door de American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). Het formaat is een efficiënte informatiedrager voor de overdracht van gegevens tussen de dataprovider en opdrachtgever, echter is het formaat niet eenvoudig toe te passen buiten specifieke software, laat staan toegankelijk om eenvoudig waterstanden af te leiden.

Om de toegankelijkheid te vergroten is een algoritme uitgewerkt die in enkele simpele stappen een verdeling en/of kaartbeeld teruggeeft van de waterstand. Het algoritme werkt volgens de volgende stappen:

### 1. Inladen

Data is opgeslagen in las bestanden. Deze worden ingeladen in Python en vanuit daar verwerkt. Bijgeleverde scripts en map structuur beschrijven de benodigde softwarebibliotheken en het installatieproces hiervan.



Figuur 2. Voorbeeld met inladen bestand ingewonnen met een drone van de Beemster (Noord-Holland).

### 2. Transformatie

Om de data klaar te maken voor gebruik wordt deze voorbereid. Voor het meten van waterstanden zijn enkel de punten binnen een watergang van belang. De watergangen zijn beschikbaar vanuit de Basisregistratie Grootchalige Topografie (BGT) als type "waterdeel". Voor het filteren zijn diverse methodes getest waaronder o.a. de Sort-Tile-Recursive tree, de spatiaal join in Geopandas. Deze laatste methode was het meest efficiënt en versnelt de benodigde verwerkingstijd drastisch. De functie is generiek geïmplementeerd en filtert de punten op basis van een polygoon. Dit hoeft geen water te zijn, zoals in dit project is gedaan.

### 3. Selectie

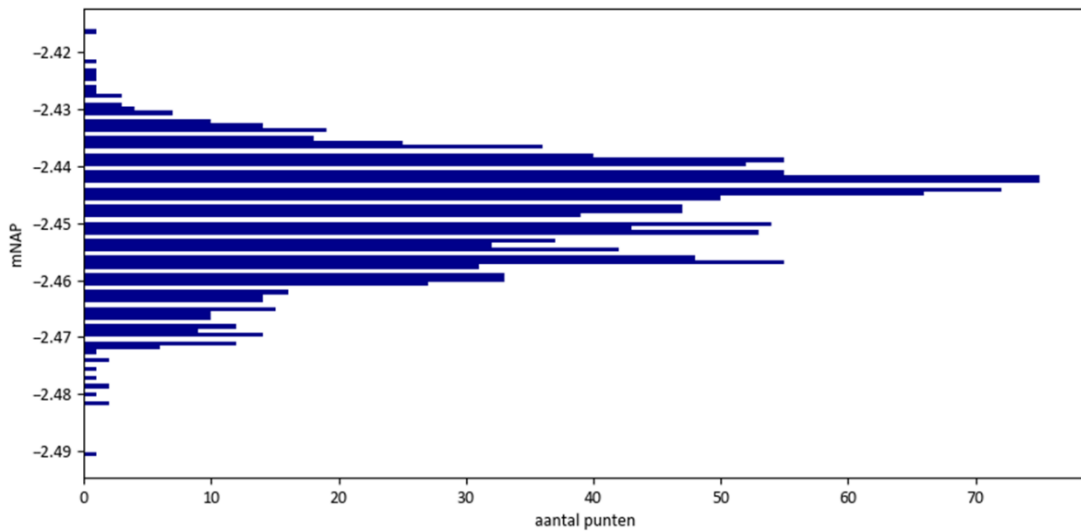
De dataset is nu geschikt voor gebruik en het testen van verschillende filters om ongewenste datapunten te verwijderen (bijvoorbeeld vegetatie aan de rand van een watergang). Er zijn verschillende manieren waarop je deze data zou kunnen filteren om de gewenste waterdiepte te verkrijgen. Daarbij zijn een drietal getest; één waarbij naar de mate van reflectie is gekeken, één op basis van statistiek van de datapunten en één op basis van de locatie van datapunten:

- **Golflengte/reflectie (eigenschap):** LiDAR beelden kunnen verschillende golflengtes hebben, afhankelijk van de frequentie en de polarisatie van de laserstralen. De golflengte bepaalt hoe diep de reflectie wordt gemeten en hoe veel details er te zien zijn. Een manier om verschillende type landgebruik te onderscheiden op basis van reflectie is door gebruik te maken van een classificatiesysteem dat rekening houdt met de eigenschappen van het grondoppervlak, zoals het materiaal, de textuur, de vorm en de grootte. Een voorbeeld van zo'n systeem is het Landelijk Grondgebruiksbestand Nederland (LGN), dat een landsdekkend bestand is dat informatie geeft over het grondgebruik in Nederland. Vegetatie en water hebben echter vergelijkbare reflectie percentages en is daardoor lastig te onderscheiden.
- **Grenswaarden t.o.v. streefpeil (statistiek):** Andere methode van filtering is met behulp van een grenswaarde grond het streefpeil/verwachte peil. Uit inventarisatie van de data kwam naar voren dat kijkend naar de dwarsdoorsnede van een puntenwolk een visueel goed beeld van de waterlijn is te herleiden. Deze visuele inspectie is te vertalen in code door grenswaarden binnen het algoritme mee te geven. Dit blijkt een simpele doch doeltreffende methode om de gewenste datapunten te selecteren.
- **Hartlijn watergang (locatie):** De laatste geteste methodiek is de selectie van datapunten binnen een marge van de hartlijn van watergang. De kans bestaat dat punten op de hartlijn ontbreken vandaar een marge eromheen te nemen. Deze marge is een vast waarde of een percentage van de afstand tussen de hartlijn en de rand van een watergang. De helft van de watergang is eerste arbitraire keuze om te voorkomen dat ongewenst alsnog vegetatie of delen van de waterrand meekomen in de selectie.

### 4. Presentatie

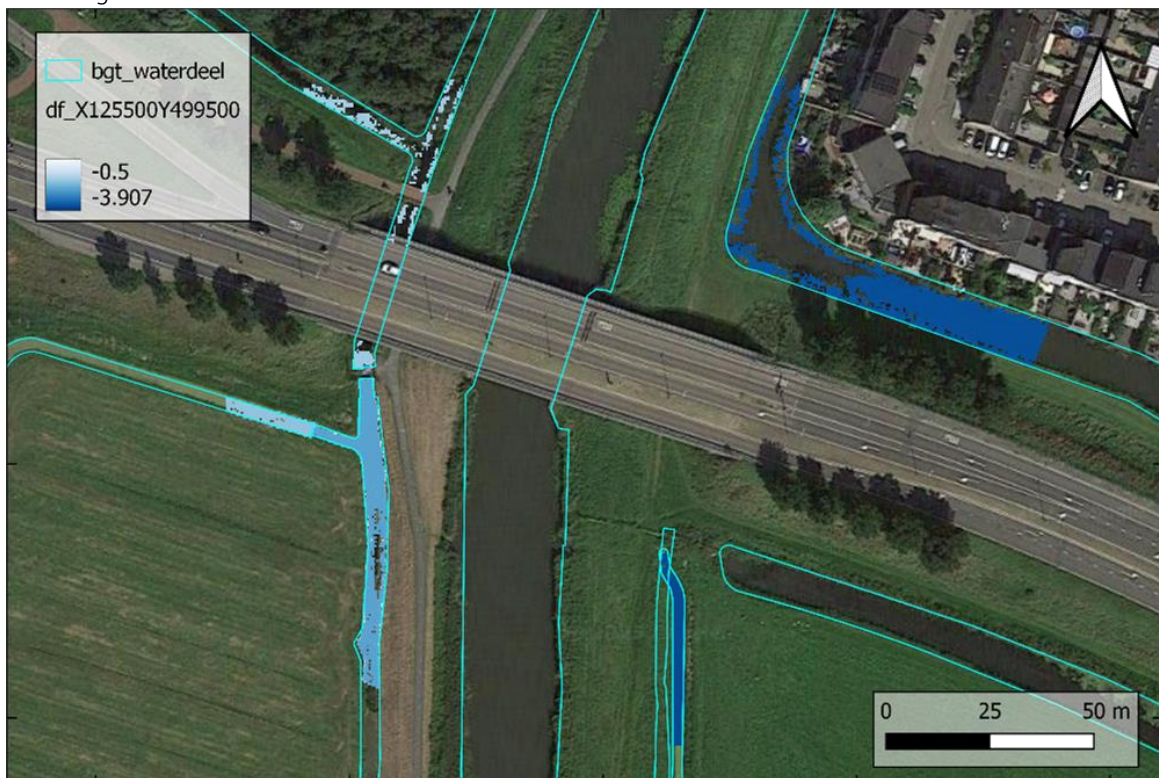
Met de geselecteerde punten worden een tweetal analyses uitgevoerd om informatie over de waterstand te presenteren naar de gebruiker:

- **Frequentiediagram:** op basis van de datapunten uit puntwolk geeft een frequentiediagram aan hoe vaak een meetwaarde voorkomt in de dataset. Daarnaast geeft het beeld van de spreiding/precisie van de data. Onderstaande toont een voorbeeld van een punt in een watergang en alle datapunten in de nabijheid van 1 meter. Dit resulteert in 1450 datapunten en een modus (meest voorkomende waarde) van -2.443 mNAP. Deze analyse is uitgevoerd op waarden met drie decimalen.



Figuur 3. Voorbeeld van een frequentiediagram van waargenomen waterstanden.

- **Kaartweergave:** een ander algoritme aggregereert de data op een vaste resolutie van 1 x 1 meter door de modale waarde uit de puntenwolk te bepalen en deze te plotten op een kaart. Op deze wijze krijg je een ruimtelijk beeld van de waterstanden en is het ook mogelijk om een verhang te zien.



Figuur 4. Kaartweergave met watergangen uit de BGT en de modale waterstand per vierkante meter.

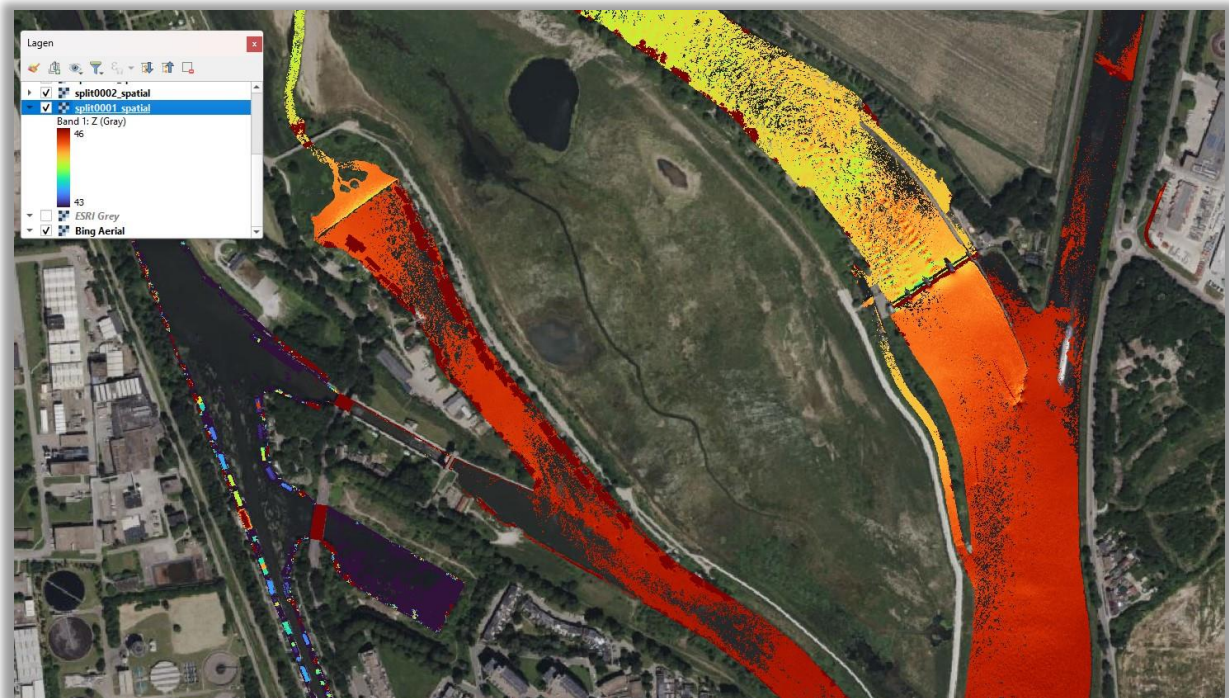


## Resultaten

Los van het verbeteren van de toegankelijkheid van LiDAR data, is de kwaliteit van het resultaat vanzelfsprekend belangrijk om het gebruik van LiDAR data te vergroten. In onze analyses en vanuit eerdere onderzoeken is een kwaliteitsindicatie gegeven aan het resultaat. Hierbij is o.a. de afgeleide waterstand vergeleken met metingen uit waterinformatiesystemen van de waterschappen. Het resultaat ligt in lijn met de nauwkeurigheid van het AHN. De puntenwolken ingewonnen door Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier kennen een factor 10 grotere punt dichtheid en leidt mede daardoor tot een hogere nauwkeurigheid.

Organisatie	Beschrijving	Kwaliteitsindicatie
Rijkswaterstaat	Data Maas hoogwater 2021	≈ 9 cm
Hoogheemraadschap Hollands Noorderkwartier	Remote sensing schouwen	< 2 cm
Wetterskip Fryslân	Multispectrale + warmtebeelden drones	< 10 cm

Tijdens het hoogwaterevent in juli 2021 heeft Rijkswaterstaat LiDAR opnames laten maken van de Maas. Deze data zijn ook verwerkt tot een waterstandenkaart, zie figuur 5 en bijlage 1. Daarbij dient te worden opgemerkt dat de beelden niet exact op hetzelfde tijdstip zijn ingevlogen vanwege de vlieglijnen bij inwinning. De beelden tonen het verhang van de waterstand langs de rivier. Daarbij is een sprong in de waterstand zichtbaar bij de sluisdijk in Maastricht met opstuwing van het water voor de sluis en turbulentie van het water benedenstrooms.



Figuur 5. Kaartweergave van waterstanden tijdens het hoogwaterevent juli 2021.

## Conclusie en aanbevelingen

Dit project heeft als doel om met behulp van algoritmes waterstanden af te leiden uit LiDAR datasets en tevens de toegankelijkheid van LiDAR data te verbeteren. LiDAR data wordt al ingewonnen voor diverse doeleinden, maar nog weinig gebruikt om waterstanden af te leiden. Dit komt enerzijds door complexe datastructuur als kwaliteit van het resultaat. Binnen dit project is de toolbox, genaamd Heron, ontwikkeld om gebruiksvriendelijk LiDAR data te verwerken en filteren tot laagdrempelige informatie van waterstanden op een kaart en/of als een veelgebruikt GIS-bestand (geotif). De toolbox is getoetst op datasets van enkele organisaties en heeft geleid tot bruikbare resultaten. Op basis van deze succesvolle uitkomsten hopen we het gebruik van (beschikbare) LiDAR data aan te moedigen en zal leiden tot een beter inzicht in de toestand van het watersysteem. De toolbox is generiek opgezet en niet enkel bruikbaar voor analyses op watergangen. In een vervolgonderzoek is het interessant of deze ook toepasbaar is om bodemdaling te signaleren.

## Code

De code van de toolbox is publiek beschikbaar via Github: <https://github.com/tberends/heron>. Daarbij is een handleiding gevoegd voor de installatie en het gebruik van de toolbox op een dataset binnen een eigen serveromgeving of via een cloudomgeving als bijv. <https://colab.research.google.com/>.

Bijlage 1. Waterstanden op de Maas tijdens het hoogwaterevent, juli 2021.

