

# Erprobung des Leica SPL100 Laserscanners zur Erfassung der Wasseroberfläche an deutschen Binnengewässern

ROBERT WEIß<sup>1</sup> & GOTTFRIED MANDLBURGER<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Ein Baustein zur Sicherstellung der Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs auf Bundeswasserstraßen ist die korrekte Erfassung der Wasseroberfläche. In der heutigen Zeit werden die entsprechenden Anforderungen immer höher und linienhafte Erfassungen in Form von Längsprofilen reichen für bestimmte Anwendungen nicht mehr aus. Infolgedessen besteht ein großes Interesse an einer Methode zur flächenhaften Erfassung von Wasseroberflächen. Die BfG wurde beauftragt zu untersuchen, inwieweit der Leica SPL100 Single Photon LiDAR Scanner für diese Aufgabe geeignet ist. Gleichzeitig soll untersucht werden, welche Performance der Scanner für topografische Aufnahmen hat. Im Rahmen der Untersuchung erfolgte eine Befliegung bestimmter Testgebiete entlang des Mittelrheins mit unterschiedlichen Eigenschaften in unterschiedlichen Flughöhen. In diesem Betrag werden erste Ergebnisse vorgestellt.*

## 1 Einleitung und Motivation

In Deutschland ist die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) für die Sicherstellung der Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt auf Bundeswasserstraßen zuständig. Dies beinhaltet auch die Sicherstellung der Hindernisfreiheit definierter Fahrrinnen und Mindesttiefen. Hierfür sind neben vielen weiteren Informationen auch die Erfassung der Geometrie der Wasseroberfläche nötig. Konventionell wird diese punktuell über Pegel bzw. linienhaft über Wasserspiegelfixierungen erfasst. In der heutigen Zeit reichen eindimensionale Informationen zur Wasseroberfläche nicht mehr für alle Anwendungen aus. Insbesondere für hydronumerische Modellierungen sind flächenhafte Informationen zur Wasseroberfläche von großem Interesse. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) ist eine dem Deutschen Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) nachgeordnete wissenschaftliche Oberbehörde, deren Aufgabe auch darin besteht, die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung fachtechnisch zu beraten. Im Rahmen dieser Aufgaben werden von der BfG unter anderem auch neuartige technische Systeme erprobt, sowie wissenschaftlich/technische Fragestellungen bearbeitet. Von Seiten des BMVI wurde die BfG beauftragt, die Möglichkeiten zur Erfassung der Wasseroberfläche mithilfe luftgestützter Airborne Laserscanning-Technik zu evaluieren. Bedingt durch die variierende Wasserspiegelhöhe treten dabei gegenüber einer konventionellen ALS-Befliegung zusätzliche Anforderungen auf. Durch seine technischen Möglichkeiten ist der Leica SPL100 eine vielversprechende Lösung (DEGNAN et al. 2016; DEGNAN et al. 2018; LEICA 2020). Erste Untersuchungen zur Erfassung der Wasseroberfläche mit dem Leica SPL100 wurden von MANDLBURGER & JUTZI (2018) und MANDLBURGER & JUTZI (2019) veröffentlicht.

---

<sup>1</sup> Bundesanstalt für Gewässerkunde, Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz, E-Mail: weiss@bafg.de

<sup>2</sup> Technische Universität Wien, Wiedner Hauptstraße 8-10, A-1040 Wien, Österreich, E-Mail: gottfried.mandlbuerger@geo.tuwien.ac.at

Im Rahmen einer Beauftragung durch die BfG erfolgte eine ALS-Befliegung bestimmter Testgebiete an Rhein und Mosel in unterschiedlichen Flughöhen (Abb. 1, links). Von Seiten des Auftragnehmers erfolgte die Datenlieferung der ersten Bearbeitungsstufe Mitte Januar 2020.

## 2 Problemstellung

Eine Unterhaltung von Wasserstraßen bedingt immer neben einer Erfassung der Gewässersohle auch die Definition bestimmter Bezugswasserstände, welche die Grundlage für nautische Karten darstellen. Praktisch bedeutet dies, dass an definierten Positionen (z.B. alle 100 m) den Bezugswasserständen Höhenwerte im amtlichen Höhenbezugssystem zugeordnet werden. Am Rhein ist ein Gleichwertiger Wasserstand (GIW) eingeführt, der seit vielen Jahrzehnten als maßgeblicher Wasserstand für den Ausbau und Unterhaltung der Fahrrinne am frei fließenden Rhein verwendet wird. Dieser wird in regelmäßigen Abständen von 10 Jahren überprüft und ggf. aktualisiert (WSV, 2014). Der Verlauf des Wasserspiegelgefälles am Rhein ist nicht linear und insbesondere von Strömungen und der Gewässerbodentopografie abhängig (Abb. 1, rechts).

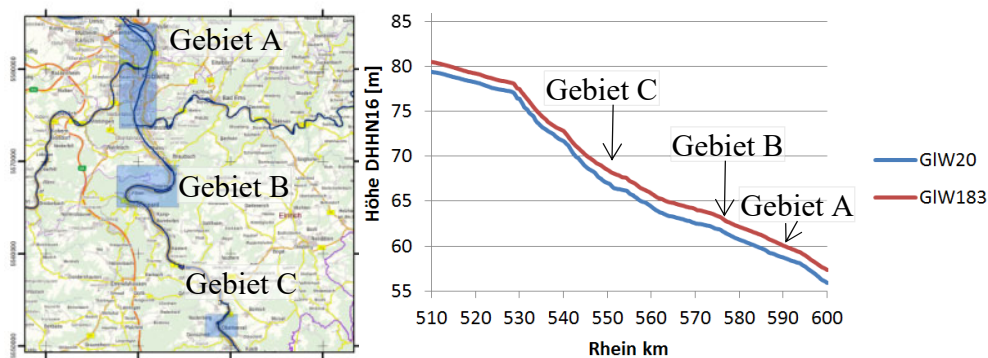


Abb. 1: Befliegungsgebiete (links) und Höhenverlauf des Bezugswasserstandes am Rhein (rechts)

Bedingt durch variierende Abflusszustände ist die Wasseroberfläche als dynamisch anzusehen und folglich kommt die zusätzliche Forderung nach einer sehr kurzen Erfassungszeit hinzu. Der Leica SPL100 ist für diese Anwendung aufgrund der potenziell großen Flughöhe eine naheliegende Lösung. Bedingt durch die Single Photon Lidar Technik ist dieser Scanner sehr sensitiv und in der Lage, auch schwache Wasseroberflächenechos zu empfangen. Weiterhin weist er mit 100 Einzelstrahlen i.V. mit einer sehr geringen Beamdivergenz eine extrem hohe Messrate bzw. hohe Punktdichte auf und kann auch aus einer sehr großen Höhe eingesetzt werden. Diese ist wiederum für eine große Streifenbreite am Boden und damit verbunden für eine Erfassung der Wasseroberfläche innerhalb einer kurzen Zeitspanne nötig.

MANDLBURGER & JUTZI (2019) haben allerdings anhand von Modellrechnungen auf Basis der Laser-Radar Gleichung gezeigt, dass für Standardflughöhen (ca. 4000 m) und -scanwinkel ( $15^\circ$  gegenüber der Nadirrichtung), selbst bei diesem Einzelphoton-sensitiven Sensor oftmals nicht genügend Strahlung von der Wasseroberfläche reflektiert wird, um gesichert Messpunkte bestimmen zu können. Im Zuge eines Pilotprojekts wurde daher eine Datenerfassung aus unterschiedlichen Flughöhen und mit einem Scanwinkel von  $10^\circ$  bezogen auf die Nadirrichtung

durchgeführt. Primäres Ziel war es dabei, eine flächenhafte Erfassung und geometrische Modellierung der Wasseroberfläche der Bundeswasserstraßen in den Befliegungsgebieten zu realisieren und dabei festzustellen, ab welchen Flughöhen dies zuverlässig möglich ist. Die Genauigkeit sollte dabei so hoch sein, dass auch geringere Variationen der Wasseroberflächenhöhen, wie beispielsweise Quergefälle in engen Kurven nachweisbar sind. Sekundäres Ziel sind belastbare Aussagen zur Performance des Leica SPL100 für topografische Aufnahmen trockener Oberflächen. Dies beinhaltet insbesondere Aussagen zur erreichbaren Punktdichte, Genauigkeit und Zuverlässigkeit bei bestimmten Flugparametern.

## 2.1 Datenerfassung

Zur Erfüllung des Auftrages wurde von Seiten der BfG eine Befliegung der drei genannten Gebiete in Flughöhen 3000 m, 2500 m, 1600 m und 800 m über Grund beauftragt. Jedes der drei Gebiete zeichnet sich durch besondere Eigenschaften aus. Innerhalb des Gebietes A sind neben dem Rhein als freifließendem Fluss auch staugeregelte Flüsse (Mosel und Lahn) vorhanden, deren Oberflächenbeschaffenheit sich von einem freifließendem Fluss unterscheidet.

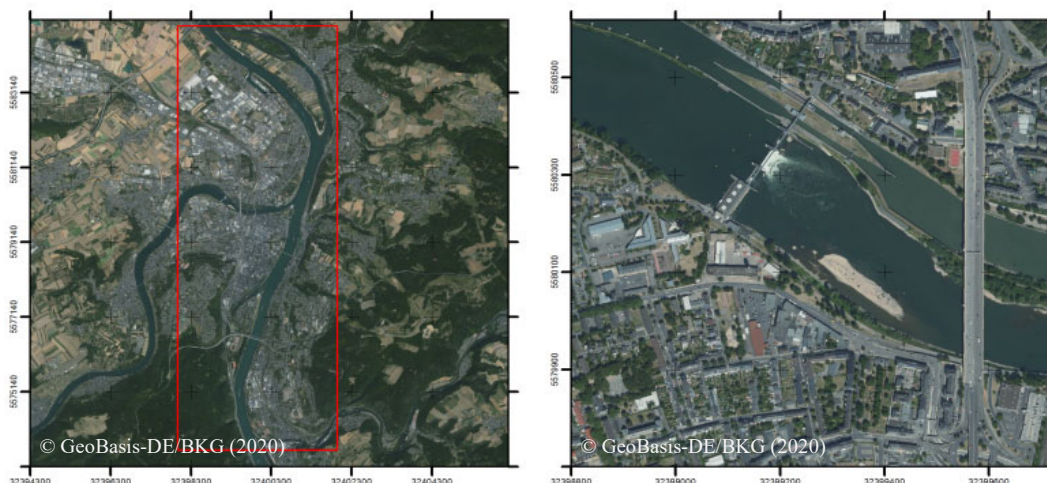


Abb. 2: Befliegungsgebiet A (links) und Moselwehr mit Stausee (rechts)

Neben einer Gesamtübersicht sind in Abb. 2 und 3 einzelne Gebiete detaillierter dargestellt. Ein wesentliches Untersuchungsgebiet stellt die Mosel in Gebiet A dar. In diesem Gebiet befindet sich ein Stauwehr, der damit verbundene Moselstausee, Schleusenanlagen und ein freifließender Teil (Abb. 2, links). Die Mündung in den Rhein ist in Abb. 3 links dargestellt. Darüber hinaus steht das Gebiet A stellvertretend für ein urbanes Gebiet. Die Insel Niederwerth (Abb. 3, rechts) zeichnet sich durch eine Vielzahl unterschiedlicher Oberflächenarten, wie etwa Kiesstrand, Buschwerk, Wälder, landwirtschaftliche Flächen, Wiesen etc. aus.

Die Befliegungsgebiete B und C (Abb. 4) zeichnen sich vor allen durch mehrere enge Flusskurven (Gebiet B) und hydraulisch schwierige Verhältnisse (Gebiet C) aus. Die Hydraulik im Bereich des Gebietes C ist hydronumerisch äußerst komplex zu modellieren. Dies wird insbesondere durch enge Kurven, einer sehr variablen Gewässerbetttopografie sowie Felsen und Sandbänke verursacht. Infolgedessen wird in diesem Gebiet eine relativ stark variierende Wasseroberfläche erwartet.

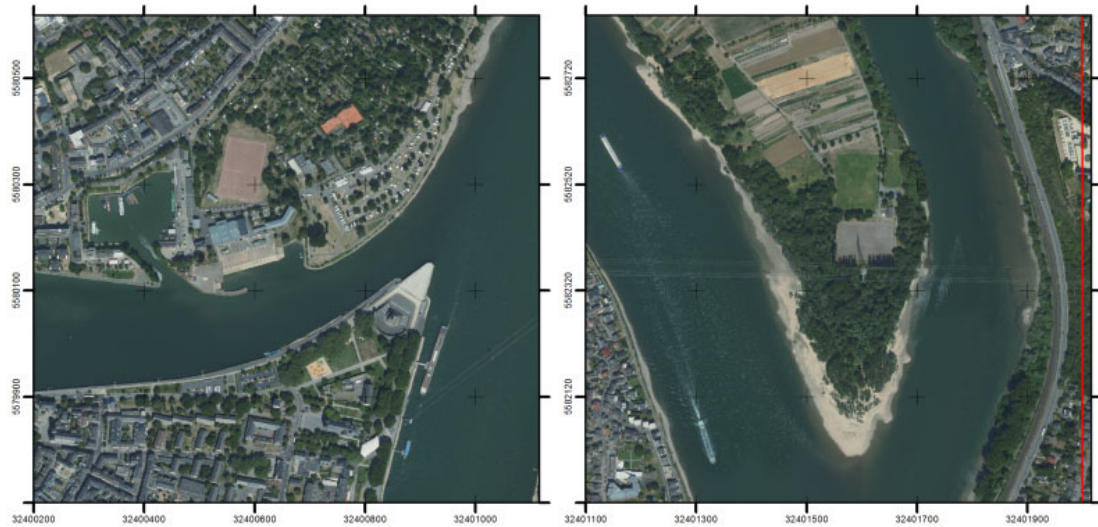


Abb. 3: Moselmündung (links) und Niederwerth (rechts)

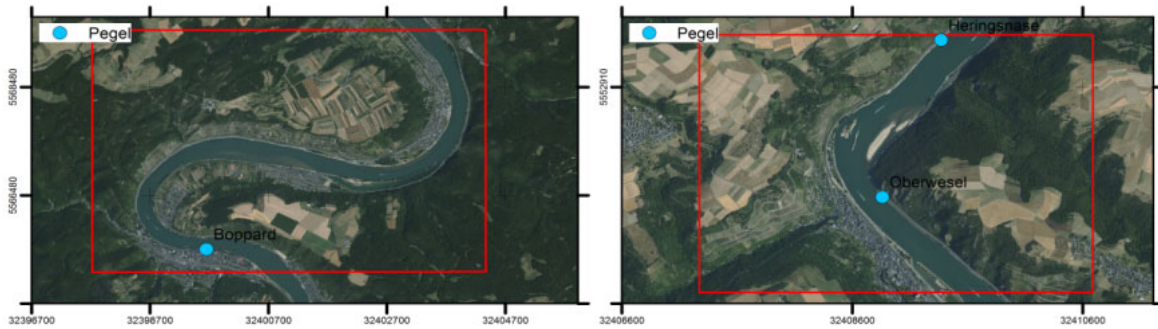


Abb. 4: Befliegungsgebiete B und C

Die Befliegung erfolgte am 30./31.10.2019. Zu diesem Zeitpunkt lagen die Wasserstände etwa 70 cm oberhalb des GIW20 und es wurden am Rhein Sichttiefen von 1,3-1,4 m ermittelt. Erfasst wurden die Daten aus Flughöhen von 3000 m (Gebiet A+B), 2500 m (Gebiet C), 1600 m (Gebiet A+B) und 800 m (Gebiet B+C) über Grund. Alle Scannerparameter sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Auslenkung des Scanners betrug  $10^\circ$ , so dass ein Field of View von  $20^\circ$  realisiert wurde.



Abb. 5: Wetterbedingungen und Messflugzeug während der 3000m Befliegung



Tab. 1: Genutzte Flug- und Scanparameter

| Gebiet | Flughöhe<br>[m] | Geschw.<br>[m/s] | Punkt-<br>dichte<br>je Streifen<br>[Punkte/m <sup>2</sup> ] | Punktabstand<br>(Durchschnitt) |                   | Lücke<br>zwischen<br>Scans<br>[m] | Scan-<br>rate<br>[Hz] | Puls-<br>rate<br>[kHz] |
|--------|-----------------|------------------|---|--------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------------------|
|        |                 |                  |   | radial<br>[m]                  | tangential<br>[m] |                                   |                       |                        |
| A/B    | 3000            | 77               | ~25   | 0,15                           | 0,18              | -                                 | 20                    | 45                     |
| C      | 2500            | 77               | ~32   | 0,15                           | 0,15              | -                                 | 20                    | 45                     |
| A/B/C  | 1600            | 77               | ~55   | 0,15                           | 0,07              | 0,97                              | 20                    | 50                     |
| A/B/C  | 800             | 77               | ~110  | 0,15                           | 0,04              | 2,00                              | 20                    | 50                     |

## 2.2 Referenzdaten

Als Referenzdaten liegen in den jeweiligen Untersuchungsgebieten mehrere Pegel sowie Flächen an Land vor. Bei den Pegeln handelt es sich um offizielle Pegel der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Diese setzen sich immer aus mindestens einer Pegellatte als maßgebenden Sensor, sowie mindestens einem kontinuierlich arbeitenden Wasserstandssensor zusammen (WEIß & SUDAU, 2012). Die durch den kontinuierlich arbeitenden Wasserstandssensor erfassten Daten werden innerhalb der Pegelmessstelle zu 15-Minuten Werten zusammengefasst, welche danach öffentlich zugänglich gemacht werden. Eine Nutzung der Rohmesswerte ist nicht möglich. Bei den Pegeln der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung wird im Rahmen von Pegelprüfungen sichergestellt, dass die an den Pegelsensoren erfassten Werte auch den manuellen Ablesungen der Pegellatte entsprechen. Hierbei ist zu beachten, dass die Ablesegenauigkeit einer Pegellatte auf etwa 1 cm beschränkt ist. Darüber hinaus findet jährlich oder in zweijährigen Abständen eine Kontrolle der Höhenlage statt. Durch diese Kontrollen wird sichergestellt, dass die Pegellatten höhenmäßig korrekt montiert sind bzw. die Lattennullpunkte die zuvor definierten Höhen aufweisen. Gemäß angewendeter Pegelvorschrift sind an dieser Stelle Abweichungen von  $\pm 1$  cm zulässig (LAWA, 2018). Von Seiten der WSV erfolgten zeitnah zur Befliegung sowohl Kontrollen der Höhenlage der Pegelnullpunkte wie auch Pegelprüfungen. Die Ergebnisse zeigten, dass alle Pegel korrekt gearbeitet haben.

Neben den Pegeln existieren noch eine Vielzahl von Referenzflächen an Land, welche durch die WSV bereitgestellt bzw. von der BfG erfasst wurden. Zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Artikels lagen noch keine finalen (streifenabgeglichenen) Ergebnisse vor. Aussagen zur Genauigkeit der erfassten Beobachtungen an Land können somit zu diesem Zeitpunkt noch nicht gemacht werden.

## 2.3 Datenprozessierung und Auswertung

Die komplette Datenprozessierung erfolgt beim Auftragnehmer. Die Ableitung der für die Punktkoordinaten notwendigen Trajektorie des Flugzeugs erfolgte im Postprocessing unter Nutzung der SAPOS<sup>®</sup>-Referenzstation Koblenz. Alle erfassten Rohbeobachtungen des SPL100 wurden mittels Leica HxMap Software in ETRS89/UTM Punktkoordinaten umgerechnet und streifenweise als LAS-Dateien geliefert. Im Rahmen einer ersten Klassifizierung wurden Streupunkte der Luft bzw. solare Fehlechos, sowie weitere Fehlmessungen eliminiert. Die Ergebnisse der weiterführenden Auswertung (u.a. Streifenabgleich, Plausibilisierung und Klassifizierung) liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vor.

## 2.4 Erste Ergebnisse

Einen ersten Eindruck vermitteln die in Abb. 6 dargestellte Rohpunktcloud im Bereich des Deutschen Ecks (Mündungsbereich der Mosel (rechts) in den Rhein (links)). Die Flughöhe dieser Daten betrug 3000 m. Numerisch ergibt sich bei einer Strahldivergenz von 0,08 mrad aus einer Flughöhe von 3000 m ein Footprintdurchmesser im Nadir von ~0,24 m. Bei einem relativ geringen Auslenkwinkel von  $10^\circ$  werden die daraus resultierenden Vergrößerungen des Footprints bzw. die Variationen aufgrund der Roll- und Pitchbewegung des Flugzeuges vernachlässigt. Anhand der Abb. 6 zeigt sich, dass auch aus großen Höhen relativ dünne Strukturen, wie z.B. Geländer erfasst werden. Es zeigt sich weiterhin, dass im Bereich der beiden Flüsse viele Punkte erfasst wurden. Inwieweit diese die Oberfläche repräsentieren oder Volumenstreuer im Wasser darstellen, kann derzeit noch nicht beurteilt werden.

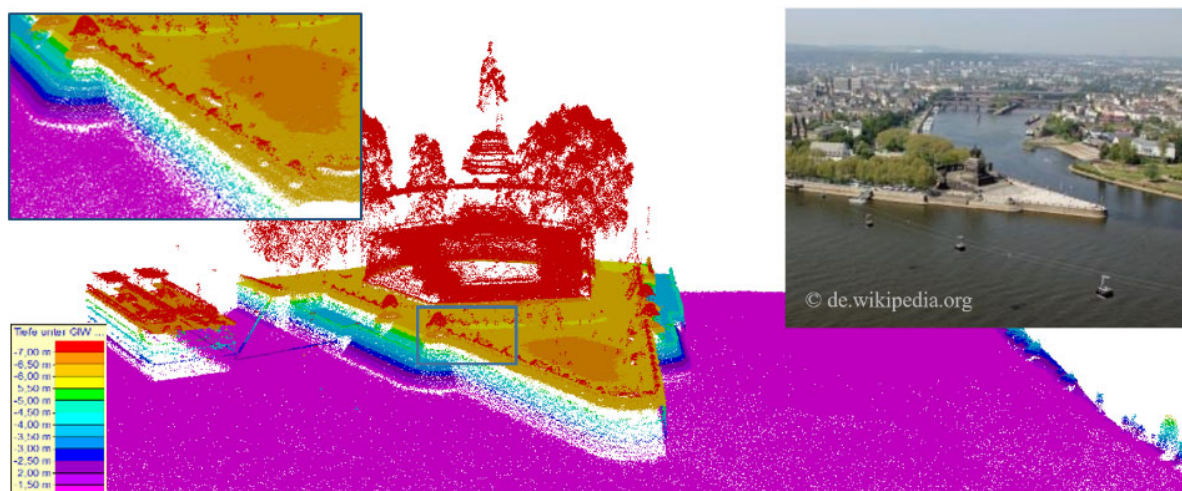


Abb. 6: Rohpunktcloud im Mündungsbereich der Mosel

### 2.4.1 Punktdichte

Bei der Beurteilung der Punktdichte ist zu beachten, dass z.T. Mehrfachechos vorhanden waren. Infolgedessen werden zur ersten Beurteilung der Punktdichte nur Gebiete herangezogen, die vegetationsfrei an Land liegen bzw. es werden nur die „last-pulse“ Daten näher betrachtet. Auch ist bei der Beurteilung der Punktdichte zu beachten, dass aufgrund des kreisförmigen Scanmusters (Palmer Scanner) eine inhomogene Punktverteilung innerhalb des Messstreifens vorliegt. In den Randbereichen ist diese um ein Vielfaches höher, als dies im Nadir des Scanners. In den folgenden Abbildungen ist jeweils ein Segment eines Flugstreifens dargestellt.

Abb. 7 zeigt die Messpunktdichte bei einer Flughöhe von 2500 m. Im linken Bereich werden zusätzlich die Minimaltiefen von 1 m Rasterzellen dargestellt. Aus diesen Werten lässt sich der Verlauf des Rheins ableiten. Aus der Abbildung geht hervor, dass auch im Zentralbereich auf trockenen Flächen Punktdichten von mehr als 30 Punkten/m<sup>2</sup> erreicht wurden (gelb). Im Bereich des Rheins sind weniger Echos vorhanden, wobei die Punktdichte aber dennoch deutlich höher als 10 Punkte/m<sup>2</sup> ist. Inwieweit es sich dabei aber um Wasseroberflächenreflexionen oder Volumenstreuer im Wasser handelt, ist aus den unklassifizierten Daten nicht abzuleiten.

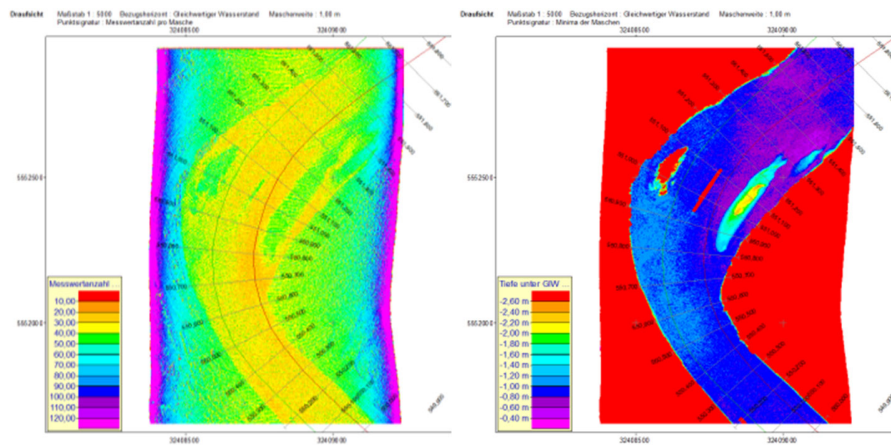


Abb. 7: Messpunktdichte (links) und Geländehöhe (rel. zum GIW) aus 2500m Höhe

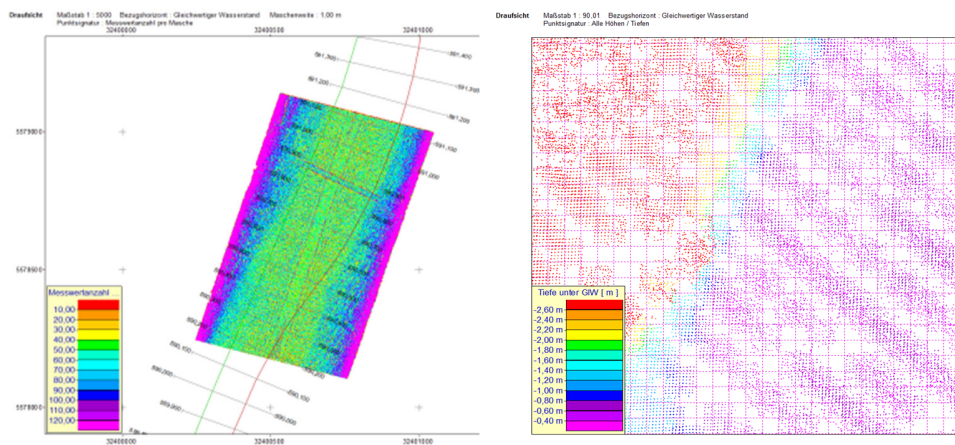


Abb. 8: Messpunktdichte und Bodenmuster/Geländehöhe aus einer Flughöhe von 1600m

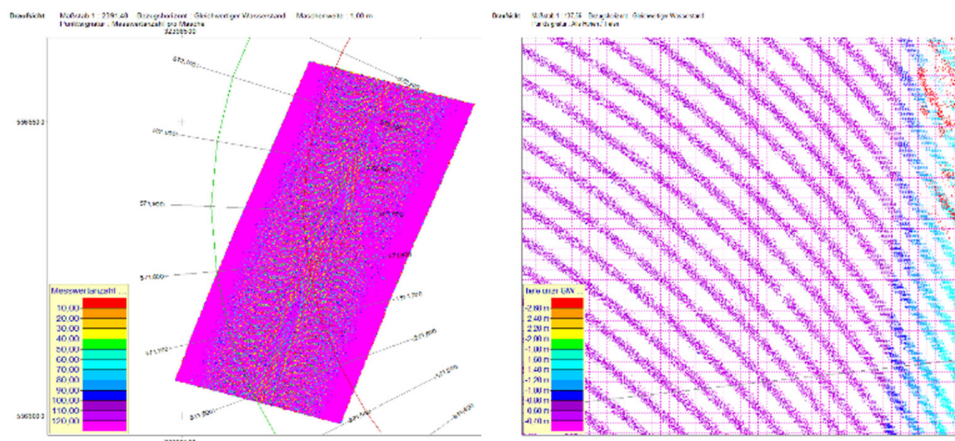


Abb. 9: Messpunktdichte und Bodenmuster/Geländehöhe aus einer Flughöhe von 800m

Aus den Flughöhen von 1600 m bzw. 800 m ergeben sich deutlich höhere Punktdichten (Abb. 8 und 9). Es ist dabei aber zu beachten, dass zwischen den einzelnen Scanzeilen Lücken entstehen,



welche auf die bewusste Unterschreitung der für den Scanner konzipierten Mindestflughöhe von 2000 m (LEICA 2020) zurückzuführen sind. Für eine bessere Darstellung des Scannummers werden in den rechten Bereichen der Abbildungen Detailaufnahmen der Punktverteilung am Boden dargestellt. Zur Verdeutlichung des Scannummers werden nur die vor dem Flugzeug erfassten Lasermesspunkte dargestellt. Zusätzlich ist ein 1 m Raster eingeblendet.

### 2.4.2 Relative Streuung der Bodenpunkte zueinander

Bedingt durch den bisher nicht erfolgten Streifenabgleich sind absolute Genauigkeitsaussagen noch nicht möglich. Zur Abschätzung der relativen Genauigkeiten untereinander werden im Folgenden die Standardabweichungen der Bodenpunkte innerhalb eines 1,0 m × 1,0 m Gitters näher beleuchtet. In Abb. 10 sind für das Deutsche Eck im Gebiet A (links) sowie für einen Bereich im Gebiete C (rechts) die Standardabweichungen der gerasterten Beobachtungen innerhalb eines Messstreifens dargestellt. In den grau dargestellten Flächen liegt diese unterhalb von 5 cm. In der Realität handelt es sich bei den grau dargestellten Flächen um Sandbänke bzw. Sandflächen.

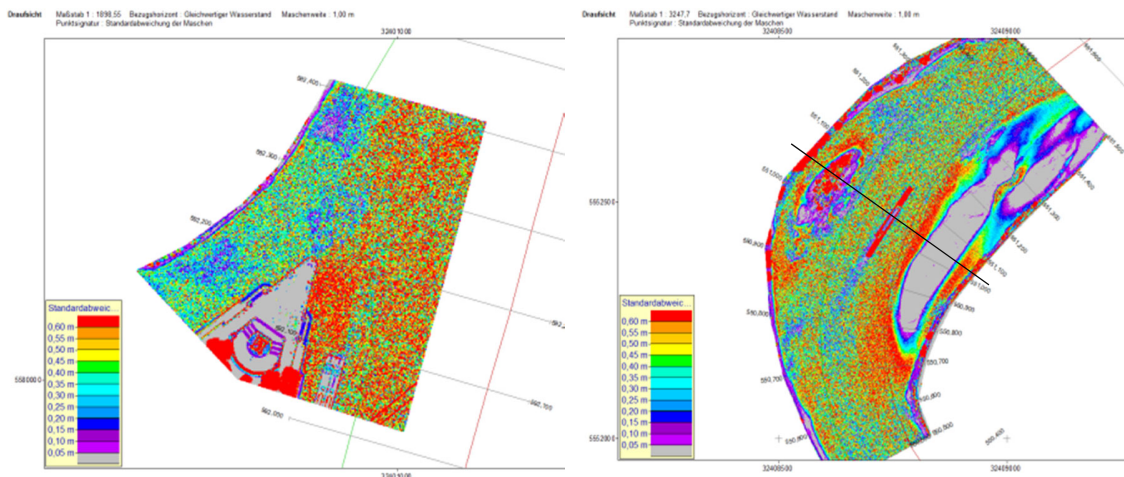


Abb. 10: Standardabweichungen der Beobachtungen innerhalb eines 1m Rasters

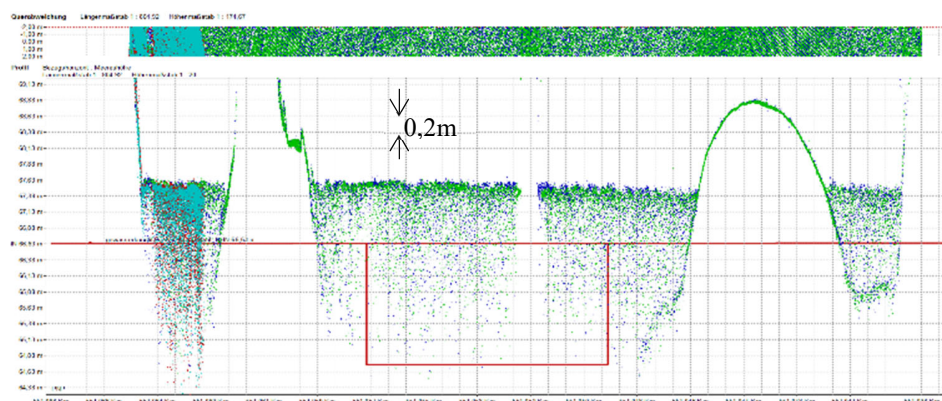


Abb. 11: Querprofil über die Rohbeobachtungen im Gebiet C



Zusätzlich sind in Abb. 11 ein Querprofil über die im Gebiet C liegende Sandbank dargestellt, dessen Lage in Abb. 10 rechts markiert ist. Das Querprofil stellt alle Beobachtungen innerhalb eines 4 m breiten Streifens dar. Alle der Abbildung zugrunde liegenden Daten wurden aus einer Flughöhe von 2500 m erfasst. Neben der sehr geringen Streuung der Beobachtungen über unbewachsenen trockenen Flächen zeigt sich außerdem, dass der Scanner über ein bestimmtes bathymetrisches Potenzial verfügt. Da Leica den Scanner als topografischen Scanner vermarktet, findet an dieser Stelle keine Brechungskorrektur statt.

### 2.4.3 Vergleich mit Pegeldata

Bisher liegen noch keine klassifizierte Daten vor. Folglich kann keine Unterscheidung zwischen Volumenstreuern im Wasser und Wasseroberflächenechos erfolgen. Für erste Abschätzungen wurden die streifenweise die Beobachtungen gerastert und aus jeder Gitterzelle die höchsten 5% aller Beobachtungen extrahiert. Dieses Verfahren wurde auf ein 50 m × 30 m großes Rechteck der Wasseroberfläche unmittelbar neben den Pegeln angewendet (Abb. 12, links). Die Mittelwerte aller Beobachtungen innerhalb des Rechtecks wurden den amtlich gemessenen Wasserständen gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass im Mittel die Rohbeobachtungen wenige cm unterhalb der durch den Pegel erfassten Wasseroberfläche liegen. Die Beobachtungen selbst sind im rechten Bereich der Abb. 12 jeweils als Aufriss zusammen mit der am Pegel erfassten Wasserspiegelhöhe dargestellt.

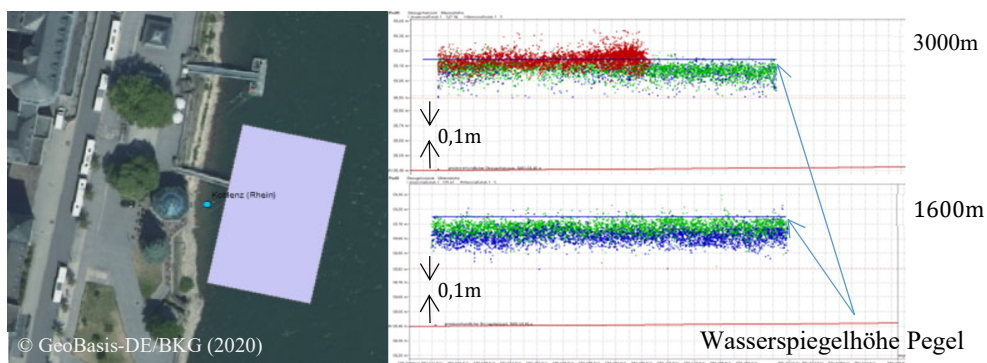


Abb. 12: Erfassung der Wasserspiegelhöhe am Pegel Koblenz

Die Ergebnisse sind exemplarisch für drei Pegel in Tabelle 2 dargestellt. Weiterführende Auswertungen sind erst dann möglich, wenn die finalen Daten durch den Auftragnehmer bereitgestellt werden.

Tab. 2: Abweichung zwischen den mittleren SPL100 Beobachtungen und Pegeldata

| Pegel       | Gebiet | Flughöhe<br>[m ü.G.] | Wasserspiegelhöhe [m] |        | Abweichung (Soll-Ist) |        |
|-------------|--------|----------------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
|             |        |                      | Pegel                 | SPL100 | Mittel                | Stabw. |
| Heringsnase | C      | 800                  | 67,27                 | 67,18  | 0,09                  | 0,03   |
| Oberwesel   | C      | 800                  | 67,81                 | 67,75  | 0,06                  | 0,03   |
| Koblenz     | A      | 1600                 | 59,20                 | 59,13  | 0,07                  | 0,04   |
| Heringsnase | C      | 2500                 | 67,29                 | 67,25  | 0,04                  | 0,05   |
| Oberwesel   | C      | 2500                 | 67,85                 | 67,81  | 0,04                  | 0,04   |
| Koblenz     | A      | 3000                 | 59,20                 | 59,13  | 0,07                  | 0,04   |

### 3 Fazit & Ausblick

Aufgrund der bisher vorliegenden Beobachtungen zeigt sich, dass der Leica SPL100 über ein großes Potenzial verfügt. Die ersten vorliegenden Rohdaten zeigen, dass die Erfassung trockener Flächen auch aus großen Höhen möglich ist. Die Messpunktdichte zeigt, dass auch auf Wasserflächen genügend Echos vorhanden sind. Inwieweit es sich dabei um Volumenrückstreuer im Wasser bzw. um Wasseroberflächenreflexionen handelt, kann zum bisherigen Stand nicht näher betrachtet werden. Es zeigt sich aber, dass die oberen 5% der Beobachtungen sich bis auf wenige cm den zeitgleich erfassten Pegelbeobachtungen annähern. Weiterführende Auswertungen diesbezüglich mit den finalen Daten sind Gegenstand künftiger Arbeiten. Erst dann ist eine abschließende Bewertung zur Vollständigkeit und Genauigkeit der Erfassung der Wasseroberfläche möglich.

Die Möglichkeiten des Scanners in Bezug auf die topografische Erfassung trockener Flächen scheinen sehr groß zu sein. Aus den größten Flughöhen streuen benachbarte Beobachtungen auf Sand- und Kiesflächen nur innerhalb weniger Zentimeter, wobei bei den zugrundeliegenden Daten keine vertikale Anpassung und kein Streifenabgleich durchgeführt wurden. Es ist daher zu erwarten, dass die später erfolgenden Genauigkeitsanalysen zu positiven Ergebnissen führen. MANDLBURGER et al (2019) haben für denselben Sensor im Vergleich zu konventionellem, wellenform-basierten Laserscanning eine Abhängigkeit des Genauigkeitsverhaltens von der Oberflächenneigung und -beschaffenheit festgestellt. Während die Single Photon LiDAR Technologie im Allgemeinen und der SPL100 im Speziellen bei horizontalen Flächen eine hohe Präzision aufweist, nimmt im Vergleich zu wellenform-basiertem Laserscanning größerer Neigung (z.B. Hausdächer) stärker ab. Die bisherigen Eindrücke bestätigen das geringe Messrauschen auf horizontalen Flächen.

Obwohl es sich bei dem Scanner um einen topografischen Laserscanner handelt, weist dieser dennoch eine gewisse bathymetrische Leistungsfähigkeit auf. Zum Zeitpunkt der Befliegung war der Rhein relativ klar bzw. die Sichttiefen mit ~1,4 m relativ groß. Augenscheinlich ergeben sich aus den Querprofilen Eindringtiefen von etwa der einfachen Sichttiefe. Mit den finalen Aussagen ist im Verlauf des Jahres zu rechnen.

### 4 Literaturverzeichnis

- WSV 2014: Der frei fließende Rhein - Relevante Niedrig- und Mittelwasserstände, Report der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes
- DEGNAN, J., 2016: Scanning, Multibeam, Single Photon Lidars for Rapid, Large Scale, High Resolution, Topographic and Bathymetric Mapping. *Remote Sensing* **8**(11), 923-958.
- DEGNAN, J., 2018: Arborne And Spaceborne Single Photon 3D Imaging Lidars. In *Proceedings of 21<sup>st</sup> International Workshop on Laser Ranging*, Canberra, Australia.
- BUND/LÄNDER ARBEITSGEMEINSCHAFT WASSER (LAWA), MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT BADEN-WÜRTTEMBERG, 2018: Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch, Kulturbuch-Verlag GmbH
- LEICA, 2020: Datenblatt des Seica SPL100 Single Photon LiDAR Sensors. <https://leica-geosystems.com/products/airborne-systems/topographic-lidar-sensors/leica-spl100>.

- MANDLBURGER, G. & JUTZI B., 2018: Feasibility investigation on Single Photon Lidar based water surface mapping. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **IV-1**, 109-116.
- MANDLBURGER, G. & JUTZI, B., 2019: On the Feasibility of Water Surface Mapping with Single Photon LiDAR. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **8**(188), 1-23.
- MANDLBURGER, G., LEHNER, H. & PFEIFER, N., 2019: A Comparison of Single Photon and Full Waveform LiDAR. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **IV-2/W5**, 397-404.
- PFEIFER, N., MANDLBURGER, G., OTEPKA, J. & KAREL, W., 2014: OPALS – A framework for airborne laser scanning data analysis. *Computers, Environment and Urban Systems* **45**, 125-126.
- WEIß, R. & SUDAU A., 2012: Geodätische Aspekte von Höhen und Höhenänderungen der Pegel und Pegelfestpunkte im Küstenbereich, *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung (HyWA)* HW 56, Heft 5.