

Genauigkeits- und Performanceuntersuchung eines neuen bathymetrischen UAV-Laserscanners

GOTTFRIED MANDLBURGER^{1,2}, MARTIN PFENNIGBAUER³ & ROLAND SCHWARZ³

Zusammenfassung: Durch fortschreitende Sensorminiaturisierung sind mittlerweile bathymetrische Scanner mit einem Gesamtgewicht von etwa 10 kg verfügbar, welche auf wendigen bemannten Plattformen (Helikopter, Gyrokopter) oder auf unbemannten Flugsystemen betrieben werden können. Einer der ersten UAV-tauglichen topo-bathymetrischen Laserscanner ist der RIEGL VQ-840-G. In diesem Beitrag stellen wir das Sensorkonzept des Scanners vor und präsentieren eine erste, objektive Genauigkeits- und Performanceuntersuchung. Dazu wurde Ende August 2019 ein 500 m langer Abschnitt des Pielach Flusses sowie zwei angrenzende Schotterteiche erfasst. Die Datenerhebung erfolgte aus einer Flughöhe von 50-75 m mit Puls-wiederholraten von 50-100 kHz. Anhand terrestrischer Kontrollmessungen konnte eine absolute Höhengenaugigkeit von <10cm und eine Tiefenmessperformance von mehr als der 2-fachen Secchi-Tiefe nachgewiesen werden. UAV-basierte bathymetrische Laserscanner eignen sich daher für die präzise Erfassung kleinerer Gewässer und ermöglichen vielfältige Anwendungen wie etwa Gefahrenzonenplanung, Habitatmodellierung und Monitoring von Morphodynamik.

1 Einleitung

Während sich UAV-basiertes Laserscanning für die Ableitung von sehr dichten und präzisen 3D Punktwolken im Topografiebereich bereits seit einigen Jahren etabliert hat (RESOP et al. 2019), sind entsprechend kompakte Scanner für bathymetrische Zwecke bis dato kaum verfügbar. Erste Schritte hin zur Erfassung von Gewässertiefen mittels LiDAR (Light Detection and Ranging) konnten in letzter Zeit durch die Einführung eines bathymetrischen Laserdistanzmessers mit konstanter Strahlachse beobachtet werden, welcher Gewässervermessung mittels Querprofilen erlaubt (MANDLBURGER et al. 2016). Eine effiziente und flächenhafte Erfassung erfordert aber ein scannendes System. Durch fortschreitende Sensorminiaturisierung sind mittlerweile auch bathymetrische Scanner mit einem Gesamtgewicht von etwa 10 kg verfügbar, welche auf wendigen bemannten Plattformen (Helikopter, Gyrokopter) oder auch auf unbemannten Flugsystemen (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) betrieben werden können (ASTRALiTE 2020; FUGRO 2020).

Bei allen bathymetrischen LiDAR Sensoren wird Laserstrahlung im grünen Bereich des elektromagnetischen Spektrums eingesetzt (GUENTHER et al. 2000). Bei Laserstrahlung im sichtbaren grünen Bereich ist beim Betrieb des Lasers auf Augensicherheit zu achten. Aus diesem Grund weisen bathymetrischen Laserscanner meist eine relativ große Strahldivergenz von 1-5 mrad auf,

¹ TU Wien, Department für Geodäsie and Geoinformation, Wiedner Hauptstr. 8-10, A-1040 Wien, Österreich, E-Mail: gottfried.mandlbürger@geo.tuwien.ac.at

² Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: gottfried.mandlbürger@ifp.uni-stuttgart.de

³ Riegl Research Forschungsgesellschaft mbH, A-3580 Horn, Österreich, E-Mail: [martin.pfennigbauer, roland.schwarz@riegl.com]

was bei typischen Flughöhen von 500 m über Grund einem Durchmesser des Abtastflecks am Boden von 0.5-2.5 m entspricht. Folglich ist die räumliche Auflösung auch bei modernen topo-bathymetrischen Sensoren mit hoher Pulswiederholrate und geringem Messpunktstand durch den verhältnismäßig großen Laserfootprint beschränkt.

Ein wesentlicher Vorteil der Integration Bathymetrie-tauglicher, grüner Laserscanner auf UAV ist die geringere Messdistanz. Bei einer Flughöhe von 50 m und einer Strahldivergenz von 2 mrad beträgt der Durchmesser des Laserfootprints lediglich 10 cm. Dies bringt deutliche Vorteile für die Erfassung von Detailstrukturen wie etwa von Blöcken in Fließgewässern. Als Anwendungsbereiche sind detaillierte Überflutungssimulationen, Monitoring von Geschiebetransport, Modellierung aquatischer Habitate, etc. zu nennen. Da der Einsatz von Laserbathymetrie durch die Gewässertrübung eingeschränkt ist, eignet sich diese Technik bei Binnengewässern vor allem bei klaren, alpinen Flüssen. Diese weisen i.d.R. moderate Gewässerbreite und oftmals einen mäanderförmigen Verlauf auf, weshalb gerade für diese Anwendungsfälle der Einsatz UAV-basierter Messplattformen besonders vorteilhaft ist.

Einer der ersten UAV-tauglichen topo-bathymetrischen Laserscanner ist der *RIEGL VQ-840-G* (RIEGL 2020). Zur Überprüfung der Performance des Messsystems mit Hinblick auf erzielbare Eindringtiefe, räumliches Auflösungsvermögen und Genauigkeitspotenzial wurde im August 2019 eine Messkampagne an der Pielach, einem voralpinen Fluss in Niederösterreich, durchgeführt (MANDLBURGER et al. 2015; MANDLBURGER et al. 2016). Neben der UAV-basierten Datenerfassung erfolgte dabei auch die geodätische Einmessung von im Fluss und einem angrenzenden Schotterteich versenkten Zieltafeln mittels RTK-GNSS und Tachymetrie. Auf Basis dieser Referenzmessungen können objektive Aussagen zur Genauigkeit und Performance des Sensorsystems gemacht werden.

In diesem Beitrag stellen wir das Sensorkonzept und die Ergebnisse der Performanceuntersuchung vor. Der weitere Beitrag ist wie folgt strukturiert: In Abschnitt 2 werden das Sensorkonzept und die technischen Daten des kompakten Laserbathymetriescanners beschrieben. Abschnitt 3 behandelt das Untersuchungsgebiet und die zugrundeliegenden Auswertemethoden. Die Präsentation und Diskussion der Ergebnisse der Datenevaluierung erfolgt im Abschnitt 4. Abschnitt 5 beschließt den Beitrag mit einer Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse.

2 Sensorkonzept

Der VQ-840-G ist ein voll integriertes Laserscannersystem zur luftgestützten Erfassung von Topographie und Bathymetrie. Der Sensor besteht aus dem Laserscanner, einer integrierten Navigationseinheit, sowie optional einer RGB Kamera. Die Distanzmessung basiert auf dem Impulslaufzeitverfahren unter Verwendung von vergleichsweise kurzen Laserpulsen im sichtbaren, grünen Bereich des elektromagnetischen Spektrums ($\lambda=532$ nm). Der Scanner weist eine benutzerdefinierbare Strahldivergenz von 1-6 mrad auf, was bei einer nominellen Flughöhe von 75 m einem Durchmesser des Abtastflecks am Boden von 7.5-45 cm entspricht. Für die 6 mrad Strahldivergenz beträgt die nominelle und erweiterte augensichere Distanz (NOHD/ENOHD) des Klasse 3B Lasers 15 m bzw. 75 m. Die Pulsrepetitionrate kann zwischen 50-200 kHz gewählt werden, was für UAV-basierten Betrieb einer typischen Punktdichte von mehr als 100 Punkten/m² entspricht. Das Scanmuster am Boden ist nahezu elliptisch (Palmer Scanner) mit einem Winkel zwischen

Laserstrahl und Nadir-Richtung von $\pm 20^\circ$ quer zur Flugrichtung sowie $\pm 14^\circ$ entlang der Trajektorie. Bei einer Flughöhe über Grund von 75 m führt dies zu einer Streifenbreite von 55 m. Laut Herstellerangabe beträgt die maximale Eindringtiefe bei einer Pulswiederholrate von 50 kHz die zweifache Secchi-Tiefe. Die absolute Genauigkeit ist mit 20 mm angegeben. Damit ist der Scanner vor allem für die Erfassung von mittelgroßen Flüssen mit klarem Wasser geeignet.

Neben der Strahldivergenz ist auch das Gesichtsfeld (engl. instantaneous Field of View, iFoV) des Empfängers veränderbar. Bei konventionellen LiDAR Sensoren entspricht iFoV i. d. R. etwa der 5-fachen Strahldivergenz, sodass die gesamte, diffus in Richtung des Sensors rückgestreute Energie vom Empfänger erfasst wird. In der Laserbathymetrie kommt es durch Volumenstreuung in der Wassersäule allerdings zu einer weiteren Aufweitung des Abtastflecks, welche nicht nur von der Strahldivergenz, sondern von den optischen Eigenschaften des Wassers (Trübe) abhängt. Bei einem relativ engen iFoV besteht daher die Gefahr, dass Anteile des rückgestreuten Gewässerbodensignals nicht vom Detektor erfasst werden. Durch die konfigurierbare Größe des iFoV besteht für den Anwender die Möglichkeit, zwischen besserer räumlicher Auflösung (kleines iFoV) und potenziell größerer Erfassungstiefe (großes iFoV) zu wählen.

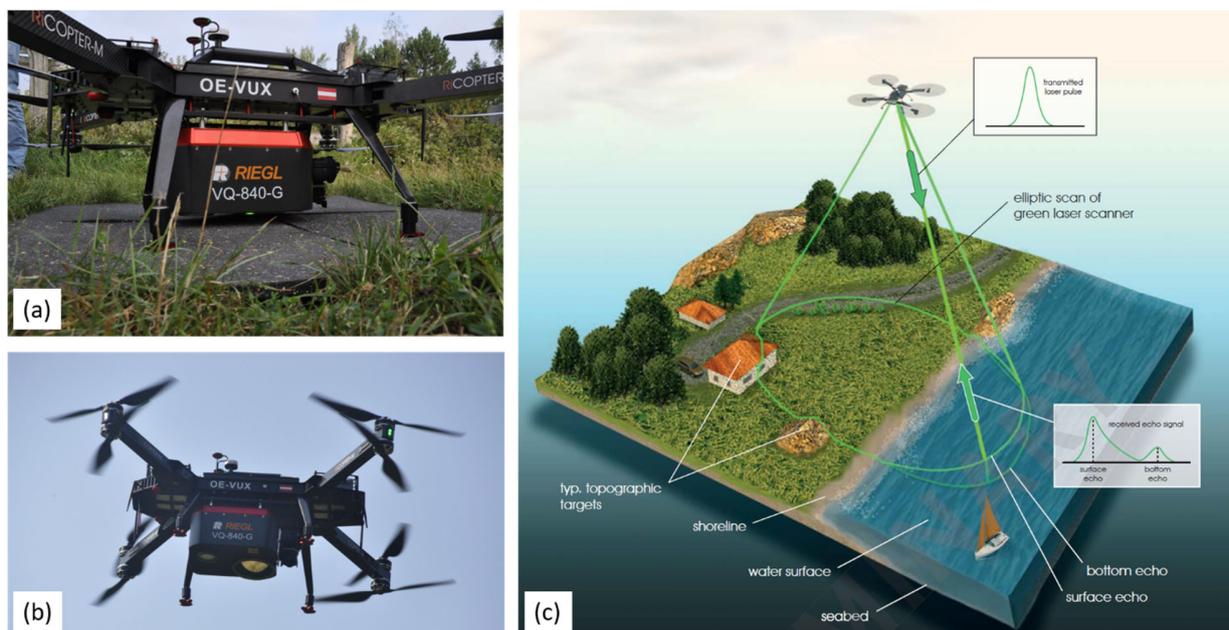


Abb. 1: UAV-basiertes topo-bathymetrisches Laserscansystem (RiCOPTER+VQ-840-G) vor dem Start am Boden (a) und in der Luft (b); (c) Prinzipskizze der UAV-basiert, topo-bathymetrische Datenerfassung

Abb. 1a und b zeigen das Sensorsystem montiert auf einer Oktokopter UAV Plattform (RiCOPTER-M), wobei bei der gezeigten Installation eine Sony 7R RGB Kamera neben dem topo-bathymetrischen Laserscanner zum Einsatz kam. Abb. 1c veranschaulicht in Form einer Prinzipskizze das elliptische Scanmuster (Palmer Scanner) sowie die simultane Erfassung von Topographie und Bathymetrie basierend auf Online-Wellenformprozessierung (PFENNIGBAUER et al. 2014). Die wesentlichen Sensorparameter sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Wesentlichen Sensorparameter des topo-bathymetrischen Scanners

Pulsrepetitionsrate (PRR)	≤ 200 kHz
Scanrate (Scankreisfrequenz)	10-100 Hz
Scanwinkel quer/längs zum Flugpfad	± 20° / ±14°
Strahldivergenz	1-6 mrad
Größe des Abtastflecks bei Flughöhe 50/100 m	5-30 cm /10-60 cm
Empfängergesichtsfeld (iFOV)	3-18 mrad
Größe (Länge x Breite x Höhe)	360 mm x 285 mm x 200 mm
Masse	12 kg
Leistungsaufnahme	160 W
Eindringtiefe in Vielfachen der Secchi-Tiefe	1.7@200 kHz, 2.0@50 kHz, 2.5@0.5 kHz
Präzision/Genauigkeit (Scanner)	15 mm / 20 mm

3 Untersuchungsgebiet und Auswertemethoden

3.1 Datenerfassung

Zur Evaluierung der Genauigkeit und Tiefenmessperformance des bathymetrischen UAV-Laserscanners, wurde am 27.08.2019 eine Datenerfassung im Bereich der Neubacher Au, Niederösterreich, durchgeführt (siehe Abb. 2). Dabei wurden mehrere Grundwasser-gespeiste Teiche und ein Abschnitt des Pielach Flusses aus unterschiedlichen Flughöhen und mit variierenden Scanner-Einstellungen aufgenommen. Die Pielach ist ein vor-alpiner Schotterfluss mit einem mittleren Durchfluss von 7 m³/s. Das Untersuchungsgebiet ist Teil des Natur2000 Schutzgebietes „Niederösterreichische Voralpenflüsse“ und ist in MANDLBURGER et al. (2015) sowie MANDLBURGER et al. (2016) detailliert beschrieben.

Als Flugplattform diente ein Oktokopter mit maximalem Startgewicht von 35 kg (RICOPTER-M). Zeitgleich zu den Laserscans wurden RGB Nadir-Luftbilder mit einer Sony 7R Kamera aufgenommen. Zur Georeferenzierung des Bildblocks wurden Schachbretttafeln (Abb. 3a) installiert und mittels RTK GNSS eingemessen. Zur Überprüfung der maximal erreichbaren Messtiefe wurden vier 1x1 m² große Metallplatten in 1-3 m Tiefe in einem der Teiche versenkt (Secchi Tiefe: 1.35 m; Abb. 3b). Die Evaluierung der Unterwasser-Messgenauigkeit erfolgte anhand von 20 kreisförmigen Scheiben mit Schachbrettmuster, die in einer Tiefe von 0.5-2 m im Flussgrund entlang eines quer über den Fluss gespannten Seils verankert wurden (Abb. 3c und d). In Abb. 3d sind darüber hinaus zwei Satteldach-förmige Schalttafeln zu sehen, die zur absoluten Orientierung des Laserblocks eingesetzt wurden. Die Einmessung der Passpunkte, Passflächen und Kontrollpunkte erfolgte mit einer Leica TS16 Totalstation (Abb. 3e). Die beiden Detailuntersuchungsgebiete zur Überprüfung der Messgenauigkeit und der Tiefenmessperformance sind in Abb. 2 mit halbtransparenten weißen Rechtecken markiert.

Zum Zeitpunkt der Datenaufnahme war die Trübung in den erfassten Gewässern sehr hoch. Während die Trübung in den stehenden Gewässern durch das Aufwühlen der Schlammschicht am Boden der Teiche zurückzuführen ist, wurde diese im Flusslauf durch gelöste Sedimente infolge eines Starkregenereignisses in den Tagen vor der Messkampagne verursacht. Die Secchi-Tiefe betrug demnach in den Teichen 1.35 m und im Fluss ca. 1.0 m. Wie im Abschnitt 4 gezeigt werden wird, hat die Trübung nicht nur Auswirkungen auf die maximale Messtiefe, sondern auch auf die erzielbare

Messgenauigkeit. Während in einem Produktionsumfeld bei derartigem hydrologischen Zustand auf eine Datenerfassung mit optischen Methoden verzichtet werden würde, stellen die ungünstigen Bedingungen für das vorliegende Experiment gerade eine interessante Grundlage dar.

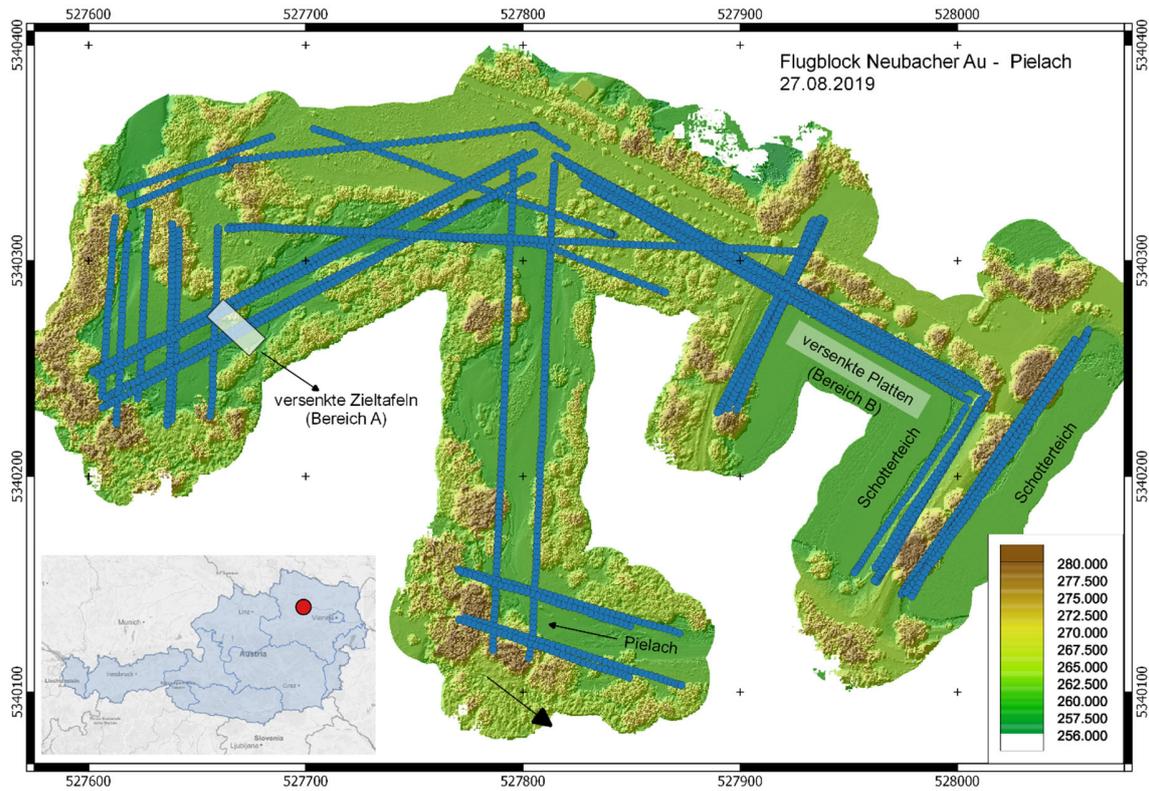


Abb. 2: Untersuchungsgebiet Neubacher Au – Pielach, Bildhintergrund: Laser Höhenmodell (Schummierung überlagert mit farbkodierter Höhenkarte), Flugpfade (blaue Kreise), weiße Rechtecke: Detailgebiete für Untersuchung der Messgenauigkeit (A) und Eindringtiefe (B); links unten: Übersichtskarte Österreich mit markierter Lage des Untersuchungsgebiets (Daten: openstreetmap und geoland.at)

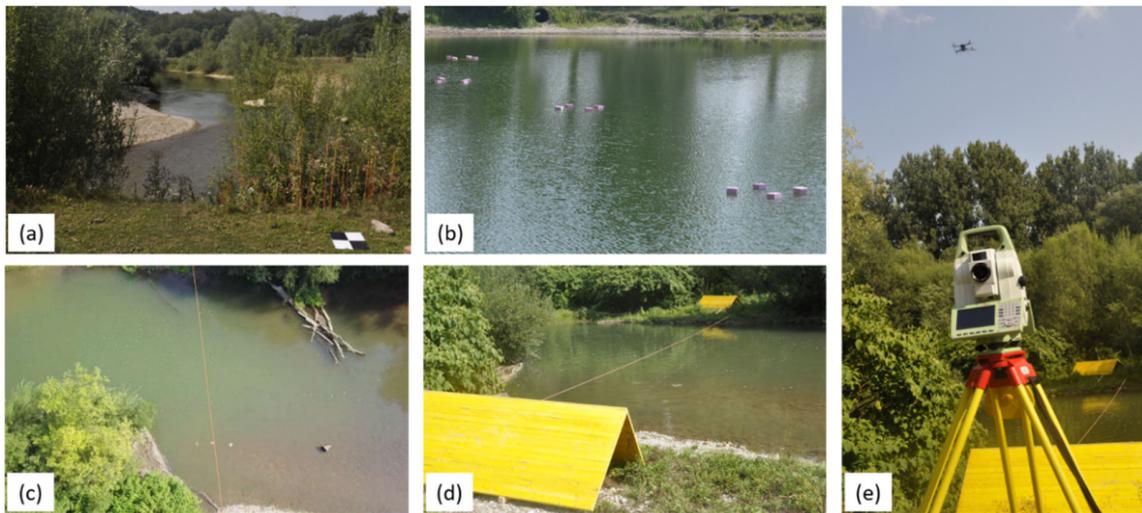


Abb. 3: Photodokumentation der Messkampagne Neubacher Au am 27.08.2019: (a) Pielach Flusslauf mit Passpunkt (Schachbretttafel) im Vordergrund, (b) Versenkte Metallplatten (Styropor Schwimmkörper) an der Wasseroberfläche sichtbar, (c) Detailgebiet für Genauigkeitsuntersuchung (UAV-Photo), versenkte kreisrunde Zieltafeln in drei Reihen entlang eines quer über den Fluss gespannten Seils angeordnet, (d) Satteldach Passflächen (an beiden) Flussufern zur absoluten Orientierung des Laserblocks, (e) Tachymeter für Eimessung der Referenzpunkte während der UAV-Datenerfassung

3.2 Auswertestrategie

Die Auswertung der UAV-basierten Laserdatenerfassung erfolgte weitgehend mit der wissenschaftlichen Laserscanning Software OPALS (PFEIFER et al. 2015) und umfasste folgende Schritte:

- Auswertung der RTK-GNSS-basierten Passpunktmessung und der tachymetrischen Aufnahme der Referenzpunkte (LEICA 2020).
- Bündelblockausgleichung aller aufgezeichneten Luftbilder und Berechnung eines digitalen Orthophotos in Pix4DMapper (PIX4D 2020). Absolute Orientierung des Bildblocks basierend auf photogrammetrischen Schachbrett Passpunkten.
- Post-processing der Flugtrajektorie (APPLANIX 2020) unter Zuhilfenahme der im Messgebiet stationierten permanenten GNSS Basisstation.
- Auswertung der Laserechos (Wellenformanalyse) und direkte Georeferenzierung der Messdaten (RiProcess).
- Feingeoreferenzierung der UAV-Flugstreifen mittels rigoroser Streifenausgleichung (GLIRA et al. 2015; GLIRA et al. 2016). Absolute Orientierung der Flugstreifen basierend auf Schachbrett Passpunkten und Passflächen
- Bestimmung der Wasseroberfläche: Näherungsweise Bestimmung der Wasserspiegellage über interaktives Editiertool in qpals (QGIS plugin für OPALS), Feinmodellierung durch Segmentierung der potenziellen Wasseroberflächenpunkte und robuste Interpolation eines digitalen Wasseroberflächenmodells (DWM).
- Refraktionskorrektur der rohen Laserscandaten durch Anbringung der Winkel- und Laufzeitkorrektur für Laserechos unter der Wasseroberfläche gemäß dem Brechungsgesetz von Snellius (MANDLBURGER et al. 2015).

Darauf aufbauend wurden Genauigkeit, Tiefenmessperformance und räumliche Auflösung wie folgt evaluiert:

- Ermittlung der relativen Streifenhöhendifferenzen zwischen den einzelnen Flugstreifen getrennt für Land- und Wasserbereiche anhand von streifenweisen digitalen Höhenmodellen (DHM) interpoliert als 0.1 m Raster aus der Laserpunktwolke (letzte Echos) mittels gleitender Schrägebeneninterpolation (RESSL et al. 2008).
- Ermittlung der absoluten Abweichungen zwischen Laserpunktwolke und Referenzpunkten an Land und Unterwasser. Dazu wurden in einer sphärischen Suchumgebung rund um jeden Referenzpunkt alle Laserpunkte extrahiert und eine best anpassende Ebene ermittelt. Die Abweichung wurde schließlich als Vorzeichen-behafteter Normalabstand zwischen Referenzpunkt und Laserpunkt-Ebene berechnet.
- Abschätzung der räumlichen Auflösung der Laserpunktwolke. Neben der theoretischen Abschätzung der räumlichen Auflösung basierend auf Strahldivergenz und Flughöhe sowie dem Messpunkt Abstand erfolgt auch eine visuell-empirische Überprüfung anhand linearer Objekte (über den Fluss gespanntes Seil) und künstlicher rechter Winkel (Satteldach-Passfläche)
- Ermittlung der effektiven Eindringtiefe anhand der vier, in unterschiedlichen Tiefen versenkten $1 \times 1 \text{ m}^2$ Platten. Dies erfolgt durch Segmentierung der 3D Punktwolke, Selektion aller Laserechos auf den versenkten Platten und Bestimmung einer repräsentativen Höhe/Wassertiefe pro erfolgreich detektierter Messplatte und Gegenüberstellung mit den Referenztiefmessungen bzw. der vor Ort gemessenen Sichttiefe.

4 Ergebnisse und Diskussion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Evaluierung des UAV-basierten topo-bathymetrischen Laserscanners in Form von Abbildungen und Tabellen präsentiert und die daraus gewonnenen Erkenntnisse diskutiert.

4.1 Messgenauigkeit

Abb. 4 Streifendifferenzen sind ein Maß für die relative Passgenauigkeit der Flugstreifen. Die vorherrschenden Weißtöne belegen die hohe Relativgenauigkeit des Flugblocks, welche auch aus dem Histogramm der Höhenabweichungen (Abb. 4, links unten) abgelesen werden kann. Die Verteilung ist symmetrisch um den Erwartungswert Null (Mittelwert: +1 mm) und fällt nach links und rechts in Richtung der positiven und negativen Abweichungen steil ab. Die Randquantile Q02/Q98 betragen -24/+25 mm und die robust abgeschätzte Standardabweichung (σ_{MAD}) 9 mm. Wenige im Datensatz verbliebenen Ausreißer (Vegetation) beeinflussen die klassisch aus der Abweichungsquadratsumme aller Höhendifferenzen berechnete Standardabweichung, sind aber für den Flugblock nicht repräsentativ.

Abb. 5 zeigt für das in Abb. 4 mit einem weißen Rechteck gekennzeichnete Detailuntersuchungsgebiet (i) die Streifendifferenzen des trockenen und überströmten Bereichs sowie (ii) die farbkontrollierten Punkt-zu-Ebene-Abweichungen zwischen den tachymetrisch bestimmten Pass- und Kontrollpunkten und den jeweils benachbarten 3D-Laserpunkten. Die absoluten Abweichungen sind darüber hinaus auch in Tab. 2 für ausgewählte Referenzpunkte quantitativ angegeben. Die Punkte

an den im Uferbereich positionierten Satteldach-förmigen Holzplatten wurden für die absolute Orientierung des Flugblocks verwendet und belegen mit einer mittleren Abweichung im mm-Bereich die hohe Qualität des gesamten Sensorsystems (Laserscanner, GNN, IMU), für dessen geometrische Kalibrierung lediglich ein konservatives Modell zur Trajektorienkorrektur (konstanter Offset für X, Y, Z, roll, pitch, yaw pro Streifen) herangezogen wurde (GLIRA et al. 2016). Während die Abweichungen zum großen Teil geringer als ± 1 cm betragen, wird auf die Ursache für die systematisch negativen Differenzen im Bereich der Firstlinien der Satteldachpassflächen (z.B. Punkte 1022, 2010 in Tab. 2) im Abschnitt 4.3 näher eingegangen.

Größere Abweichungen treten hingegen bei den Unterwasser-Kontrollpunkten auf, wobei eine tiefenabhängige Tendenz zu erkennen ist (siehe Abb. 5). Während die Abweichungen für Punkte mit einer Wassertiefe von <1 m nahe Null sind, steigen diese für Punkte in 2 m Wassertiefe auf etwa 7 cm an (vgl. Abb. 5 und Tab. 2). Die Laserpunkte sind dabei tendenziell zu tief.

Tab. 2: Absolute Höhenabweichungen zwischen Laserpunktwolke und Referenzmessungen für ausgewählte Pass- und Kontrollpunkte

Bereich	Punkt	ΔH [m]	Bereich	Punkt	Tiefe [m]	ΔH [m]
Passfläche (W)	1001	-0.006	Uferlinie	110	0.00	0.006
Passfläche (W)	1010	0.008	Fluss	201	0.41	0.004
Passfläche (W)	1019	-0.004	Fluss	202	0.93	-0.027
Passfläche (W)	1022	-0.034	Fluss	204	1.43	-0.066
Passfläche (O)	2002	0.006	Fluss	205	1.88	-0.069
Passfläche (O)	2010	-0.035	Fluss	206	2.10	-0.078

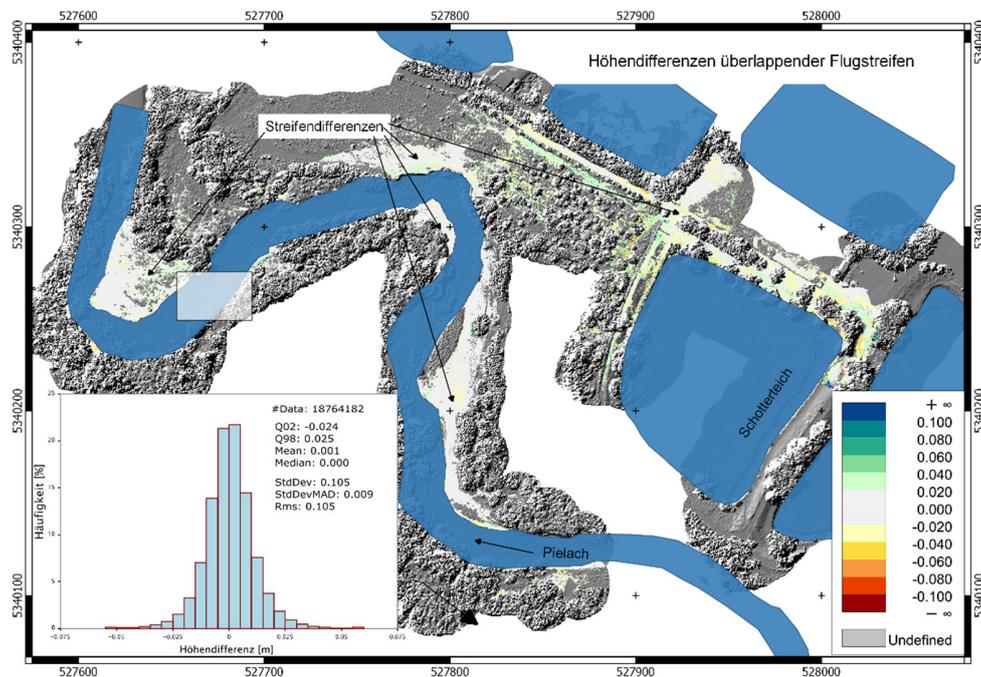


Abb. 4: Mosaik der farbkodierten Höhendifferenzen aller überlappenden Flugstreifen im trockenen Bereich, Bildhintergrund: Wasserflächen (blau) und Höhenmodell-Schummerung; links unten: Histogramm der Höhenabweichungen und statistische Kenngrößen; weißes Rechteck: Detailbereich der Abb. 5

Dieser Trend kann auch aus der in Abb. 6 dargestellten Profildarstellung der 3D-Punktswolke abgelesen werden, in die auch die Referenzpunkte (magenta) eingezeichnet sind. Die in Abb. 5 im südlichen Uferbereich ersichtlichen systematisch positiven Streifenhöhendifferenzen (dunkelgrüne und blaue Bereiche) sind ebenfalls auf den an den Referenzpunkten erkennbaren systematischen Effekt zurückzuführen. Für die Laufzeit- und Brechungskorrektur der rohen Lasermessungen kam der Wert $n_w=1.36$ für den Refraktionsindex zur Anwendung. Bei hypothetischen Versuchen mit größeren Werten für n_w von 1.40-1.42 nehmen die Streifendifferenzen sowie die tiefenabhängige Systematik an den Referenzpunkten noch weiter ab. Der verwendete Wert von $n_w=1.36$ wird durch zum Zeitpunkt der Verfassung des Manuskriptes noch laufende Untersuchungen nahegelegt. Größere Werte für n_w würden den berichteten absoluten Wertebereich von 1.329 bis 1.367 (MOBLEY 1994) aber in jedem Fall überschreiten.

Die Ursache für diese Systematik wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Eine mögliche Erklärung sind Mehrwegeeffekte innerhalb der Wassersäule, die durch komplexe Streuung an Schwebstoffteilchen zustande kommen, und ev. wegen der hohen Trübung zum Zeitpunkt der Messung besonders stark ausfallen. Eine systematische Fehlschätzung der Wasseroberfläche konnte durch Vergleich mit terrestrisch gemessenen Kontrollpunkten am Ufer ausgeschlossen werden.

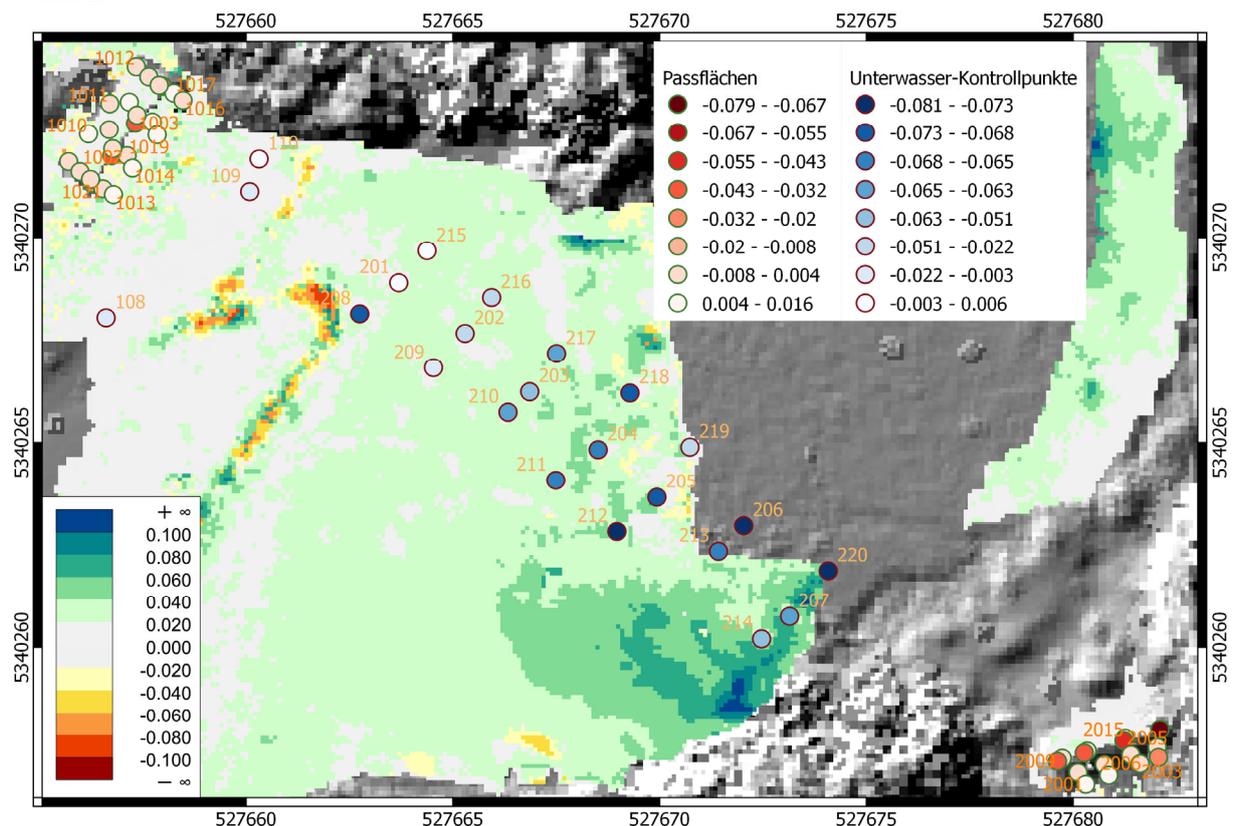


Abb. 5: Streifendifferenzen an Land und unter Wasser, Absolute Höhenabweichungen zwischen Laserpunkten und Passflächenpunkten (rot) bzw. Unterwasser-Kontrollpunkten (blau)

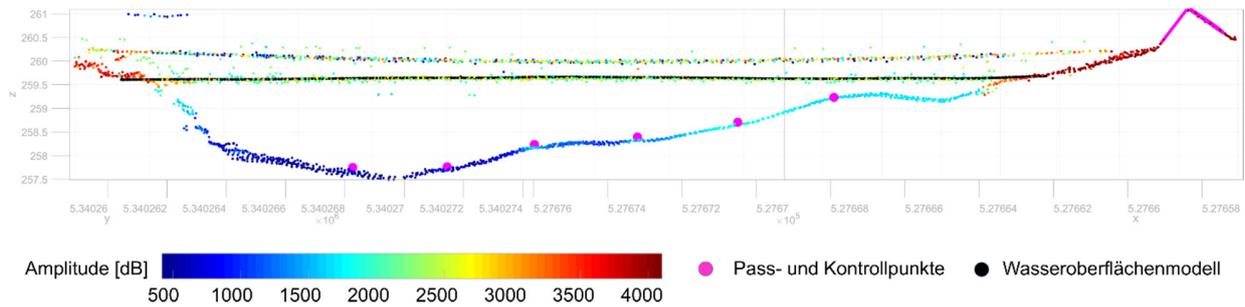


Abb. 6: Profilansicht der refraktionskorrigierten 3D Punktwolke des Streifens 105314 eingefärbt nach Signalamplitude. Magenta: Pass- und Kontrollpunkte, Schwarz: modelliertes Wasseroberflächenmodell

4.2 Tiefenmessperformance

Zur Überprüfung der Tiefenmessperformance wurden in einem der flussnahen Schotterteiche 4 Metallplatten in Tiefen von 1.16 m, 1.99 m, 2.64 m und 3.11 m an Seilen abgesenkt. Abb. 7 zeigt eine Perspektivansicht der jeweiligen 3D Laserpunktwolken für einen ausgewählten Messstreifen, und die numerischen Ergebnisse im Vergleich zu den aus den Seillängen bekannten Wassertiefen sind in Tab. 3 zusammengefasst.

Es kann festgehalten werden, dass die Platten bis zu einer Tiefe von 2.64 m (P3) deutlich in der Punktwolke abgebildet sind (Amplitude P3: 6.8 dB) und lediglich die Platte P4 in 3.1 m Wassertiefe nicht erfasst ist. Bei der für den Teich gemessenen Secchi-Tiefe von 1.35 m beträgt die maximale Messtiefe daher die zweifache Secchi-Tiefe und entspricht damit dem Erwartungswert, der vom Hersteller für die Pulswiederholrate von 50 kHz angegeben ist. Die Abweichungen der aus den Laserpunkten bestimmten Tiefen folgen demselben tiefenabhängigen Trend, der bereits in Abschnitt 4.1 dokumentiert wurde. Bei dem auch hier für die Korrektur verwendeten Refraktionsindex von 1.36 beträgt die Überschätzung der Wassertiefe bei P3 9 cm oder umgerechnet ca. 3%.

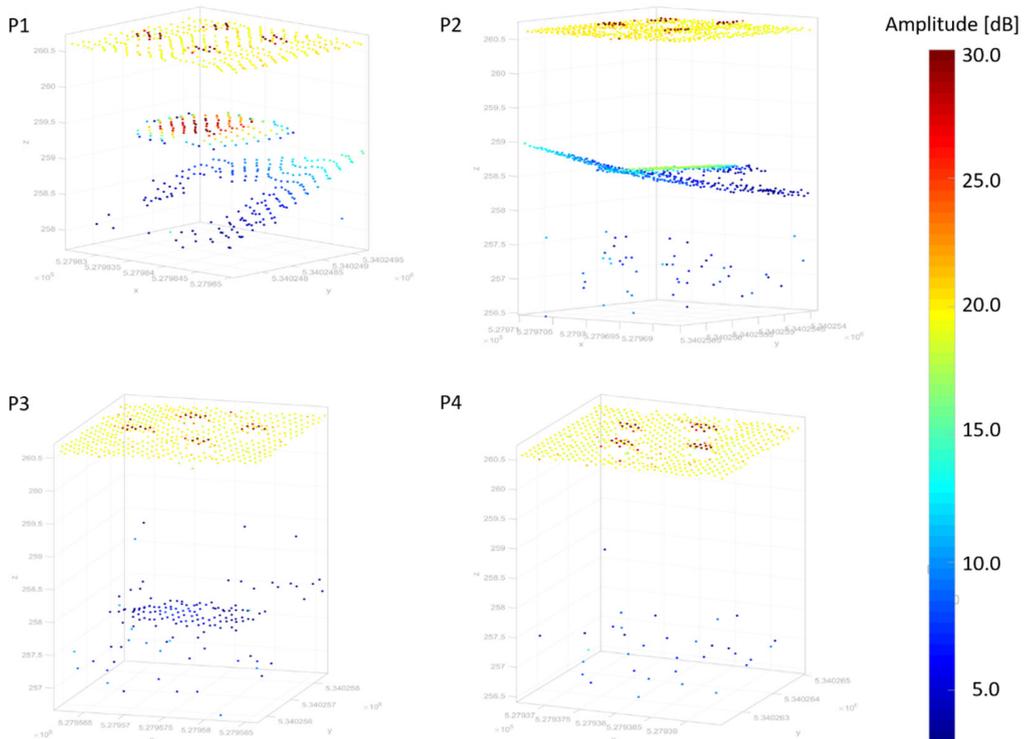


Abb. 7: Perspektivansicht der 3D Punktwolke im Bereich der versenkten Platten P1-P4 eingefärbt nach Signalamplitude

Tab. 3: Soll-Ist-Vergleich der vier abgesenkten Metallplatten

Platte	Soll-Tiefe [m]	Ist-Tiefe [m]	Abweichung [m]	Rel. Tiefe [x Secchi]	Amplitude [dB]
P1	1.16	1.18 ± 0.01	-0.02	0.86	26.8
P2	1.99	2.03 ± 0.02	-0.04	1.47	17.1
P3	2.64	2.73 ± 0.03	-0.09	1,96	6.8
P4	3.11	---	---	---	---

4.3 Räumliche Auflösung

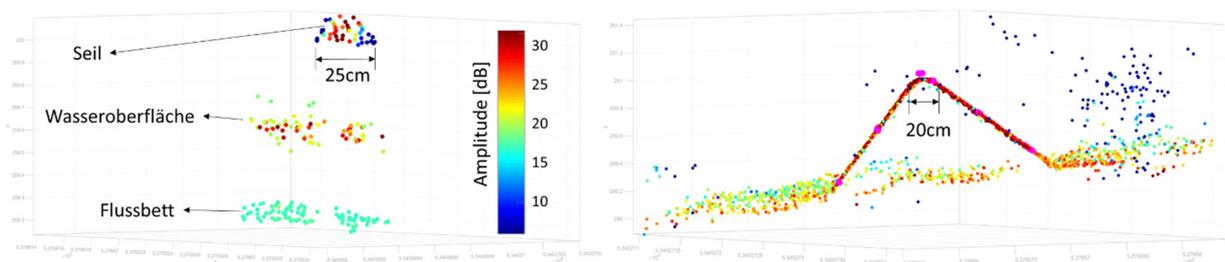


Abb. 8: 3D-Laserpunktwolke des Streifens 105314; (links) Detail im Bereich des gespannten Seils, (b) westliche Satteldach Passfläche, magenta: terrestrische Referenzpunkte

Wie im Abschnitt 3.1 ausgeführt, erfolgte die Datenerfassung aus einer Flughöhe von 50-75 m über Grund mit einer Strahldivergenz von 2 mrad. Die im Datenblatt des Herstellers angegebene Strahldivergenz bezieht sich dabei auf einen Abfall der Pulsamplitude auf $1/e^2$ des Maximalwertes. Daraus errechnet sich ein theoretischer Durchmesser des Laserfootprints von 10-12.5 cm. Bei einer Pulswiederholrate von 50 kHz beträgt die mittlere Punktdichte im Einzelstreifen bei 50 m Flughöhe etwa 300 Punkte/m², was einem Punktabstand von ca. 6 cm entspricht. Die räumliche Auflösung jedes Laserscanningsystems ist durch den größeren der beiden Werte (Footprintdurchmesser, Punktabstand) begrenzt und beträgt damit für das angegebene Szenario 10 cm.

Diese theoretische Auflösung wurde für den Streifen 105314 durch visuelle Kontrolle der Punktwolke in einem 3D-Editor überprüft. Dieser Streifen wurde mit den in der obigen Abschätzung angegebenen Parametern befliegen (h=50 m über Grund, Strahldivergenz=2 mrad, PRR=50 kHz). Abb. 8 zeigt zwei repräsentative Ausschnitte, die Rückschlüsse auf die effektive Auflösung erlauben. Die Abbildung enthält links den Bereich des quer über den Fluss gespannten Seils und rechts die Satteldach-förmige Holzplattenkonstruktion, die im Firstbereich einen rechten Winkel bildet. Dabei ist klar zu erkennen, dass (i) die Punktwolke entlang des Seils nicht streng linear sondern bandförmig ist (Breite des Bandes: 25cm) und (ii) der rechte Winkel der beiden Holzplatten in der Punktwolke zu einem Kreis mit einem Durchmesser von ca. 20 cm abgerundet ist. Aufgrund der großen Punktdichte kann der effektive Footprintdurchmesser anhand des linear verlaufenden Seils direkt abgelesen werden. Da die Empfindlichkeit des Sensors weit größer als 8.7 dB ist, was der Definition des nominalen Strahldurchmessers ($10 \log(e^2)$) entspricht, empfängt dieser auch außerhalb des nominellen Footprints Signale, die auch zu detektierten Echos führen. Deutlich ist auch der Amplitudenabfall von der Mitte des Bandes (rot: 25-30 dB) zum Rand hin (blau: <10 dB) zu erkennen, entsprechend dem Anteil der Seilstrecke innerhalb des Gesichtsfeldes des Empfängers. Der größere effektive Footprintdurchmesser ist auch der Grund für die Abrundung des rechten Winkels in der rechten Abbildung.

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurden einerseits das Konzept und andererseits eine Untersuchung der Genauigkeit und Tiefenmessperformance des topo-bathymetrischen Laserscanners *RIEGL VQ-840-G* vorgestellt. Mit einem Gesamtgewicht von 12 kg eignet sich der Sensor für die Integration auf größere Multikopter-UAV Plattformen, wodurch ein flexibler Einsatz für die Erfassung kleiner bis mittelgroßer Gewässer mit moderater Wassertiefe als Alternative zur klassischen flugzeugbasierten Laserbathymetrie gegeben ist. Der Klasse 3B Laser operiert mit grünem Licht ($\lambda=532$ nm), weist eine Pulsrepetitionrate von 50-200 kHz, eine Strahldivergenz von 1-6 mrad und ein Empfängergesichtsfeld von 6-18 mrad auf. Bei einer Flughöhe von 50 m beträgt die Punktdichte damit etwa 100-400 Punkte/m² und der Durchmesser des Abtastflecks 5-30 cm.

Zur Evaluierung des Laserscanners wurde im August 2019 eine Messkampagne an der Pielach im Bereich Neubacher Au (Niederösterreich) durchgeführt. Neben der UAV-basierten Laserdatenerfassung wurden auch Pass- und Kontrollpunkte im trockenen und benetzten Bereich installiert und mittels RTK-GNSS bzw. Totalstation terrestrisch vermessen. Gegenüber diesen Referenzpunkten ergab sich eine absolute Höhenabweichung an Land von 1 cm und Unterwasser von 0-8 cm. Bei den bathymetrischen Kontrollpunkten konnte ein tiefenabhängiger Fehler festgestellt werden. Die

Erforschung der Ursache für diesen systematischen Effekt ist Gegenstand laufender Untersuchungen.

Anhand von vier in unterschiedlichen Tiefen angeordneten $1 \times 1 \text{ m}^2$ großen Metallplatten konnte die vom Hersteller angegebene 2-fache Secchi-Tiefe als maximale Eindringtiefe bestätigt werden. Eine vierte, in 2.3-facher Secchi-Tiefe installierte Platte konnte dagegen in der Punktwolke nicht identifiziert werden. Es besteht aber die Erwartung, dass die Eindringtiefe durch Mittelung von räumlich/zeitlich benachbarten Wellenformen weitere erhöht werden kann. Die erzielte 2-fache Secchi-Tiefe stellt aber bereits jetzt eine Steigerung gegenüber topo-bathymetrischer Datenerfassung vom bemannten Flugzeug aus dar, wo die Eindringtiefe eher bei der 1.5-fachen Secchi-Tiefe liegt.

Weitere Vorteile der UAV-basierten Erfassung sind die hohe Punktdichte und der in Folge der geringeren Messdistanz wesentlich kleinere Footprintdurchmesser. Entsprechende Untersuchungen der planimetrischen Auflösung haben ergeben, dass trotz geringem Messpunktstand und geringer Strahldivergenz, die effektive Auflösung etwa um einen Faktor 2 geringer ist, als von der im Datenblatt angegebenen Strahldivergenz her zu erwarten war. Bei zwei im rechten Winkel zu einander positionierten Holzflächen wies die 3D Punktwolke eine etwa halbkreisförmige Ausrundung mit einem Durchmesser von ca. 20 cm auf.

Generell kann festgehalten werden, dass sich der Sensor durch die hohe Genauigkeit sowie die gute Tiefenmessperformance für vielfältige Aufgaben im Bereich der präzisen Erfassung von Gewässern mit moderater Tiefe und Ausdehnung eignet, z.B. als Grundlage für Überflutungssimulationen, Monitoring von fluvialen Veränderungen, Habitatmodellierung und dergleichen mehr.

6 Danksagung

Die Arbeiten von Gottfried Mandlbürger zu diesem Beitrag wurden durch Mitteln der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) im Rahmen des Forschungsprojektes „Bathymetrievermessung durch Fusion von Flugzeuglaserscanning und multispektralen Luftbildern“ unterstützt.

7 Literaturverzeichnis

- APPLANIX, 2020: Homepage Applanix POSPac. <https://www.applanix.com/products/pospac-mms.htm>.
- ASTRALiTE, 2020: Homepage der ASTRALiTe Inc. <https://www.astralite.net>.
- FUGRO, 2020: Homepage des Fugro Rapid airborne multibeam mapping system (RAMMS). <https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/innovations/rapid-airborne-multibeam-mapping-system>.
- GLIRA, P., PFEIFER, N., BRIESE, C. & RESSL, C., 2015: Rigorous strip adjustment of airborne laserscanning data based on the ICP algorithm. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-3/W5, 73-80.
- GLIRA, P., PFEIFER, N. & MANDLBURGER, G. 2016. Rigorous Strip Adjustment of UAV-based Laserscanning Data Including Time-Dependent Correction of Trajectory Errors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 82(12), 945-954.

- GUENTHER, G.C., CUNNINGHAM, A.G., LAROQUE, P.E. & REID, D.J., 2000: Meeting the accuracy challenge in airborne lidar bathymetry. In: Proceedings of the 20th EARSeL Symposium: Workshop on Lidar Remote Sensing of Land and Sea, Dresden.
- LEICA, 2020: Homepage Leica Auswertesoftware. <https://leica-geosystems.com/de-at/products/total-stations/software>.
- MANDLBURGER, G., HAUER, C., WIESER, M., & PFEIFER, N., 2015: Topo-Bathymetric LiDAR for Monitoring River Morphodynamics and Instream Habitats—A Case Study at the Pielach River. *Remote Sens.* 7(5), 6160-6195, <https://doi.org/10.3390/rs70506160>.
- MANDLBURGER, G., PFENNIGBAUER, M., WIESER, M., RIEGL, U. & PFEIFER, N., 2016: Evaluation of a novel UAV-borne topo-bathymetric laser profiler. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 41(B1), 933 - 939.
- MOBLEY, C. D., 1994: *Light and Water: Radiative Transfer in Natural Waters*. San Diego, CA: San Diego Academic Press.
- PFENNIGBAUER, M., WOLF, C., WEINKOPF, J. & ULLRICH, A., 2014: Online waveform processing for demanding target situations. In *Proc. SPIE*, **90800J**.
- PIX4D, 2020: Homepage Pix4DMapper. <https://www.pix4d.com/de/produkt/pix4dmapper-photogrammetrie-software>.
- RESOP, J.P., LEHMANN, L. & HESSION, W.C., 2019: Drone Laser Scanning for Modeling Riverscape Topography and Vegetation: Comparison with Traditional Aerial Lidar. *Drones* 3(35), 1-15.
- RESSL, C., KAGER, H. & MANDLBURGER, G., 2008: Quality Checking Of ALS Projects Using Statistics Of Strip Differences. *The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing* 37(B3), 1682-1750.
- RIEGL, 2020: Datenblatt des topo-bathymetrischen Laserscanners VQ-840-G. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-840-G_Preliminary-Datasheet_2019-09-02.pdf.